



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Mayza Gabriela Estevam da Silva

**MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
DO SOLO PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE ENGENHARIA VIA
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO INDUSTRIAL DE CERÂMICAS**

**RECIFE-PERNAMBUCO
2024**

Mayza Gabriela Estevam da Silva

**MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
DO SOLO PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE ENGENHARIA VIA
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO INDUSTRIAL DE CERÂMICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

Coorientadora: Profa. Dra. Cecília Maria Mota Silva Lins

**RECIFE-PERNAMBUCO
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S586m Silva, Mayza Gabriela Estevam da.
Melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo para aplicação em obras de engenharia via incorporação de resíduo industrial de cerâmicas / Mayza Gabriela Estevam da Silva. - Recife, 2024.
81 f.; il.

Orientador(a): Romildo Morant de Holanda.
Co-orientador(a): Cecília Maria Mota Silva Lins.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Solo - Compactação. 2. Revestimento em cerâmica. 3. Resíduos como material de construção. 4. Mecânica do solo 5. Resistência de materiais. I. Holanda, Romildo Morant de, orient. II. Lins, Cecília Maria Mota Silva, coorient. III. Título

CDD 620.8

Mayza Gabriela Estevam da Silva

**MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
DO SOLO PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE ENGENHARIA VIA
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO INDUSTRIAL DE CERÂMICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada:

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda
Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ianllo José Minervino da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

AGRADECIMENTOS

A Deus por seu infinito amor, por em toda minha vida me sustentar e guardar e por te me proporcionado a força e perseverança necessárias para chegar ao meu objetivo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

A minha mãe, Valdete Estevam da Silva, pelo seu amor, compreensão e que por muitas vezes abdicou de si mesma para que eu pudesse alcançar maiores oportunidades.

Ao meu companheiro de vida, Cesar Santos Alves, que durante todo esse processo esteve ao meu lado, me trazendo apoio, motivação e um lugar de descanso e de acolhimento nos momentos mais desafiadores dessa jornada.

A minha irmã, Mayra Estevam, pela torcida, pelas palavras de motivação e por estar presente para mim.

Ao Prof. Dr. Romildo Morant pela gentileza no dividir dos saberes e por seu entusiasmo no caminho do ensino, me proporcionando apoio e direcionamento para o alcance do sucesso nessa jornada.

A Profa. Dra. Cecília Maria Mota Silva Lins por me abraçar nesse processo de forma acolhedora e afetuosa, por dividir seus saberes com humildade e empatia, indo para além da orientação acadêmica e sendo um exemplo de humanidade, cuidado com o próximo e de dedicação ao ensino.

A amiga que conquistei nesse processo e minha querida aluna de iniciação científica Priscilla Siqueira, que uniu forças a mim nessa jornada, foi meu braço direito, compartilhou comigo muitos desafios mais também muitas risadas.

Ao meu querido amigo Fábio Batista Ferreira, que não mediu esforços para estar presente quando precisei de ajuda e que me mostrou, por muitas vezes, que a amizade é uma expressão do amor de Deus por nós.

Ao téc. de laboratório Marcelo Francisco Gomes, do Laboratório de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, por todo apoio fornecido para realização da pesquisa e pelas palavras de sabedoria e gentileza que em muitos momentos se fizeram presentes.

Ao Prof. Washington Moura de Amorim Júnior, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, pelo apoio fornecido a realização da pesquisa com o acesso ao Laboratório de Solos e instrumentação.

Ao téc. de laboratório Gutemberg Francisco, do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, pela paciência no ensino dos processos e técnicas de ensaios fundamentais ao desenvolvimento da pesquisa.

E por fim, aos meus gatos (Simba, Pretinha, Cheetos e Pippos). Eles foram e são meu apoio emocional em muitos momentos. Os animais expressam um amor puro e por vezes esse amor foi um alento para mim nessa caminhada.

EPÍGRAFE

*Porque vivemos por Fé, e não pelo que
vemos.
2 Coríntios 5:7*

RESUMO

SILVA, Mayza Gabriela Estevam, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, julho de 2024. Melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo para aplicação em obras de engenharia via incorporação de resíduo industrial de cerâmicas. Orientador: Romildo Morant de Holanda. Coorientadora: Cecília Maria Mota Silva Lins.

A atuação do setor da construção civil traz consigo impactos negativos significativos ao meio ambiente, sendo a geração e descarte inadequado de resíduos um dos principais problemas. O estudo e desenvolvimento de formas de utilização dos resíduos industriais, provenientes da produção de insumos para a construção, configura-se como uma alternativa promissora para reduzir esses impactos. Em particular, a melhoria de solos com uso de materiais residuais vem ganhando espaço, sendo reconhecida como uma alternativa sustentável e de menor custo. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho geotécnico de um solo com adição de resíduos cerâmicos de revestimento nas proporções de 20%, 40% e 60%, visando melhorar suas propriedades físicas e geomecânicas para aplicação em obras de engenharia. Para alcançar tal objetivo foram realizadas a caracterização física e mecânica das amostras a partir dos ensaios de granulometria, limites de consistência, massa específica real do grão, permeabilidade a carga constante, compactação, compressão simples, adensamento unidimensional e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Os resultados mostraram que a adição de 40% e 60% de resíduo cerâmico reduziu a plasticidade do solo, passando de altamente plástico para medianamente plástico, e aumentou o coeficiente de permeabilidade em dez vezes. A resistência à compressão diminuiu progressivamente com o aumento do resíduo. O ISC aumentou a resistência do solo, com ganhos de 176% para 40% de resíduo e 332% para 60% de resíduo. As análises indicaram a viabilidade do uso da amostra contendo 20% de resíduo em camadas de cobertura de aterros sanitários, atendendo aos requisitos da NBR 13896/1997, assim como, a viabilidade do uso de todas as amostras em aterros de estradas, conforme a norma 108/2009 do DNIT. Apenas a amostra com 60% de resíduo se mostrou apropriada para uso em camadas de sub-base de estradas, conforme a norma 141/2022 do DNIT. Concluiu-se que a reciclagem e reutilização de resíduos cerâmicos como agregados mostrou-se ambientalmente viável e vantajosa, uma vez que há a possibilidade de aplicação desse material em novos processos de engenharia, reduzindo o envio desses resíduos a aterros sanitários e a extração de matérias-primas naturais finitas.

Palavras-chave: Estabilização do solo; Cerâmica de revestimento; Resíduo da Construção Civil; Geotecnia; Resistência mecânica.

ABSTRACT

SILVA, Mayza Gabriela Estevam, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, July, 2024. Improvement of soil physical and mechanical properties for engineering applications through the incorporation of industrial ceramic waste. Adviser: Romildo Morant de Holanda. Co-advisers: Cecília Maria Mota Silva Lins.

The activities of the construction sector have significant negative impacts on the environment, with the generation and improper disposal of waste being one of the main problems. The study and development of ways to utilize industrial waste from the production of construction materials emerge as a promising alternative to reduce these impacts. In particular, soil improvement using residual materials is gaining traction and is recognized as a sustainable and cost-effective alternative. Therefore, the objective of this research was to evaluate the geotechnical performance of soil with the addition of ceramic tile waste in proportions of 20%, 40%, and 60%, aiming to improve its physical and geomechanical properties for application in engineering works. To achieve this objective, physical and mechanical characterization of the samples was conducted through grain size distribution, consistency limits, real specific gravity, constant head permeability, compaction, unconfined compression, one-dimensional consolidation, and California Bearing Ratio (CBR) tests. The results showed that the addition of 40% and 60% ceramic waste reduced the plasticity of the soil from highly plastic to moderately plastic and increased the permeability coefficient tenfold. The unconfined compressive strength progressively decreased with the increase in waste content. The CBR increased soil strength, with gains of 176% for 40% waste and 332% for 60% waste. The analyses indicated the feasibility of using the sample containing 20% waste in landfill cover layers, meeting the requirements of NBR 13896/1997, as well as the feasibility of using all samples in road embankments according to DNIT standard 108/2009. Only the sample with 60% waste was suitable for use in sub-base layers of roads, according to DNIT standard 141/2022. It was concluded that the recycling and reuse of ceramic waste as aggregates are environmentally viable and advantageous, as there is the possibility of applying this material in new engineering processes, reducing the disposal of such waste in landfills and the extraction of finite natural raw materials.

Keywords: Soil Stabilization; Coating ceramics; Construction Waste; Geotechnics; Mechanical Strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Comparação entre produção e recuperação de RCC em alguns países, sendo: a) composição dos resíduos sólidos; b) geração anual de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), e; c) taxa de recuperação de RCD.....	19
Figura 2- Ranking mundial dos cinco maiores produtores de cerâmicas de revestimento.....	20
Figura 3 - Impactos ambientais ocasionados pela produção de cerâmicas de revestimento... ..	21
Figura 4- Mapa geológico da Região Metropolitana do Recife – RMR.	24
Figura 5- Mapa geológico da cobertura sedimentar na Região Metropolitana do Recife - RMR.	25
Figura 6 - Mapa de solos da Região Metropolitana do Recife - RMR.....	26
Figura 7- Perfis de Argissolos representativos da Região Metropolitana do Recife. a) Perfil de Argissolo Amarelo; b) Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo; c) Perfil de Argissolo Vermelho.	27
Figura 8 – Perfis de Espodossolos representativo da Região Metropolitana do Recife.....	28
Figura 9 – Perfil de Gleissolo representativo da Região Metropolitana do Recife.	28
Figura 10 – Perfis de Latossolos: a) latossolo amarelo representativo da RMR; b) latossolo vermelho; c) latossolo vermelho-amarelo.	29
Figura 11 – Perfis de Neossolos.	30
Figura 12 – Perfil de Nitossolo.....	30
Figura 13 - Fluxograma das etapas de metodologia aplicadas a pesquisa.....	33
Quadro 1 - Amostra de pesquisas para verificação das alíquotas de resíduo cerâmico utilizadas no melhoramento de solos.	36
Figura 14 - a) e b) Depósito de resíduos cerâmicos na empresa concedente.	37
Figura 15 - Resíduo após processo de britagem – a) Britagem primária; b) Britagem secundária; c) Resíduo pronto para uso.	38
Figura 16 - Peneiramento do resíduo para obtenção da granulometria.	38
Figura 17 - a) Britador de mandíbula e b) Moinho de rolos.....	39
Figura 18 - Coleta de solo – a) e b) ensacamento do solo para transporte.	40
Figura 19 - Quarteamento e homogeneização a) solo; b) resíduo cerâmico.	41
Quadro 2 - Determinações para caracterização física e mecânica do solo.....	42
Figura 20 - Análise granulométrica das amostras: a) amostras na solução dispersante; b) sedimentação; c) peneiramento graúdo, e; d) peneiramento miúdo.	43

Figura 21 – Ensaio de Limite de plasticidade: a) material utilizado no ensaio de limite de plasticidade; b) bastão moldado fissurado comparado ao gabarito padrão.	44
Figura 22 – Ensaio de Limite de liquidez: a) aparelho de casa grande e b) amostra de solo moldada para realização do ensaio.	45
Figura 23 - Ensaio de massa específica do grão: a) pesagem do picnômetro mais o solo; b) acréscimo de água ao conjunto picnômetro-solo; c) acoplamento do picnômetro a bomba de vácuo; d) pesagem do conjunto picnômetro-solo-água.	45
Figura 24 - Ensaio de permeabilidade: a) permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2; b) corpo de prova sendo instalado no permeâmetro; c) corpo de prova envolvido por membrana impermeável; d) corpo de prova submerso em câmara.	47
Figura 25 - Ensaio de compactação: a) materiais utilizados; b) corpo de prova sendo desmoldado; c) corpo de prova desmoldado; d) retirada de amostras para verificação da umidade.	48
Figura 26 - Ensaio de compressão simples: a) montagem do corpo de prova na prensa com anel de carga e relógio comparador (extensômetros); b) e c) perfis de ruptura de corpos de prova.	49
Figura 27 - Ensaio de adensamento unidimensional: a) corpo de prova para moldagem do solo nos anéis de adensamento; b) moldagem do solo nos anéis de adensamento; c) montagem de células de carga; d) prensas de adensamento.....	50
Figura 28 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia: a) inundação dos corpos de prova; b) corpos de prova após 04 dias inundados; c) corpo de prova fixado a prensa juntamente com anel de carga e relógio comparador (extensômetro); d) corpo de prova após ensaio.	51
Figura 29 - Curvas granulométricas - solo de referência e resíduo cerâmico (1* ASTM D 422:2007; 2* NBR 6502:2022).	53
Figura 30 - Curvas granulométricas – solo de referência e das misturas (1* ASTM D 422:2007; 2* NBR 6502:2022).	53
Figura 31 - Variação dos valores do LL e LP para o solo de referência e para as misturas.....	56
Quadro 3 - Classificação do solo segundo o índice de plasticidade.	56
Figura 32 - Índice de plasticidade do solo de referência e misturas.....	57
Quadro 4 - Classificação SUCS e TRB.	58
Figura 33 - Curvas de compactação do solo de referência e misturas.....	61
Figura 34 - Curvas da Resistência a compressão – solo de referência e misturas.....	63

Figura 35 - Curvas da deformação volumétrica por carga aplicada - solo de referência e misturas.....	66
Figura 36 - Índice de vazios por tensão aplicada – a) solo de referência; b) SN20%; c) SN40%; d) SN60%.	67
Figura 37 - Taxa ISC do solo de referência e misturas.	69
Quadro 5 - Parâmetros norma 108/2009 DNIT para uso de solo em aterros de estradas.....	72
Quadro 6 - Parâmetros norma 141/2022 DNIT para uso de solo estabilizado granulometricamente como camada de base em pavimentos.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de solo e unidades de mapeamento e área ocupada na Região Metropolitana do Recife - RMR.	31
Tabela 2 - Pesquisa Bibliográfica impactos ambientais causados pela produção de cerâmicas de revestimento e manejo inadequado dos RCC.	35
Tabela 3 - Pesquisa Bibliográfica aproveitamento de resíduos cerâmicos e RCC para a estabilização de solos.....	35
Tabela 4 - Composição granulométrica das amostras (NBR 6502:2022).	54
Tabela 5 - Composição granulométrica das amostras (ASTM D 422/2007).	54
Tabela 6 - Massa específica do grão para o solo, misturas e resíduo cerâmico.	55
Tabela 7 - Limites de Atteberg do resíduo, solo de referência e misturas.	55
Tabela 8 - Coeficiente de permeabilidade do solo de referência e misturas.	59
Tabela 9 - Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do solo de referência e misturas.....	60
Tabela 10 – Resistência a compressão e Deformação Específica Axial (DEA) das amostras.	63
Tabela 11 - Taxa de deformação de adensamento unidimensional.	65
Tabela 12 - Redução em porcentagem dos índices de vazios do solo e misturas após ensaio de adensamento.	68
Tabela 13 - Taxa do Índice de Suporte Califórnia e Expansão.	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO GERAL	16
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E IMPACTOS AMBIENTAIS.....	16
3.2. PROCESSO PRODUTIVO DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO E IMPACTOS AMBIENTAIS	19
3.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOLOGIA DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE	22
3.3.1. Principais tipos de solo da RMR.....	26
3.4. MELHORAMENTO DE SOLOS PARA OBRAS DE ENGENHARIA.....	31
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1. ESTUDO ESTRUTURADO PARA REVISÃO DA LITERATURA	33
4.2. DETERMINAÇÃO DE ALÍQUOTAS DE RESÍDUO INCORPORADAS PARA O MELHORAMENTO DO SOLO	35
4.3. COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS DE REVESTIMENTO	37
4.4. APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS PARA MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SOLO.....	39
4.4.1. Coleta de amostra de solo	39
4.4.2. Classificação do solo, resíduo e misturas	40
4.4.3. Ensaio de laboratório.....	41
4.4.3.1. Ensaio de caracterização física	43
4.4.3.2. Ensaio de caracterização geomecânica.....	47
4.5. VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE TÉCNICA E DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL DO USO DAS AMOSTRAS EM OBRAS DE ENGENHARIA	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO, RESÍDUO CERÂMICO E MISTURAS.	52
5.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO E MISTURAS	60
5.2.2. Compressão simples	63
5.2.3. Adensamento unidimensional.....	65
5.2.4. Índice de Suporte Califórnia – ISC.....	69
5.3. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE, POR MEIO DE NORMAS TÉCNICAS, DAS MISTURAS SOLO-RESÍDUO CERÂMICO EM OBRAS DE ENGENHARIA.....	71
5.4. VERIFICAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL DO USO DAS MISTURAS EM OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL.....	73
6. CONCLUSÕES.....	74
7. REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

O desafio da sustentabilidade está sendo enfatizado pela Indústria da Construção no Brasil nos últimos anos. O setor está cada vez mais consciente sobre a importância do seu papel para a melhoria das condições de vida do planeta, sendo um dos setores mais relevantes para economia brasileira e tendo forte influência nos três aspectos da sustentabilidade: ambiental, econômico e social. Segundo a análise sobre o perfil da cadeia produtiva da construção realizada pela Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção e a Fundação Getúlio Vargas (2022) foi verificado que a contribuição para o PIB brasileiro corresponde a 6,2%, com arrecadação tributária que chega a 260.389 milhões de reais.

A atuação expressiva deste setor, tanto no desenvolvimento de empreendimentos quanto na produção de insumos, influencia positivamente o avanço dos centros urbanos, no entanto, traz também consigo consequências que causam impactos negativos ao meio ambiente, podendo ser citados a extração excessiva de recursos naturais, a emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) pelo transporte de materiais e o grande volume de resíduos gerados (Magalhães; Danilevicz; Saurin, 2017).

As indústrias cerâmicas, que fazem parte do grupo de indústrias fornecedoras de insumos para a construção civil, destacam-se quando são colocados em pauta os impactos ambientais negativos gerados pelo setor da construção. Na produção de materiais cerâmicos são utilizadas matérias-primas minerais, água, energia, e outros materiais auxiliares, tendo como consequências do processo produtivo a geração de águas residuais, as emissões de poeira, o grande acúmulo de resíduos por perdas na produção e o alto consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa (CO₂) (Monteiro; Cruz; Moura, 2022).

A redução de emissões de CO₂ na atmosfera apresenta-se como um dos mais importantes objetivos ecológicos mundiais. De forma indireta, a indústria da construção é responsável por parte significativa das emissões de CO₂, incluindo-se como uma das principais colaboradoras, a indústria cerâmica. Isso se dá, principalmente, devido aos fornos de alta temperatura utilizados para produção e pelo transporte desses materiais. Tendo-se então perdas na produção, e sendo o material defeituoso descartado, a energia incorporada para sua produção é desperdiçada, sendo, dessa forma, fundamental o desenvolvimento de técnicas para o prático reaproveitamento desses resíduos (Monteiro; Cruz; Moura, 2022).

O estudo e desenvolvimento de formas de aplicação dos resíduos industriais, provenientes da produção de materiais e compósitos, no setor da construção civil em processos

de engenharia, visando a substituição de materiais naturais e a minimização de sua mineração, configura-se como uma das mais promissoras alternativas para redução dos impactos negativos ao meio ambiente (Siddique; Singh; Singh, 2018).

Esta abordagem permite substituir materiais naturais por materiais reciclados de qualidade compatível, preservando os recursos naturais e auxiliando na redução das emissões de CO₂ provenientes da mineração e do transporte de matérias-primas. Além disso, tal prática aumenta a vida útil dos produtos já explorados interferindo diretamente na economia dos custos de manejo e descarte desses materiais, fortalecendo o desenvolvimento da sustentabilidade na indústria da construção (Siddique; Singh; Singh, 2018).

Tendo em vista o exposto, um conceito a ser incorporado ao processo produtivo dos diversos ramos da indústria da construção, e em específico as indústrias cerâmicas é o de economia circular. A filosofia da economia circular baseia-se principalmente no propósito de eliminar a produção de rejeitos e da poluição, circular produtos e materiais até o seu máximo potencial e regenerar a natureza.

De acordo com Spišáková et al. (2022), o modelo de economia circular tem como um de seus objetivos, garantir um ambiente saudável, onde o lucro obtido em sistemas com esse princípio é baseado no uso eficiente dos recursos naturais, contemplando os aspectos do produto e seus componentes, bem como dos materiais utilizados. Essa conduta, tem reflexo significativo na minimização do desperdício e no custo de insumos e energia para produção de novos produtos, condicionando um sistema fechado que permite que materiais não utilizados ou resíduos provenientes dos processos produtivos sejam devolvidos à cadeia de suprimentos, como matérias-primas recicladas.

A sustentabilidade na indústria da Construção não intenciona apenas a redução do desperdício de materiais, mas o desenvolvimento de ações que possibilitem a redução de custos e materiais, o desenvolvimento de técnicas que permitam o reuso e reciclagem de resíduos, bem como, o uso inteligente de recursos naturais em obras de engenharia promovendo o desenvolvimento econômico e social (Roque; Pierre, 2019).

Para que se alcance a produção sustentável, os impactos negativos produzidos por ações antrópicas ao meio ambiente devem ser reduzidos ou cessados (quando possível) e, uma vez que se investe na eliminação de defeitos na produção e no reaproveitamento ou reciclagem de resíduos gerados, contribui-se para a preservação do meio ambiente (Michalek, 2022).

Visando esta preservação pode-se utilizar estratégias de reutilização (reaplicação de um resíduo sem transformação), reciclagem (processo de gerar novos materiais ao reaproveitar um

resíduo), beneficiamento (ato de submeter um resíduo a transformações para que possa ser usado como matéria-prima em diversos setores ou produtos) ou, quando necessário, uma destinação final adequada (Borba; Quaresma, 2019).

É possível perceber o avanço no desenvolvimento de pesquisas que buscam a incorporação dos resíduos cerâmicos em novos processos da indústria da construção. Esses resíduos têm grande potencial de aproveitamento, como apresentado por Lasseguette et al. (2019) que analisaram as propriedades químicas, microestruturais e mecânicas de sistemas cimentício misturados com resíduos cerâmicos, validando a reatividade pozolânica das amostras utilizadas; e Chen et al. (2022) que utilizaram o pó de resíduo cerâmico como material cimentício complementar em concreto agregado reciclado e verificaram que, devido ao menor consumo de energia térmica e emissão de dióxido de carbono, a utilização do resíduo para produção de concreto agregado reciclado é benéfica para melhorar suas propriedades ambientais.

Em se tratando do melhoramento de solos, o uso de materiais residuais vem ganhando espaço e sendo reconhecido como uma alternativa sustentável e de menor custo (Al Bared; Harahap; Marto, 2018). Em regiões onde se tem predominância de solos com fração de finos representativa, muitas vezes, não são encontradas condições favoráveis ao desenvolvimento de obras de engenharia pois, em condições naturais, esses solos acabam por não apresentar um comportamento adequado para fins geotécnicos, principalmente devido a variação da umidade no solo que acaba por condicionar redução em sua capacidade de suporte (Daraei, 2019; Jili; Hao, 2020; Lukiantchuki, 2021).

O uso de resíduos cerâmicos para o melhoramento de solos vem sendo alvo de interesse de pesquisadores. Estudos vêm demonstrando que os resíduos cerâmicos podem ser utilizados como agregado em misturas com solos de baixa qualidade como em Silva et al. (2019). Estes autores utilizaram pó cerâmico de resíduo de tijolos produzidos por olarias misturado a um solo argiloso, em diferentes proporções, para determinação do comportamento geotécnico deste solo. Eles verificaram que, um incremento de 10% de resíduo cerâmico foi considerado a melhor proporção para substituição do agregado natural, quando comparado com as características da mistura de referência utilizada (solo-areia). Por outro lado, Lima et al. (2020) utilizando resíduos cerâmicos para estabilização de um solo laterítico, concluíram que, com uma proporção de 60% do resíduo reciclado acrescentado ao solo, atingiu-se, para resultados do Índice de Suporte Califórnia (ISC), um incremento nos valores de 195,47% para energia intermediária, e 243,21% para a energia modificada de compactação.

Endossa-se então que o estudo realizado representa um avanço no desenvolvimento de conteúdo científico com fins de auxiliar a adequação da indústria da construção, sobretudo as indústrias cerâmicas, aos parâmetros de sustentabilidade, buscando incentivar obras de engenharia sustentáveis, a preservação de recursos minerais naturais e o desenvolvimento de produções que incorporem cada vez mais processos ambientalmente adequados.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do solo com adição de resíduos cerâmicos de revestimento, em diferentes proporções, analisando as alterações em suas características geotécnicas, visando melhorar suas propriedades físicas e geomecânicas para aplicação em obras de engenharia.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar as características físicas e geomecânicas do solo de referência;
- b) Analisar as características físicas do resíduo cerâmico;
- c) Analisar as alterações das características físicas e geomecânicas do solo obtidas com as misturas solo-resíduo cerâmico, nas proporções de 20%, 40% e 60%;
- d) Avaliar a aplicabilidade, por meio de normas técnicas, das misturas solo-resíduo cerâmico em obras de engenharia.
- e) Verificar a contribuição ambiental do uso da mistura solo-resíduo cerâmico.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico serão apresentados os principais pontos da literatura relacionados com o tema da pesquisa, como os impactos ambientais negativos relacionados aos resíduos da construção civil; os impactos ambientais negativos inerentes a produção de cerâmicas de revestimento; os aspectos gerais sobre a geologia da Região Metropolitana do Recife; e as técnicas de melhoramento de solos.

3.1. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E IMPACTOS AMBIENTAIS

O alto volume de Resíduos da Construção Civil (RCC) gerados no Brasil apresenta-se como um grande desafio para indústria da construção na busca por adequação aos padrões de sustentabilidade. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023, publicado

pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), a produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, no ano de 2022, foi de 77,1 milhões de toneladas dos quais, 45 milhões tratavam-se de RCC, o que corresponde, em percentual, a 58,37% da produção total de RSU no país.

A resolução 307/2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e suas atualizações, que trata das diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil define RCC como aqueles que provêm de construções, reformas, reparos, demolições e da preparação e escavação de terrenos, tais como: tijolos, concreto, blocos cerâmicos e cerâmicas de revestimento, solos, rochas, metais, tintas, colas, madeiras, entre outros.

A mesma resolução especifica que os resíduos da construção estão categorizados em quatro classes, sendo: A- resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (ex. tijolos, placas de revestimento cerâmico, argamassa, concreto); B- resíduos recicláveis com outras destinações (ex. plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras entre outros); C- resíduos passíveis de reutilização, mas para os quais ainda não existem técnicas apropriadas economicamente que permitam a reciclagem e; D- resíduos perigosos provenientes do processo de construção (ex. tintas, solventes, óleos, resíduos com potencial contaminação radiológica, entre outros) (CONAMA, 2002).

Os RCC do tipo classe A, que compreendem os resíduos de placas cerâmicas de revestimento, podem ser classificados ainda como resíduos industriais classe II A, configurando os não perigosos e inertes, pelo que prescreve a Norma Brasileira 10004/2004. Esta norma classifica os resíduos sólidos considerando o processo ou atividade que os originou bem como sua constituição e características, avaliando seu potencial de impacto à saúde e ao meio ambiente (BRASIL, 2004).

Grandes centros de urbanização, em seu processo de desenvolvimento, acabam por enfrentar sérios problemas ambientais que estão relacionados a produções industriais. Em se tratando da indústria da construção, boa parte dos impactos ambientais adversos ocasionados podem ser atribuídos, principalmente, a geração e ineficiente gestão dos resíduos dos processos de Construção e Demolição (Jalaei, Zoghi e Khoshand, 2019).

Tafesse, Girna e Dessalegn (2022) realizaram uma análise dos impactos socioeconômicos e ambientais dos resíduos de construção e elencaram potenciais consequências ao ambiente devido aos RCC e seu manejo inadequado. É possível pontuar como exemplos: o consumo excessivo e esgotamento de fontes naturais de matéria-prima uma vez

que não se aproveita, em todo seu potencial, o que já foi extraído; a inativação de grandes áreas, bem como a poluição do solo e fontes de água com o descarte inadequado desse material, podendo desencadear contaminações por produtos químicos ou metais pesados presentes nos RCC; a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera pelos veículos que transportam os RCC, contribuindo com mudanças climáticas nocivas, e; a redução da qualidade do ar pela geração de poeiras e materiais particulados em escala nano.

De acordo com Oliveira et al. (2019) resíduos de construção, como concreto, tintas ou aço, apresentam em sua formulação materiais de tamanho nanométrico e por esse motivo a degradação durante longo período pode desbloquear as nanopartículas. As consequências desse processo se apresentam como impactos adversos à saúde das comunidades locais próximas aos depósitos de resíduos e dos trabalhadores que executam o manejo de resíduos após a suspensão de partículas finas e subsequente inalação, constituindo mais um agravamento em consequência da gestão inadequada dos RCC.

De acordo com Jalaei, Zoghi e Khoshand (2019) os resíduos sólidos, incluindo os RCC são geridos numa hierarquia semelhante a uma pirâmide invertida. No topo estão os aterros sanitários como principal destinação, sendo essa, uma solução macro aplicada ao nível da cidade. Em seguida, a parcela de resíduos processados e tratados ainda é reduzida, fazendo com que permaneça alto o potencial em causar impactos negativos ao ambiente. E por fim, na base estreita da pirâmide invertida está a minimização dos resíduos na fonte, tendo em vista ser ainda uma solução aplicada de forma tímida, por poucos indivíduos e empresas.

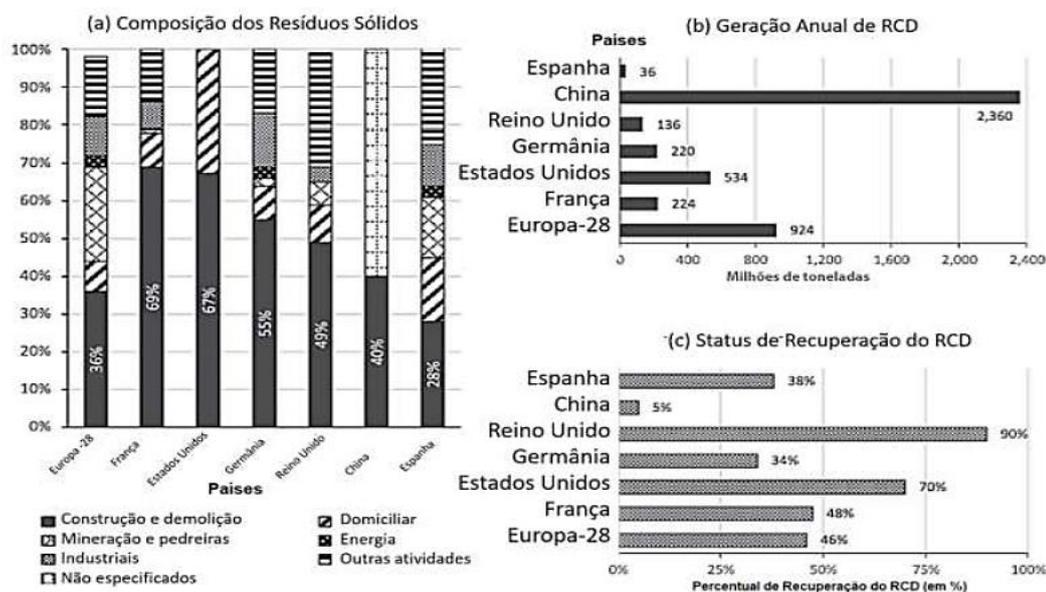
Os RCC são formados em sua maioria por materiais inertes, e por essa característica são passíveis de serem utilizados em variadas aplicações quando reciclados, voltando ao ciclo produtivo e servindo como insumos dentro da própria indústria da construção. Como exemplo os resíduos de construção na forma de agregados reciclados podem ser utilizados na pavimentação de ruas, na substituição do agregado natural nas dosagens de argamassas e concretos, entre outras aplicações (Maué; Beltrão; Silva, 2021).

De acordo com Ruiz et al. (2020), em países desenvolvidos já se percebe maior atenção e investimento em práticas de reciclagem dos RCC. Apesar de apresentarem alto percentual de produção de resíduos da construção, chegando a compor mais da metade dos resíduos sólidos urbanos produzidos, a exemplo dos Estados Unidos com 67% (figura 1.a) já se observam taxas de recuperação de 70% (Estados Unidos) a 90% (Reino Unido), como visto na figura 1.c. A figura 1 apresenta a composição dos resíduos sólidos, a porcentagem de RCC e o percentual de recuperação desses resíduos em alguns países.

O processo de reciclagem dos RCC favorece a correta segregação dos materiais residuais gerados na indústria da construção, permitindo que o descarte do que não pode ser transformado e reaproveitado ocorra de maneira eficiente. Essa ação permite evitar cenários como o depósito inadequado no solo e em cursos de água de materiais contendo substâncias reativas e potencialmente contaminantes (Maué; Beltrão; Silva, 2021).

Desse modo, a reciclagem dos RCC se apresenta como uma forma eficiente na redução dos impactos negativos causados ao meio ambiente. Quando utilizada corretamente, esta abordagem apresenta um fator, ambiental, econômico e social positivos, uma vez que são minimizados os riscos associados ao descarte inadequado para o meio ambiente e saúde da população e que a inclusão, no processo produtivo, dos materiais reciclados, facilita a redução do consumo de materiais naturais e seus custos (Da Paz, 2020).

Figura 1- Comparação entre produção e recuperação de RCC em alguns países, sendo: a) composição dos resíduos sólidos; b) geração anual de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), e; c) taxa de recuperação de RCD.



Fonte: Ruiz et al. (2020)

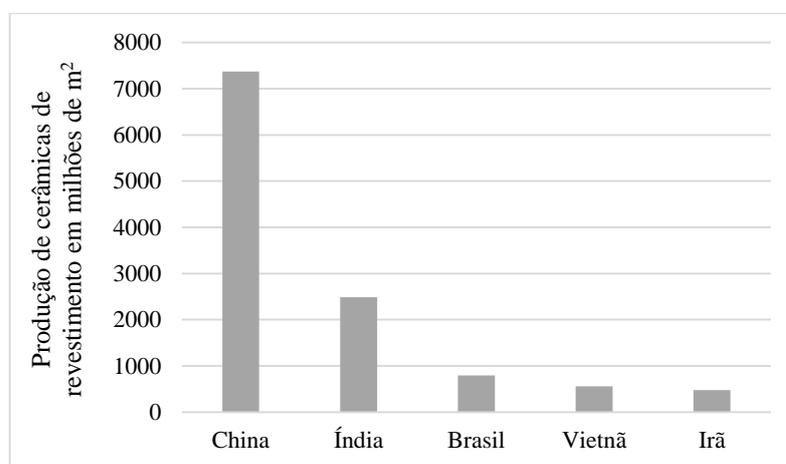
3.2. PROCESSO PRODUTIVO DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO E IMPACTOS AMBIENTAIS

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres – ANFACER, o Brasil, no ano de 2023, estava posicionado como 3º maior produtor mundial de cerâmicas de revestimento, chegando a uma

fabricação de 792,9 milhões de m² (figura 2), sendo, a indústria cerâmica, responsável por um percentual de 6% de contribuição com o PIB gerado pelas indústrias de materiais da construção.

No entanto, apesar da contribuição expressiva para economia e desenvolvimento do país a fabricação das cerâmicas de revestimento acarreta em seu processo impactos ambientais negativos, sendo um dos mais expressivos a geração de resíduos provenientes das perdas na produção. Pesquisas demonstram que cerca de 15 a 30% da produção da indústria cerâmica é perdida durante o processo de fabricação (Deboucha; Mamoune; Yacine; Ziane, 2019; Balegh; Sellaf; Hadjmostefa, 2020; Saber; Iravanian, 2022).

Figura 2- Ranking mundial dos cinco maiores produtores de cerâmicas de revestimento.



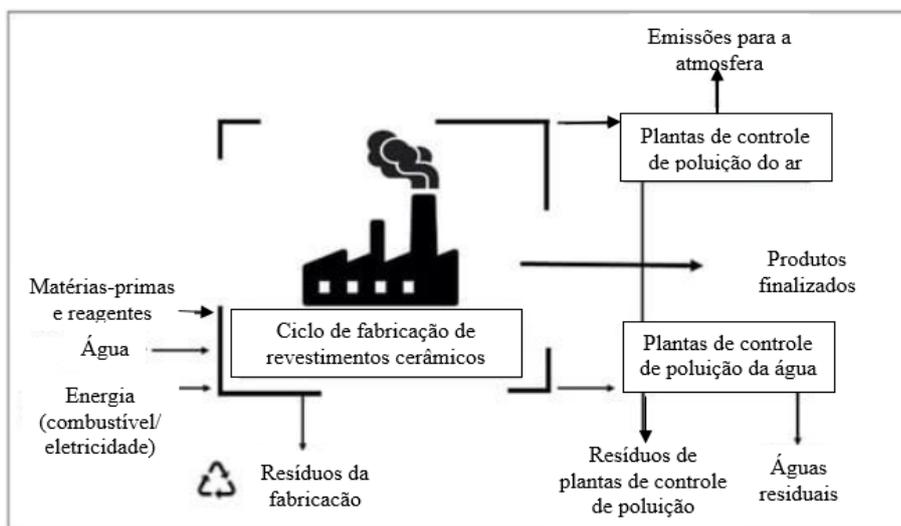
Fonte: adaptado da ANFACER (2023).

A fabricação das cerâmicas de revestimento inicia-se com a extração de matérias-primas de jazidas naturais, onde estas são transportadas para os locais de produção normalmente por via terrestre. Dentro do grupo de matérias-primas, os principais constituintes das cerâmicas de revestimento são argilas, quartzo e fundentes, sendo estes últimos os elementos que têm por função fundir durante a queima fornecendo uma quantidade adequada de fase líquida que é essencial ao processo de sinterização das peças cerâmicas (Dondi et al., 2019; Boschi et al., 2020; Wang et. al, 2020).

Uma vez alocados nos pátios produtivos das indústrias, esses materiais são triturados e moídos a úmido, de modo a formar uma pasta cerâmica. Após isso, é feita a secagem por atomização transformando a pasta cerâmica em grãos cerâmicos arredondados, de modo a atingir um teor de umidade adequado para atender aos requisitos de moldagem, deixando o material apto a prensagem eficiente (Wang et. al, 2020).

Na sequência, é então realizado um novo processo de secagem para redução da umidade residual tornando o produto pronto para a esmaltação, etapa onde é feita a deposição do esmalte no corpo cerâmico e queima. A queima é realizada em temperaturas em torno de 1000–1250°C sendo as peças tratadas mecanicamente para atingir a forma final. Quando necessário, o revestimento cerâmico passa por um processo de acabamento, que envolve lixamento e polimento, para finalmente ser realizada a seleção, ser embalado e comercializado (Boschi et al., 2020; Vieira et al., 2023). A figura 3 exemplifica os impactos ambientais gerados durante o ciclo produtivo das cerâmicas de revestimento.

Figura 3 - Impactos ambientais ocasionados pela produção de cerâmicas de revestimento.



Fonte: Boshi (2023).

Dentro do processo produtivo das cerâmicas a liberação de material particulado no ar, ocorre durante quase todas as etapas de fabricação, estando majoritariamente associada aos processos iniciais da produção, compreendendo a moagem e a secagem por atomização, sendo este último, a transformação da pasta cerâmica em partículas secas por pulverização por uma corrente de ar aquecida (Boschi et al. 2020; Boschi et al., 2023).

Sem o correto tratamento, esse particulado em suspensão pode afetar as características de qualidade de ar onde estão instalados os complexos produtivos, trazendo à tona, como preocupação emergente, a formação de nanopartículas, configuradas como um risco ocupacional e ambiental (Boschi et al. 2020; Bessa et al., 2020; Boschi et al., 2023).

Na etapa de queima das peças cerâmicas surgem outros problemas ambientais. As elevadas temperaturas (1000 a 1250°C) a que as peças são submetidas durante o processo de sinterização podem levar a liberação de vários poluentes e impurezas presentes na matéria-

prima, emissões gasosas compostas principalmente por CO₂ entre outros, sendo contribuinte ao efeito estufa. (Boschi et al. 2020; Monteiro; Cruz; Moura, 2022; Boschi et al., 2023).

A água utilizada no processo produtivo e contaminada pode também acarretar processos de poluição ao meio ambiente, como a contaminação de corpos d'água ou ainda a contaminação do solo por substâncias presentes no efluente. Nas etapas de moagem, secagem por atomização, decoração e pós-queima, são geradas lamas residuais incorporadas das substâncias presentes nas matérias-primas. (Boschi et al., 2023).

Por fim tem-se a produção de resíduos sólidos proveniente das perdas de produção das placas cerâmicas pós-queima. Esses resíduos têm por origem as falhas no processo, que inviabilizam a comercialização das peças defeituosas.

Para serem recicladas e posteriormente reutilizadas na fabricação de novas placas, as sobras queimadas necessitam passar por processo de moagem mecânica. No entanto, por seu forte comportamento refratário sua utilização na mistura de matérias-primas para novas produções limita-se a menos de 20% em peso, o que condiciona um montante passivo expressivo desses resíduos (Boschi et al., 2023).

Devido à ausência de diretrizes adequadas para o reaproveitamento desses resíduos, a considerável energia e potência utilizadas no processo de fabricação são então desperdiçadas, e de forma ainda mais impactante negativamente, pois, quando descartados de forma inadequada esses resíduos trazem outras consequências ambientais negativas. Pode-se citar a inutilização de grandes áreas, o esgotamento de aterros sanitários e a contribuição a proliferação de vetores trazendo implicações a saúde pública, sendo fundamental o desenvolvimento de técnicas de reaproveitamento desses materiais (Rathore, 2023).

3.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOLOGIA DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

A Região Metropolitana do Recife – RMR foi instituída em 1973 pela Lei Federal complementar n° 14, Lei essa que determinou as bases legais para a criação de 14 regiões metropolitanas no Brasil (CONDEPE;FIDEM, 2023). Possuindo uma área de 3.207,54 km², o que equivale a 3,3% do território pernambucano, a RMR é composta por 15 municípios, sendo: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Goiana, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata (Pernambuco, 2023).

Em se tratando dos aspectos de formação geológica, a RMR é composta principalmente pelas rochas do embasamento cristalino e sedimentos das bacias sedimentares costeiras Pernambuco e Paraíba (Torres et al., 2022).

De acordo com Gusmão Filho (2005) o embasamento cristalino caracteriza-se pela formação das montanhas, serras e elevações, tendo em sua composição uma conjuntura de rochas ígneas graníticas e metamórficas (gnaisses, xistos, quartzitos, calcários, entre outros). O manto de solo residual característico dessa unidade geológica é, em geral, pouco espesso, em decorrência do clima semiárido, sendo composto por três horizontes A, B e C.

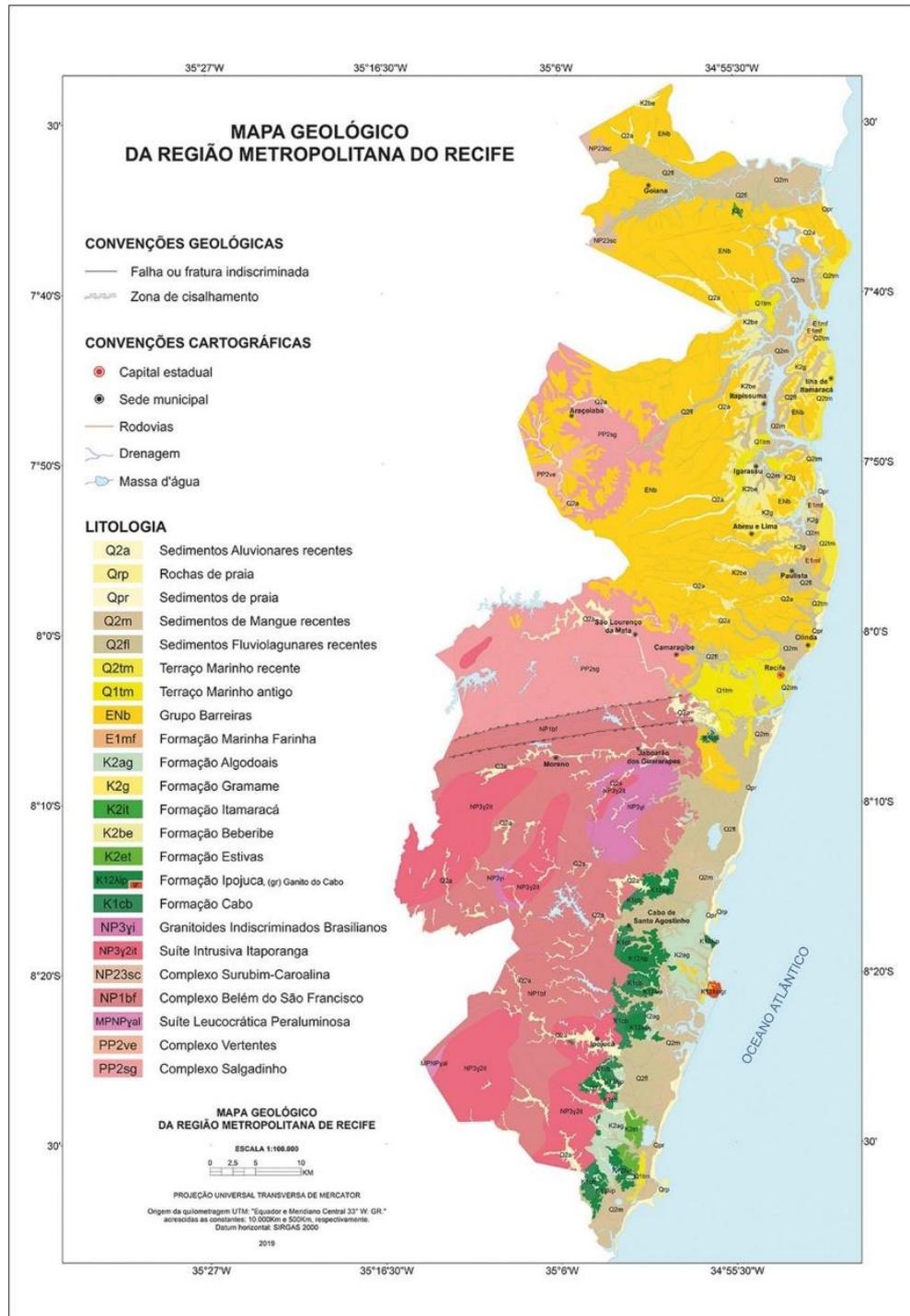
O horizonte A é superficial, pouco espesso e constituído por areias e argilas com pedregulhos e matéria orgânica em decorrência da vegetação. Já o horizonte B, mais evoluído, é composto por areia argilosa ou argila arenosa, com pedregulhos apresentando coloração que varia de vermelha a amarela. Por fim, o horizonte C, ou saprolito, caracteriza-se por manter a aparência da rocha mãe e constitui-se por frações variáveis de areia, silte e argila. Essas variações dependem do grau de intemperismo e da composição mineralógica da rocha (Gusmão Filho, 2005).

Os sedimentos terciários e quaternários constituem como unidade de formação mais importante o Grupo Barreiras. Consiste em um volume sedimentar de coloração creme a avermelhada, dependendo da intensidade da oxidação do ferro, composto por depósitos de areias grossas, intercaladas por estratos rítmicos de areia fina e/ou argila, que por suas próprias características granulométricas e mineralógicas são bastante friáveis e de fácil desagregação. Além disso, apresentam elevada declividade das bordas dos tabuleiros, sendo essa a forma morfológica típica dessa unidade (Santos Junior, 2005; Pfaltzgraff, 2007, Bandeira, 2010).

Em muitas formações de morros que são mais próximos ao litoral, esses sedimentos apresentam-se bem estratificados, estando intercaladas camadas argilosas e arenosas, sem a observação de ligantes entre eles. Noutros casos, pode ocorrer a presença de camadas laterizadas e conglomerados grosseiros com cimento ferruginoso, possuindo resistência ao avanço do mar (Gusmão Filho, 2005).

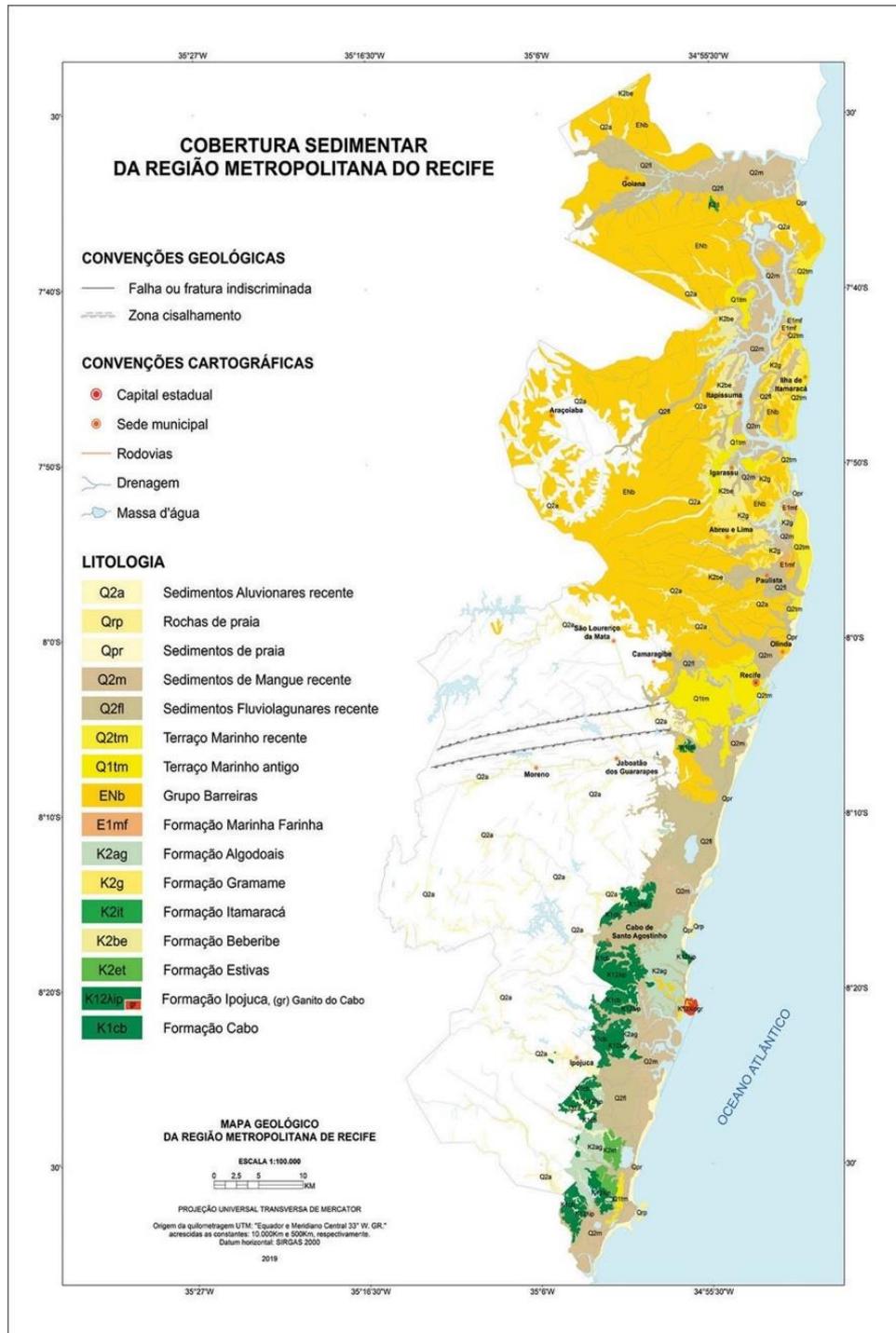
Devido a sua constituição argilo-arenosa, os depósitos de formação barreiras são largamente explorados pela indústria da construção civil como jazidas de matéria-prima, intensificando o desmonte de encostas e taludes, principalmente quando localizados em áreas de urbanização intensa (De Paula, 2008 apud Bandeira, 2010). Na figura 4 verifica-se o mapa geológico da RMR e na figura 5 o destaque para a região formada pela cobertura sedimentar, onde é possível verificar a grande área formada pelo grupo barreiras.

Figura 4- Mapa geológico da Região Metropolitana do Recife – RMR.



Fonte: Santos et al. (2018); Guimarães et al. (2017); Valença e Souza (2017) e Pfaltzgraff (2003) apud Torres et al. (2022).

Figura 5- Mapa geológico da cobertura sedimentar na Região Metropolitana do Recife - RMR.

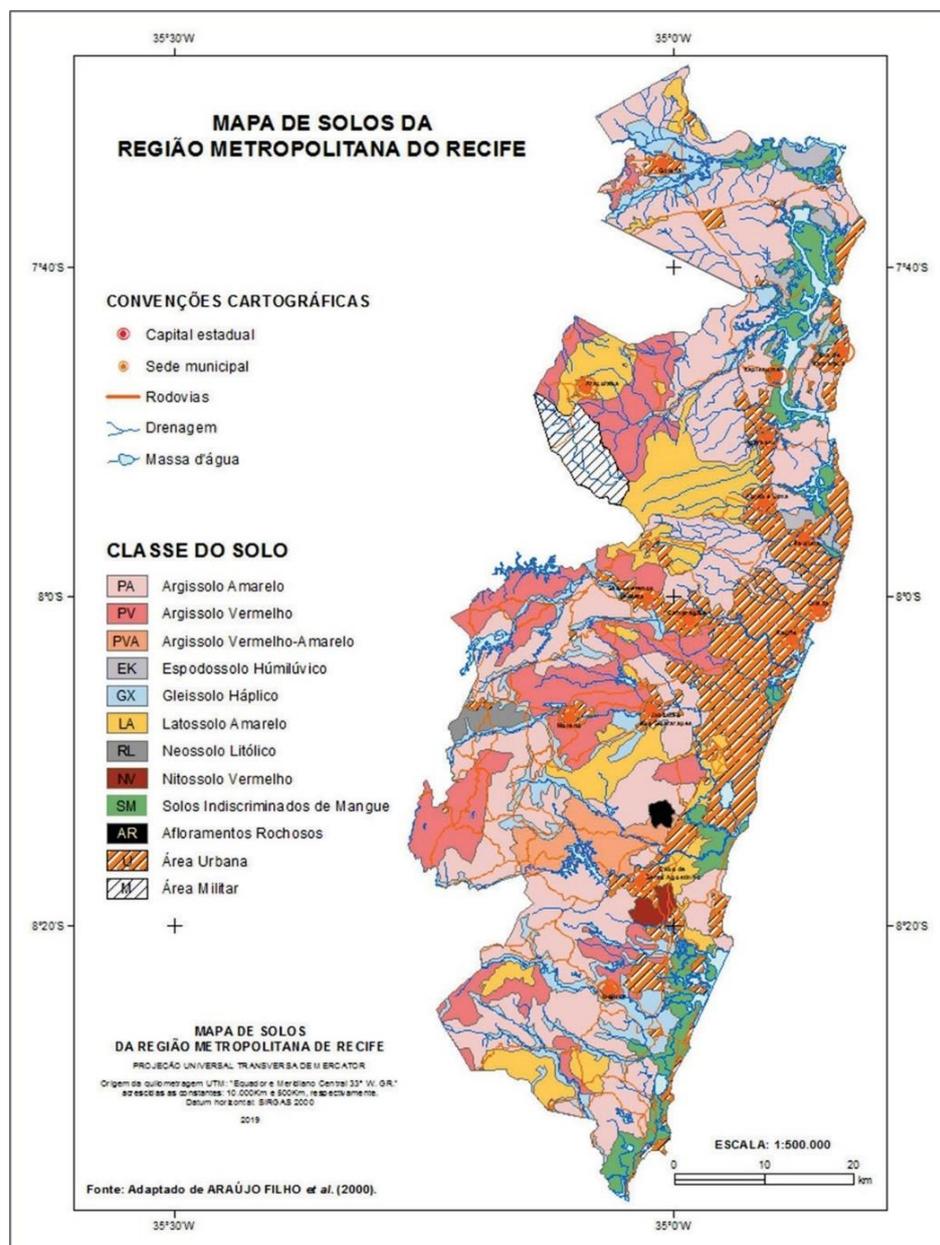


Fonte: Santos et al. (2018); Guimarães et al. (2017); Valença e Souza (2017) e Pfaltzgraff (2003) apud Torres et al. (2022).

3.3.1. Principais tipos de solo da RMR

Os solos são formados a partir da ação combinada de alguns fatores, sendo: o material de origem; o clima; o relevo, e; a ação dos organismos e do tempo. Por razão das condições climáticas, a RMR apresenta em sua composição solos muito intemperizados, profundos, caulíníticos e pedogeneticamente bem desenvolvidos (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022). Na figura 6 observa-se as classes de solos presentes na RMR.

Figura 6 - Mapa de solos da Região Metropolitana do Recife - RMR.

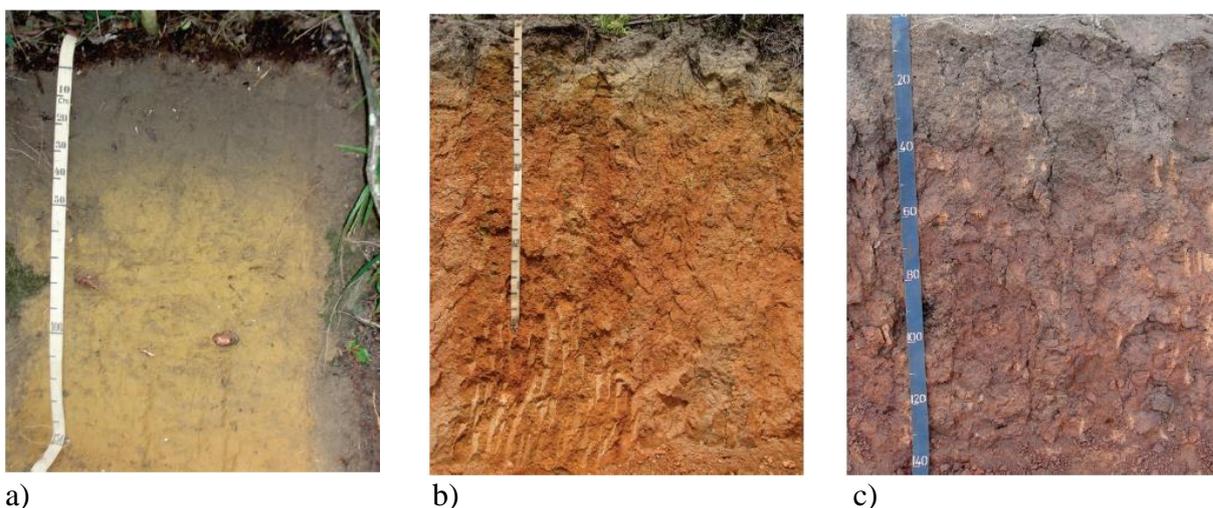


Fonte: Araújo Filho et al (2000) apud Araújo Filho, Silva e Marques (2022).

De acordo com Araújo Filho, Silva e Marques (2022) os solos que se destacam na RMR abrangem os Argissolos, os Espodossolos, os Gleissolos, os Latossolos, os Neossolos e os Nitossolos, sendo a seguir apresentadas suas principais características.

Os Argissolos (figura 7) apresentam uma acentuada variação no teor de argila entre a camada superficial, horizonte (A) e o horizonte subjacente Bt (B textural). Podem apresentar coloração variando entre o amarelo, vermelho-amarelo, vermelho e com menor frequência, acinzentado. Quanto a textura, esta varia de arenosa a argilosa na superfície, e de média a muito argilosa em subsuperfície. (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022; EMBRAPA, 2023).

Figura 7- Perfis de Argissolos representativos da Região Metropolitana do Recife. a) Perfil de Argissolo Amarelo; b) Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo ; c) Perfil de Argissolo Vermelho.



Fonte: Araújo Filho, Silva e Marques (2022).

Os Espodossolos (figura 8) são tipicamente arenosos e apresentam um horizonte subsuperficial do tipo B espódico, que implica num acúmulo de matéria orgânica rica em alumínio, acompanhada ou não por ferro. Esse horizonte apresenta frequentemente colorações escuras, variando entre o preto, bruno-escuro e bruno-avermelhado-escuro e pode estar cimentado ou não, e ocorrer sobrejacente a outros horizontes cimentados (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022; EMBRAPA, 2023).

Figura 8 – Perfis de Espodossolos representativo da Região Metropolitana do Recife.



Fonte: Araújo Filho, Silva e Marques (2022).

Os Gleissolos (figura 9) são solos hidromórficos, típicos de ambientes de várzeas, ou seja, apresentam-se permanente ou periodicamente saturados por água. Caracterizam-se pela forte gleização, fenômeno que provoca a apresentação de colorações acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, resultantes do processo de redução e solubilização do ferro, possibilitando a expressão das cores neutras dos minerais de argila, ou ainda a precipitação de compostos ferrosos (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022; EMBRAPA, 2023).

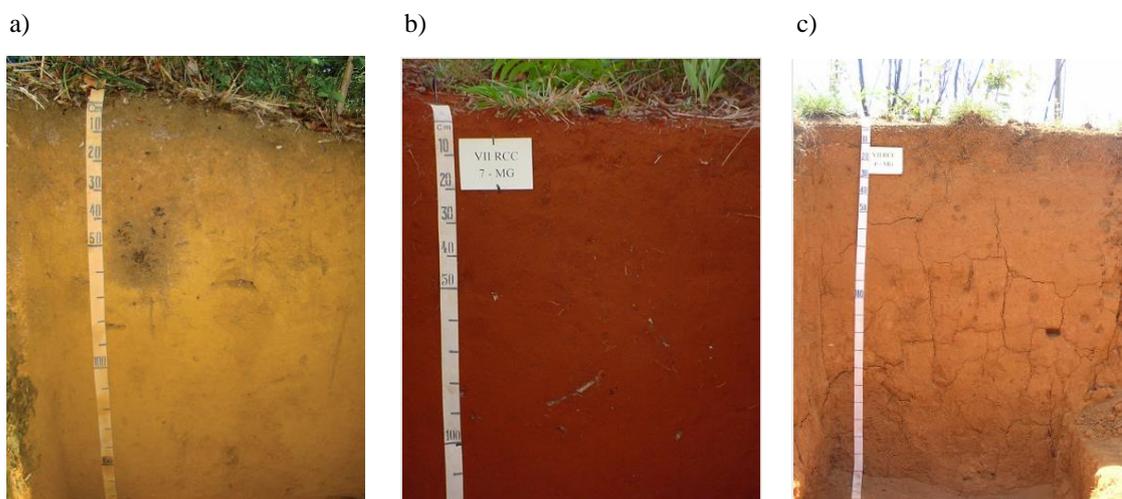
Figura 9 – Perfil de Gleissolo representativo da Região Metropolitana do Recife.



Fonte: Araújo Filho, Silva e Marques (2022).

Os Latossolos (figura 10) apresentam alto grau de intemperismo, sendo geralmente muito profundos, bem drenados e bastante uniformes em suas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. Sua textura é de média a muito argilosa, apresentando mínima variação no conteúdo de argila ao longo de perfil de solo. Podem ser encontrados nas colorações amarela, vermelho-amarela, vermelha e ocasionalmente acinzentada, a depender da natureza do material de origem. Na RMR predominam os Latossolos Amarelos (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022; EMBRAPA, 2023).

Figura 10 – Perfis de Latossolos: a) latossolo amarelo representativo da RMR; b) latossolo vermelho; c) latossolo vermelho-amarelo.



Fonte: Araújo Filho, Silva e Marques (2022) e EMBRAPA (2024).

Os Neossolos (figura 11) caracterizam-se por serem solos pedogeneticamente pouco desenvolvidos, apresentando características muito semelhantes às do material de origem. Na RMR evidencia-se uma pequena área com os Neossolos Litólicos, caracterizados por serem solos rasos, tendo um contato com a rocha dentro de 50 cm de profundidade. Podem apresentar inúmeras variações de características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas a depender da natureza do material de origem (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022).

Figura 11 – Perfis de Neossolos.



Fonte: Araújo Filho, Silva e Marques (2022) e EMBRAPA (2024).

Por fim, os Nitossolos (figura 12) são solos argilosos ou muito argilosos com pouca variação na coloração e que se assemelham, em características de evolução pedogenética, profundidade e intemperismo, aos Latossolos. Uma característica que os difere dos Latossolos é a presença de um horizonte B nítico logo abaixo do horizonte A. Esse horizonte possui como algumas características a textura argilosa ou muito argilosa, estruturas bem desenvolvidas e a cerosidade expressiva, que trata de um aspecto lustroso e de brilho graxo na superfície dos agregados (Araújo Filho; Silva; Marques, 2022).

Figura 12 – Perfil de Nitossolo.



Fonte: EMBRAPA (2024).

Verifica-se a predominância dos solos das classes argissolo e latossolo, que somados correspondem a 62,6% da área total da RMR (tabela 01).

Tabela 1 - Classes de solo e unidades de mapeamento e área ocupada na Região Metropolitana do Recife - RMR.

UNIDADE DE MAPEAMENTO	ÁREA	
	Km ²	(%)
ARGISSOLO AMARELO	1.103,07	34,36
ARGISSOLO VERMELHO	481,65	15,00
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	80,69	2,51
ESPODOSSOLO HUMILÚVICO	36,93	1,15
GLEISSOLO HÁPLICO	273,06	8,50
LATOSSOLO AMARELO	344,51	10,73
NEOSSOLO LITÓLICO	19,78	0,62
NITOSSOLO VERMELHO	15,34	0,48
SOLOS INDISCRIMINADOS DE MANGUE	199,96	6,23
AFLORAMENTOS ROCHOSOS	6,60	0,21
ÁREA URBANA	488,50	15,21
ÁREA MILITAR	57,58	1,79
MASSA D'ÁGUA	103,03	3,21
TOTAL	3.210,69	100,00

Fonte: adaptado de Araújo Filho, Silva e Marques (2022).

3.4. MELHORAMENTO DE SOLOS PARA OBRAS DE ENGENHARIA

Solos com fração de finos representativas, podem ser considerados como solos problemáticos quando se objetiva seu uso como material de construção. Isso se deve por problemas apresentados quando da variação no teor de água no solo que acaba por condicionar redução em sua capacidade de suporte (Daraei, 2019).

Sob a aplicação de carregamento constante, é possível que solos coesivos atinjam o estado de fluência ao longo do tempo, principalmente quando a tensão de cisalhamento é iminente, tornando-os passíveis ao deslizamento. Desse modo, solos com fração de finos representativa são geralmente considerados como materiais não adequados para subleitos, fundações e taludes (Sharma, 2020).

Projetos de engenharia civil envolvendo solos com fração de finos representativa podem exigir a adoção de uma variedade de técnicas de melhoramento do solo, incluindo sua

estabilização. Esses processos são fundamentais para que se configurem ao solo condições suficientes de resistência para o seu emprego em obras de engenharia (Vijayan; Jose, 2022).

A estabilização de solos compreende a alteração das suas características físicas e/ou químicas para que este atinja valores pré-determinados, adequados ao desempenho em obras de engenharia (Al Bared; Harahap; Marto, 2018).

Soliz (2007) define a estabilização como sendo o processo de alteração de uma ou mais de uma propriedade do solo, de modo a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Ainda segundo a autora, o processo compreende um tratamento artificial, por um processo físico, químico ou físico-químico, que tem por objetivo tornar o solo estável para os limites de sua utilização, de maneira que a estabilização permaneça quando da solicitação de cargas exteriores e também sob ações de variações climáticas.

A estabilização de um solo pode ser alcançada com o uso de variados métodos e produtos que condicionam efeito distintos sobre as propriedades do solo.

São inúmeras as técnicas utilizadas, podendo ser citadas: i) a estabilização física, que consiste na alteração das propriedades do solo com modificações na textura, seja, misturando solos com diferentes frações granulométricas ou por meio de técnicas de compactação; ii) a estabilização química que faz uso de aditivos químicos onde há reação química do produto com os minerais do solo ou o preenchimento dos poros pela substância resultante da reação química do aditivo com a água, e; iii) eletrotécnicas cinéticas por meio da aplicação de uma corrente elétrica em eletrodos que são posteriormente inseridos no solo (Soliz, 2007; Al-Baidhani et al., 2020).

Devido aos altos custos gastos na estabilização de solos por processos convencionais, o interesse no uso de materiais residuais para este fim, sobretudo os resíduos cerâmicos, vem ganhando espaço e sendo discutido por diversos pesquisadores como alternativa para minimizar problemas ambientais e alcançar a sustentabilidade no que diz respeito a destinação adequada de resíduos (Al Bared; Harahap; Marto, 2018; Onakunle; Omole; Ogbiye, 2019; Deboucha; Mamoune; Yacine; Ziane, 2019; Voottipruex; Teerawattanasuk; Meepon, 2019; Lima Et Al., 2020; Saber; Iravanian, 2022).

O uso de matérias residuais, como técnica de melhoramento físico, não objetiva apenas o melhoramento das propriedades do solo, mas também propor uma alternativa para minimizar os problemas associados ao seu descarte.

De acordo com Al-Baidhani et al. (2020) melhorar as propriedades geotécnicas de solos problemáticos por meio da mistura com materiais residuais pode ser considerada uma solução

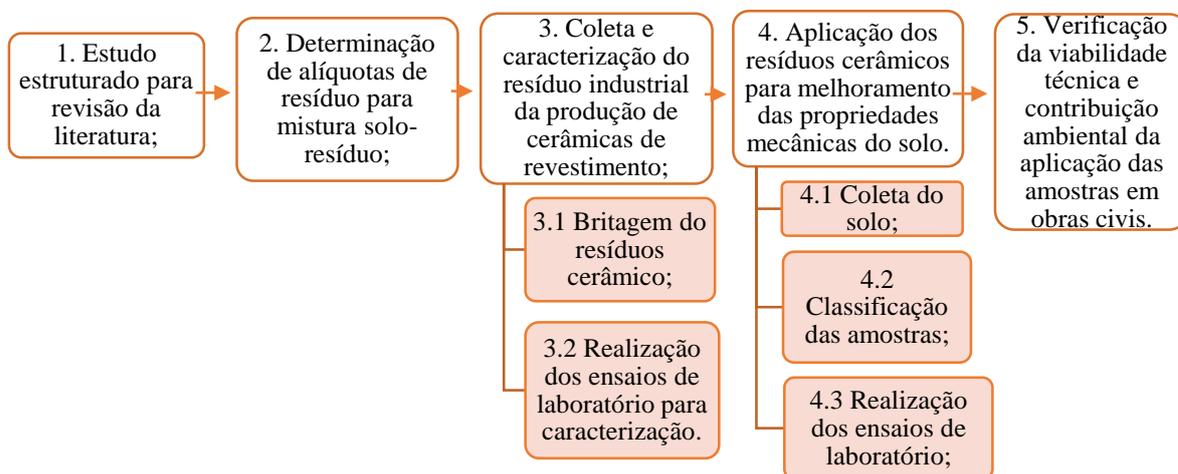
sustentável, e por esse motivo atenção especial deve ser dada pelos engenheiros geotécnicos à inclusão geoambiental do processo durante a aplicação de técnicas de estabilização de solos.

Dentre as melhorias associadas ao uso de resíduos cerâmicos na estabilização de solos finos são previstas o aumento da qualidade do solo com a redução dos movimentos de expansão e contração provocados pela variação de umidade, o aumento da resistência e durabilidade por meio de gradação mais adequada das partículas do solo, bem como, em se tratando de impactos ambientais positivos, o desenvolvimento da sustentabilidade no setor da construção civil (Saber; Iravanian, 2022).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa se caracteriza como uma pesquisa quali-quantitativa do tipo exploratória, pois pretende-se desenvolver diferentes aspectos relacionados ao fato estudado, de modo a possibilitar um maior conhecimento sobre o problema, viabilizando a formulação de hipóteses (Gil, 2019). A metodologia aplicada para o desenvolvimento desta pesquisa foi dividida em cinco etapas, conforme apresentado na figura 13.

Figura 13 - Fluxograma das etapas de metodologia aplicadas a pesquisa.



Fonte: a autora (2024).

4.1. ESTUDO ESTRUTURADO PARA REVISÃO DA LITERATURA

A seleção de artigos científicos para compor um portfólio de referências para pesquisa proposta, teve como ênfase a busca pelos temas relacionados com RCC e aproveitamento de resíduos industriais para melhoramento das características de um solo. Desse modo, partiu de

um estudo estruturado com base nas seguintes etapas: a) determinação dos critérios de inclusão e exclusão b) definição das bases de dados a serem utilizadas; c) determinação de palavras-chaves e operadores lógicos para busca dos artigos científicos; d) aplicação de filtros e eliminação de documentos duplicados; e) análise inicial dos títulos e resumos para refinamento da seleção, e; por fim, f) leitura dos artigos selecionados.

Sobre os critérios de inclusão foram definidas as bases de dados para buscas, sendo selecionadas a Web of Science e a Scopus, como também o tipo de documento, sendo estabelecida a coleta de artigos científicos. Nesta seleção também foi utilizado como critério de inclusão o ano de publicação, compreendendo documentos publicados nos últimos cinco anos a contar do ano anterior ao ano de previsão da defesa da dissertação (2023), excetuando-se as literaturas clássicas fundamentais ao desenvolvimento da pesquisa.

A Web of Science é uma base de dados desenvolvida pelo Instituto de Informação Científica (Institute for Scientific Information – ISI), que permite o acesso a trabalhos publicados nos mais importantes periódicos internacionais juntamente com as referências bibliográficas contidas nos mesmos, informando ainda, sobre os trabalhos que os citaram (USP,2024). Por outro lado, a base Scopus possui um arsenal de literatura científica abrangente, indexando mais de 91 milhões de registros, 27.950 títulos de série ativos e 292 mil livros, incluindo citações, desde 1996 (Elsevier, 2024).

Neste sentido, pelo arsenal de produções científicas que contemplam, as duas bases citadas foram escolhidas para esta pesquisa pela grande relevância de contribuição à coleta de dados bibliográficos.

Como critérios de exclusão foram definidos o idioma, restringindo as buscas a documentos em inglês e em português, e a disponibilidade de acesso aos documentos, sendo selecionados apenas aqueles disponibilizados na íntegra.

Definidos os critérios, a busca nessas bases de dados foi realizada a partir da definição de palavras-chaves, onde estas foram alocadas em dois grupos, o primeiro tratando da busca referente a artigos de pesquisas sobre os impactos ambientais causados pela produção de cerâmicas de revestimento e manejo inadequado dos RCC, e o segundo, sobre o aproveitamento de resíduos cerâmicos e RCC para a estabilização de solos. Os conectores lógicos utilizados nas buscas se detiveram ao or (ou) e o and (e).

Os artigos encontrados nas duas bases de dados foram analisados de modo a verificar importância para pesquisa, sendo eliminados aqueles que destoavam dos temas tratados e que se repetiam entre as bases de dados.

Nas tabelas 2 e 3 encontra-se um resumo das palavras-chave e conectores lógicos utilizados em cada base de dados, para cada tema específico, bem como o quantitativo de artigos encontrados e os selecionados como válidos a pesquisa:

Tabela 2 - Pesquisa Bibliográfica impactos ambientais causados pela produção de cerâmicas de revestimento e manejo inadequado dos RCC.

BASE DE DADOS	PALAVRAS-CHAVE e CONECTORES LÓGICOS	ARTIGOS ENCONTRADOS	ARTIGOS SELECIONADOS
WEB OF SCIENCE	"ceramic industry" and "environmental impact"	18	14
SCOPOS		47	12

Fonte: a autora (2023).

Tabela 3 - Pesquisa Bibliográfica aproveitamento de resíduos cerâmicos e RCC para a estabilização de solos.

BASE DE DADOS	PALAVRAS-CHAVE e CONECTORES LÓGICOS	ARTIGOS ENCONTRADOS	ARTIGOS SELECIONADOS
WEB OF SCIENCE	Soil or Clay soil or soil stabilization or clay soil stabilization and ceramic* waste	195	36
SCOPOS		30	11

Fonte: a autora (2023).

Após a obtenção dos artigos selecionados, foram feitas as leituras na íntegra para desenvolvimento da revisão de literatura e para busca e captação dos principais dados de cada pesquisa, os quais foram relevantes para a discussão com os resultados gerados neste estudo.

De forma complementar, foram ainda utilizados livros e capítulos de livros de referências clássicas e pertinentes a pesquisa, que incorporaram o portfólio de documentos selecionados para desenvolvimento do estudo.

4.2. DETERMINAÇÃO DE ALÍQUOTAS DE RESÍDUO INCORPORADAS PARA O MELHORAMENTO DO SOLO

A determinação das alíquotas foi realizada por meio da verificação de uma amostra de sete artigos, selecionados no espaço temporal de 2019 a 2022, que tratavam da utilização de resíduos no melhoramento de solos. Os artigos foram selecionados devido à similaridade do tema, do objetivo e da metodologia aplicada com os definidos para esta pesquisa.

Os estudos foram analisados com o intuito de verificar as alíquotas de resíduos utilizadas pelos autores, de modo a nortear e compor um referencial de limites inferior e superior já explorados. O quadro 1 apresenta as informações dos artigos selecionados, destacando o título

do artigo, os autores, o ano de publicação, o objetivo das pesquisas e as alíquotas de resíduos utilizadas.

Quadro 1 - Amostra de pesquisas para verificação das alíquotas de resíduo cerâmico utilizadas no melhoramento de solos.

TÍTULO	AUTORES	ANO DE PUBLICAÇÃO	OBJETIVO	ALÍQUOTAS UTILIZADAS
Stabilization of lateritic soil from Agbara Nigeria with ceramic waste dust	Olumuyiwa Onakunle, et al.	2019	Examinar as propriedades geotécnicas de um solo laterítico estabilizado com aditivo de pó de resíduo cerâmico	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%
Marginal Lateritic Soil Treated Using Ceramic Waste for Rural Road Application	Panich Voottipruex, Chairat Teerawattanasuk, e Ittipon Meepon	2019	Avaliar as propriedades físicas e de engenharia de solo laterítico melhorado com resíduo cerâmico	3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20%
Recycled Crushed Ceramic Rubble for Improving Highly Expansive Soil	Ali F. Al-Baidhani e Abbas J. Al-Taie	2020	Verificar a melhoria das propriedades geotécnicas e do comportamento de solos altamente expansivos usando resíduo cerâmico	10%, 20%, 30%, 40% e 50%.
Physical stabilization of a sandy lateritic soil using ceramic wastes	Jairo Salim Pinheiro de Lima, et al.	2020	Analisar a utilização de resíduos de cerâmica vermelha no processo de estabilização física de um solo laterítico arenoso	50% e 60%
Resilient modulus and deviatoric stress of cemented soils treated with crushed waste ceramics (CWC) for pavement subgrade construction	Kennedy Chibuzor Onyelowe, et al.	2020	Avaliar o efeito dos resíduos cerâmicos triturados nas tensões desviatórias e no módulo de resiliência dos solos tratados	10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110% e 120%
Using Waste Ceramic Dust in Stabilization of Clay Soils	Saya Abdullah Saber, Anoosheh Iravanian	2022	Melhorar a estabilização de três amostras de solo argiloso com diferentes porcentagens de pó cerâmico	5% e 10%
Study on engineering strength properties of ceramic waste powder stabilized expansive soil using machine learning algorithms	D. Sivabalaselvamani, et al.	2022	Estudar as propriedades de engenharia de solo expansivo com pó de resíduo cerâmico	5%, 10%, 15%, 20% e 25%

Fonte: a autora (2024).

A partir dessa análise foram determinadas as alíquotas de 20%, 40% e 60% para realização das misturas com o solo de referência, de modo a compreender amostras com potencial de fornecer resultados aplicáveis a cenários distintos quanto as características físicas e geomecânicas das misturas, possibilitando a determinação de usos variados em obras de engenharia.

Para maior facilidade de identificação das amostras foram definidos os termos, solo de referência, SN20%, SN40% e SN60% para identificar, respectivamente, o solo natural e as amostras contendo 20%, 40% e 60% de resíduo cerâmico misturado ao solo.

4.3. COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS DE REVESTIMENTO

A amostra de resíduos foi coletada *in loco* por meio de visitas à empresa concedente do material. Por se tratar de resíduos provenientes da fabricação de peças de cerâmica para revestimento, o material coletado apresentava uma composição homogênea.

Os materiais coletados encontravam-se alocados na área externa da empresa, onde apresentava-se fragmentados e empilhados a céu aberto (figura 14). Foram coletados em torno de 150kg de material, sendo acondicionados em recipientes plásticos com tampa e posteriormente transportados para armazenamento.

Figura 14 - Depósito de resíduos cerâmicos na empresa concedente.



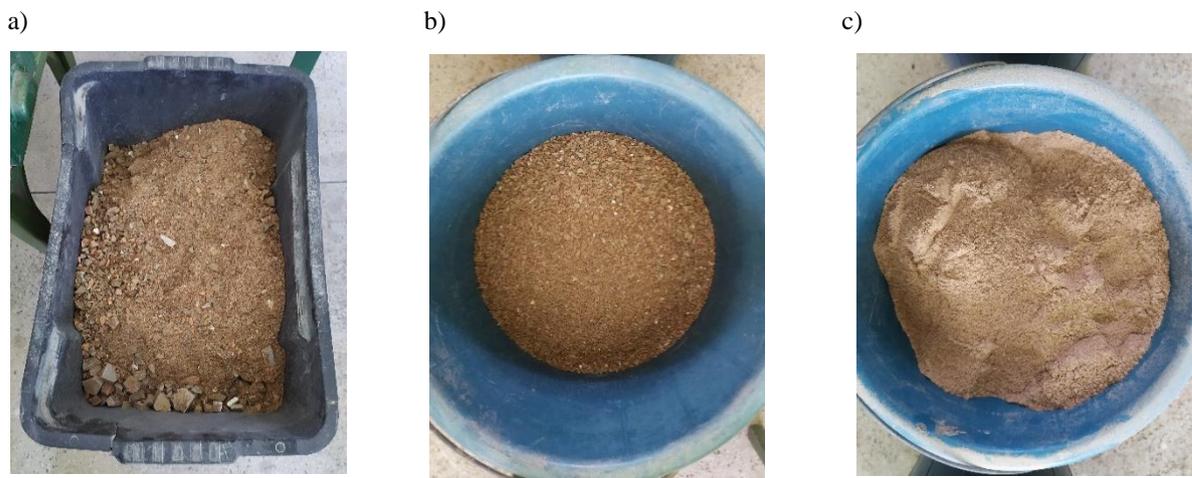
Fonte: a autora (2024).

Após a coleta e transporte, os resíduos cerâmicos foram armazenados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Campus Dois Irmãos. Em seguida, os resíduos passaram por secagem em estufa a 60°C e por processo de britagem no Laboratório de Minas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O processo de britagem foi realizado com o objetivo de reduzir a granulometria dos fragmentos do resíduo, de modo que os grãos atingissem diâmetro equivalente inferior a 2mm (figuras 15). A granulometria pretendida foi verificada realizando-se o peneiramento do material na peneira de nº10, que compreende malha com abertura de 2mm (figura 16).

Para o processo de britagem foram utilizados, em nível primário, um britador de mandíbula (figura 17a), e demais níveis, quantos foram necessários para atingir a granulometria estabelecida (secundário, terciário, etc.), um moinho de rolos (figura 17b).

A amostra resultante foi caracterizada a partir do ensaio de granulometria (NBR 7181/2016).

Figura 15 - Resíduo após processo de britagem – a) Britagem primária; b) Britagem secundária; c) Resíduo pronto para uso.



Fonte: a autora (2024).

Figura 16 - Peneiramento do resíduo para obtenção da granulometria.



Fonte: a autora (2024).

Figura 17 - a) Britador de mandíbula e b) Moinho de rolos.

a)



b)



Fonte: a autora (2024).

4.4. APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS PARA MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SOLO

Nesta etapa da pesquisa foi avaliado o emprego do resíduo industrial da produção de placas cerâmicas de revestimentos para melhoramento das características do solo, por meio da realização de ensaios de laboratório para a determinação das propriedades mecânicas do solo antes e após o melhoramento, seguindo os procedimentos abaixo:

4.4.1. Coleta de amostra de solo

A partir do levantamento bibliográfico, análise de mapas geológicos da RMR e pesquisas com setores da construção (órgãos públicos e empresas privadas) foi possível selecionar locais para coleta de amostras de solo que fossem representativas quanto às características geotécnicas do solo da RMR e que poderiam, após um melhoramento, ser utilizados em obras de engenharia.

As coletas foram realizadas a partir de visitas de campo na área selecionada, onde foram retiradas amostras deformadas (figura 18), para caracterização física dos solos e ensaios geomecânicos (quadro 2).

O solo foi concedido por uma empresa do ramo da construção civil da RMR, sendo proveniente de uma jazida localizada em Igarassu – PE. O solo foi selecionado por ser proveniente de uma jazida já explorada para uso em obras em geral, mostrando pertinência para o setor da construção na RMR, bem como, pela quantidade disponível do material atender aos valores necessários dimensionados para a pesquisa.

Foram coletados em torno de 800kg de solo na umidade natural, os quais foram ensacados e transportados para armazenamento no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Campus Dois Irmãos.

Figura 18 - Coleta de solo – a) e b) ensacamento do solo para transporte.



Fonte: a autora (2024).

4.4.2. Classificação do solo, resíduo e misturas

A Classificação do solo, resíduo e misturas foi feita a partir de dois sistemas para fins de comparação: o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS e o Sistema de Classificação do *Transportation Research Board* – TRB (Conselho de Pesquisa de Transporte).

O SUCS identifica os solos a partir das suas qualidades de textura e plasticidade, baseando-se nos dados da análise granulométrica, limite de liquidez e índice de plasticidade, agrupando os solos de acordo com seu comportamento.

Já o sistema de classificação TRB reúne os solos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo, tendo em foco a utilização em pavimentação (DNIT, 2016).

Para os valores de referência dos tamanhos de partículas (argila, silte, areia e pedregulho) foi utilizada a NBR 6502:1996 – versão corrigida: 2022 – Rochas e solos, e a norma internacional ASTM D422: *Standard test method for particle-size analysis of soils* (Método de teste padrão para análise granulométrica de solos), para fins de comparação com os resultados apresentados em artigos produzidos por autores estrangeiros.

4.4.3. Ensaio de laboratório

Foram realizados ensaios de caracterização física e de determinação dos parâmetros geomecânicos em amostras tanto do solo de referência quanto do solo após o processo de melhoramento, sendo avaliada a eficiência da técnica de melhoramento do solo com o emprego do resíduo cerâmico de placas de revestimento.

Os ensaios foram realizados em duplicata sendo estabelecida uma confiança de validação dos dados de 95%. Na ocorrência de pares de resultados que apresentaram confiança menor que o percentual estabelecido, foi realizada uma nova repetição do ensaio.

As amostras foram previamente preparadas de acordo com a NBR 6457/2016 - Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, realizando-se os procedimentos de homogeneização e quarteamo de modo a obter amostras representativas.

As figuras 19a e 19b apresentam as etapas do processo de homogeneização e quarteamo do solo de referência e do resíduo cerâmico britado, respectivamente. As etapas consistiram na mistura do montante coletado e posterior fracionamento deste em quatro partes, de modo a serem retiradas as partes opostas para novo processo de mistura, repetindo-se essas etapas até que se chegasse aos quantitativos representativos para realização dos ensaios de caracterização, resistência mecânica e deformação.

Figura 19 - Quarteamo e homogeneização a) solo; b) resíduo cerâmico.

a)



b)



Fonte: a autora (2024).

A caracterização geotécnica dos solos amostrados seguiu as normas específicas para caracterização de solos. Um resumo dos parâmetros determinados para a caracterização do solo está apresentado no quadro 2. Os ensaios descritos no quadro 2 foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação, do Departamento de Engenharia Civil da UFPE.

Quadro 2 - Determinações para caracterização física e mecânica do solo.

DETERMINAÇÕES	REFERÊNCIA (NORMA)
TEOR DE UMIDADE	NBR 6457:2016. Versão corrigida:2016
MASSA ESPECÍFICA DO GRÃO	DNER-ME 093/94
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	NBR 7181: 2016. Versão Corrigida 2: 2018
LIMITE DE PLASTICIDADE	NBR 7180/2016
LIMITE DE LIQUIDEZ	NBR 6459:2016. Versão Corrigida: 2017
COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	NBR 13292/2021
ENSAIO DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL	NBR 16853/2020
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	NBR 7182:2016 Versão Corrigida:2020
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA	NBR 12770:2022
ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	NBR 9895: 2016. Versão corrigida: 2017

Fonte: a autora (2024).

4.4.3.1. Ensaios de caracterização física

A caracterização física do solo foi realizada para a obtenção de parâmetros que determinam a natureza do solo e suas propriedades, possibilitando sua classificação. Desse modo, a análise granulométrica do solo, resíduo e misturas, que teve por objetivo a determinação das porcentagens por tamanho de partículas que compõe as amostras, foi realizada contemplando os métodos de sedimentação e de peneiramento (gráudo e miúdo) de acordo com a NBR 7181: 2016. versão corrigida 2: 2018.

Na figura 20a está ilustrada a preparação do solo com o dispersante para o ensaio de sedimentação. Na figura 20b a solução do solo mais dispersante e água preparada para as leituras com o densímetro. E as figuras 20c e 20d ilustram o processo de peneiramento e retenção das frações gráuda e miúda do solo respectivamente.

Figura 20 - Análise granulométrica das amostras: a) amostras na solução dispersante; b) sedimentação; c) peneiramento gráudo, e; d) peneiramento miúdo.

a)



b)



c)



d)

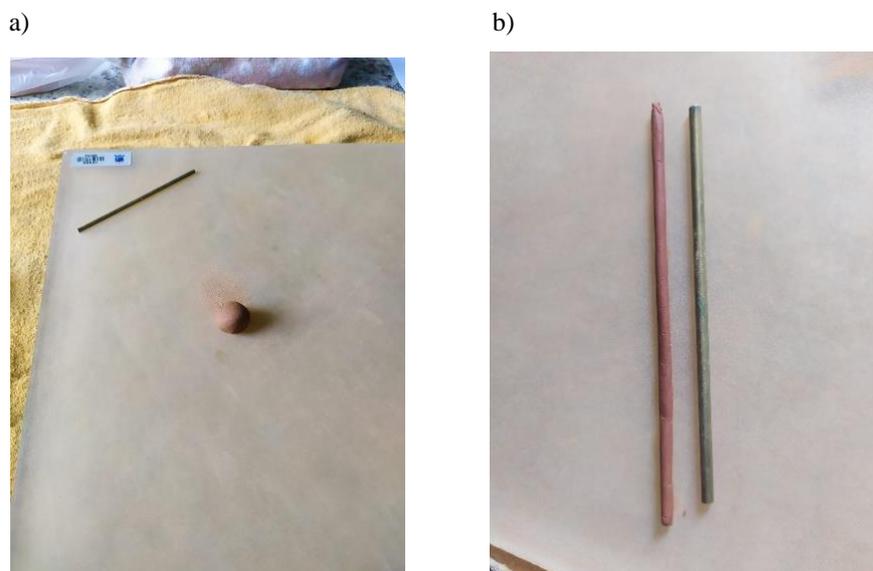


Fonte: a atora (2024).

Os limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade) e índice de plasticidade auxiliam na determinação da classificação do solo e suas propriedades. O ensaio de limite de plasticidade foi realizado para determinação do limite entre o estado plástico e o estado semi-sólido do solo, sendo verificado por meio da obtenção do valor do teor de umidade em que um bastão de medidas padronizadas, moldado manualmente, apresenta fissuras. Já o ensaio de limite de liquidez foi realizado para determinação do limite entre o estado plástico e o estado líquido do solo, sendo verificado por meio da obtenção do teor de umidade em que, no aparelho de Casagrande, com altura de queda e velocidade de golpeamento padronizadas, uma fissura realizada em uma massa de solo úmida se fechasse ao serem aplicados 25 golpes, seguindo o que prescrevem as normas NBR 7180/2016 e NBR 6459:2016. Versão Corrigida: 2017.

A figura 21a demonstra os materiais utilizados para execução do ensaio de plasticidade, compreendendo a porção de solo, a placa de vidro de superfície esmerilhada e o gabarito cilíndrico para comparação. Na figura 21b tem-se o bastão moldado e fissurado com as dimensões padrões estabelecidos, o qual foi colocado em estufa por 24 horas para verificação do teor de umidade.

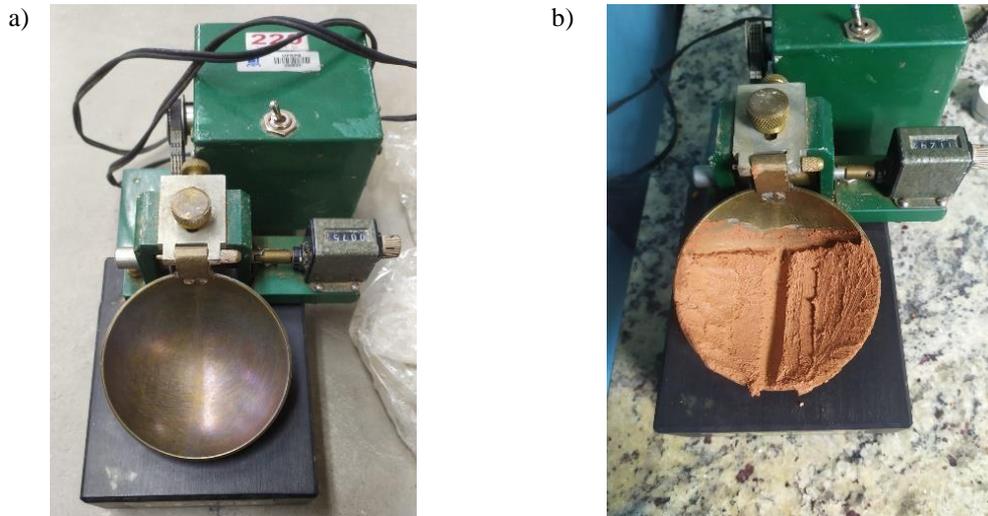
Figura 21 – Ensaio de Limite de plasticidade: a) material utilizado no ensaio de limite de plasticidade; b) bastão moldado fissurado comparado ao gabarito padrão.



Fonte: a autora (2024).

Na figura 22a verifica-se o aparelho de Casagrande e na figura 22b a massa de solo moldada para realização do ensaio de onde foi retirada a amostra para verificação do teor de umidade.

Figura 22 – Ensaio de Limite de liquidez: a) aparelho de Casagrande e b) amostra de solo moldada para realização do ensaio.

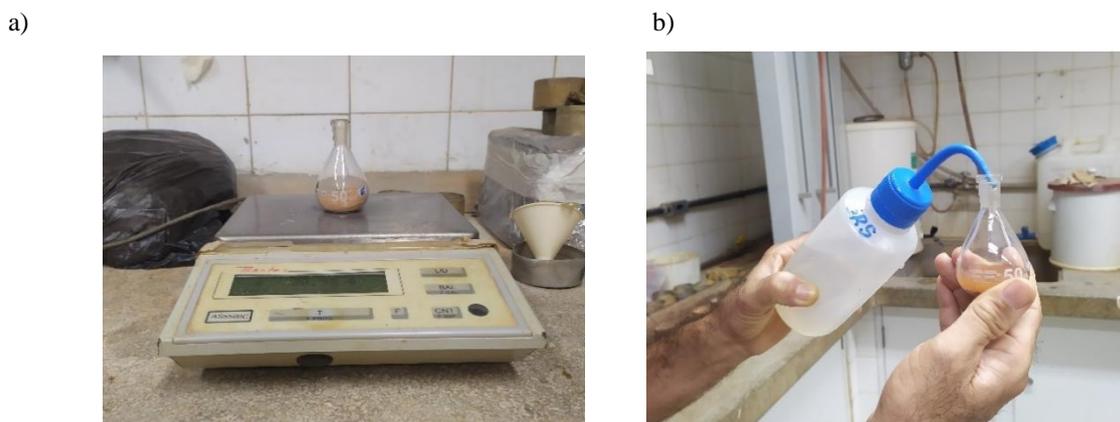


Fonte: a autora (2024).

A massa específica real do grão para o solo, resíduo e amostras, foi verificado por meio do uso de um picnômetro, considerando, para fins de cálculo, os valores de massa obtidos do picnômetro vazio, do picnômetro mais a amostra e do aparelho mais a amostra e água, até o preenchimento total do seu volume, chegando-se aos dados necessários para seguir com o procedimento descrito na norma citada no quadro 2, DNER-ME 093/94.

A figura 23 ilustra o procedimento de realização do ensaio de massa específica do grão. Na figura 23a vê-se o picnômetro já contendo a amostra de solo e sendo pesado; na figura 23b o picnômetro é preenchido com água destilada até metade do seu volume; na figura 23c o picnômetro é acoplado a uma bomba de vácuo para eliminação da porção de ar da amostra e, por fim; na figura 23d o picnômetro é preenchido até seu volume total e pesado novamente.

Figura 23 - Ensaio de massa específica real do grão: a) pesagem do picnômetro mais o solo; b) acréscimo de água ao conjunto picnômetro-solo; c) acoplamento do picnômetro a bomba de vácuo; d) pesagem do conjunto picnômetro-solo-água.



c)



d)



Fonte: a autora (2024).

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro físico que indica as características de percolação de fluídos no solo, ou seja, a maior ou menor facilidade que os solos apresentam para passagem desses fluídos. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade foi utilizado um permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE e foram seguidas as orientações prescritas na NBR 13292/2021.

A montagem dos corpos de prova que foram utilizados nos ensaios foi realizada verificando-se inicialmente a umidade do solo e misturas, retirando-se uma porção das amostras e mantendo-as em estufa por 24 horas. Após isso, foi feita a correção da umidade atual para a umidade ótima, obtida no ensaio de compactação, realizando-se então o processo de moldagem dos corpos de prova de modo a atingir os valores de densidade máxima, dados também obtidos no ensaio de compactação.

A figura 24a demonstra o permeâmetro Tri-flex 2 da Soil Test utilizado. A figura 24b mostra o corpo de prova sendo instalado no permeâmetro e conectado as mangueiras de alimentação de água. Na figura 24c pode-se ver o corpo de prova envolvido por uma membrana impermeável, necessária para que não haja percolação lateral da água. E na figura 24d vê-se o corpo de prova preparado na câmara de teste pronto para realização do ensaio.

Figura 24 - Ensaio de permeabilidade: a) permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2; b) corpo de prova sendo instalado no permeâmetro; c) corpo de prova envolvido por membrana impermeável; d) corpo de prova submerso em câmara.

a)



b)



c)



d)



Fonte: a autora (2024).

4.4.3.2. Ensaios de caracterização geomecânica

A caracterização geomecânica possibilitou a obtenção de parâmetros de resistência e deformação, que auxiliaram no conhecimento do comportamento do solo quando da solicitação por cargas. O conhecimento desses índices é fundamental para a avaliação e o dimensionamento de obras de engenharia.

O ensaio de compactação (figura 25) foi realizado com o objetivo de determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo e misturas, sendo realizado sob energia de compactação normal, seguindo ao prescrito na NBR 7182:2016 Versão

Corrigida:2020. Ao final do ensaio obteve-se os valores referentes a umidade ótica e densidade máxima para energia de compactação normal do solo e misturas.

Os dados obtidos no ensaio de compactação foram empregados para a moldagem dos corpos de prova necessários para realização dos ensaios de coeficiente de permeabilidade, adensamento unidimensional e Índice de Suporte Califórnia.

Figura 25 - Ensaio de compactação: a) materiais utilizados; b) corpo de prova sendo desmoldado; c) corpo de prova desmoldado; d) retirada de amostras para verificação da umidade.

a)



b)



c)



d)

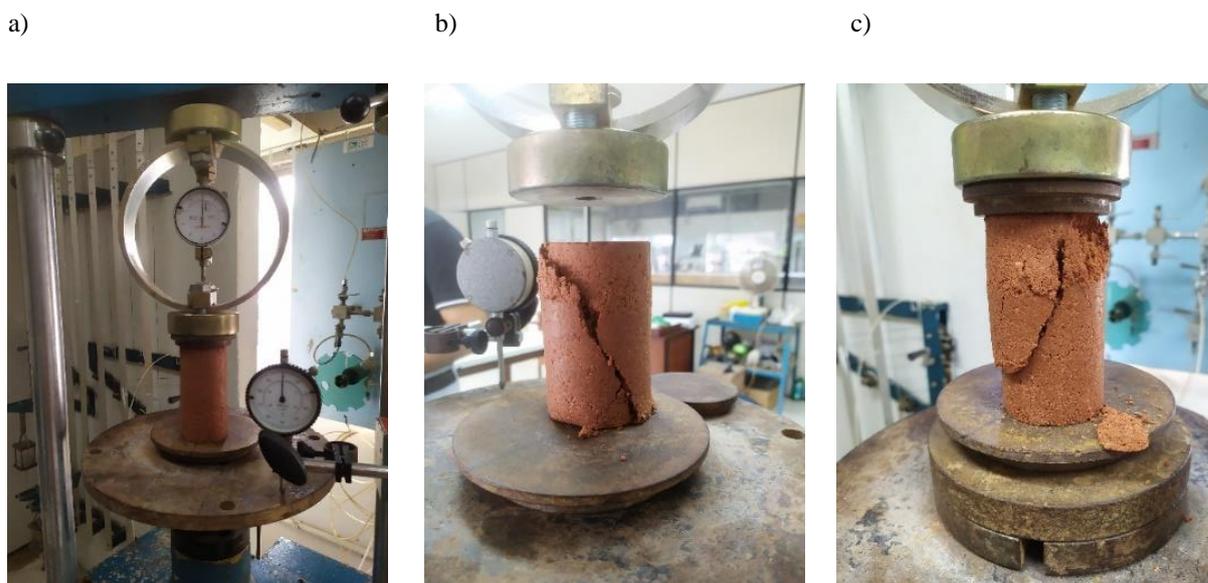


Fonte: a autora (2024).

O ensaio de resistência a compressão simples (figura 26) foi realizado para determinação da resistência à compressão, não confinada, de corpos de prova representativos do solo de referência e misturas, por meio da aplicação de carga axial e controle da deformação, conforme prescreve NBR 12770:2022. Foram utilizados moldes cilíndricos de dimensões de

10cm de altura e 5cm de diâmetro para confecção dos corpos de prova, uma célula de carga conjunta a um relógio comparador (extensômetro) utilizado para realização da leitura da carga aplicada e uma prensa.

Figura 26 - Ensaio de compressão simples: a) montagem do corpo de prova na prensa com anel de carga e relógio comparador (extensômetros); b) e c) perfis de ruptura de corpos de prova.



Fonte: a autora (2024).

O ensaio de adensamento unidimensional foi realizado para determinação das propriedades de adensamento do solo e misturas, especificamente, nessa pesquisa, para verificação do comportamento das amostras quanto a deformação volumétrica quando confinadas lateralmente e axialmente, carregadas e drenadas, seguindo as orientações prescritas pela NBR 16853/2020.

A aplicação de cada uma das cargas especificadas em norma foi realizada em um tempo máximo de 4h. Para isso, foi verificada, durante o processo do ensaio, a estabilização do comportamento de deformação do solo por meio do gráfico de tensão x deformação para cada uma das cargas aplicadas. A estabilização das amostras foi ainda constatada avaliando a diferença entre a penúltima e a última medição dividida pela diferença entre a primeira e a última medição de deformação, quando a mesma apresentou valor menor que 5%.

A demonstração da realização do ensaio pode ser vista na figura 27. Na figura 27a pode-se observar o corpo de prova elaborado nas condições de umidade ótima e densidade máxima que foi utilizado para moldagem dos anéis de adensamento. A figura 27b demonstra a moldagem

dos anéis de adensamento. A figura 27c ilustra a montagem da célula de carga. E, por fim, a figura 27d mostra a prensa de adensamento durante a execução do ensaio.

Figura 27 - Ensaio de adensamento unidimensional: a) corpo de prova para moldagem do solo nos anéis de adensamento; b) moldagem do solo nos anéis de adensamento; c) montagem de células de carga; d) prensas de adensamento.

a)



b)



c)



d)



Fonte: a autora (2024).

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi realizado com o objetivo de obter parâmetros quanto a qualidade do solo e das misturas para o emprego em elementos de pavimentação (base e sub-base).

O ensaio consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para penetração de um pistão em um corpo de prova da amostra estudada e a pressão necessária a penetração desse pistão numa brita padrão (DNIT, 2016).

Para esta pesquisa o ensaio foi realizado na condição de inundação para que se obtivesse resultados expressivos quanto a pior condição possível de resistência do solo e seguiu as orientações prescritas na NBR 9895: 2016. Versão corrigida: 2017.

A figura 28 ilustra o processo de execução do ensaio. Na figura 28a tem-se os corpos de prova durante o processo de inundação, acoplados a um extensômetro para verificação de possíveis expansões. A figura 28b mostra os corpos de prova após o processo de inundação sendo preparados para a instalação na prensa. A figura 28c mostra o corpo de prova sobre carregamento para leitura das tensões. E, por fim, a figura 28d mostra o corpo de prova após a finalização do ensaio.

Figura 28 - ensaio de Índice de Suporte Califórnia: a) inundação dos corpos de prova; b) corpos de prova após 04 dias inundados; c) corpo de prova fixado a prensa juntamente com anel de carga e relógio comparador (extensômetro); d) corpo de prova após ensaio.

a)



b)



c)



d)



Fonte: a autora (2024).

4.5. VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE TÉCNICA E DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL DO USO DAS AMOSTRAS EM OBRAS DE ENGENHARIA

A partir dos resultados alcançados com o procedimento experimental, foi possível avaliar a melhoria das características do solo, com base nos dados obtidos antes e após o uso dos resíduos cerâmicos de placas de revestimento, verificando o efeito nas propriedades geomecânicas dos solos, como deformação e resistência. Em seguida, foi verificada a aplicabilidade do solo melhorado com resíduos cerâmicos de placas de revestimento em obras de engenharia comparando os resultados obtidos com os parâmetros normatizados exigidos para as atividades de construção civil propostas. Foi ainda verificada a contribuição ambiental com o uso das amostras, analisando o potencial de redução de impactos ambientais negativos a partir da aplicação dos resíduos cerâmicos em novos processos de engenharia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

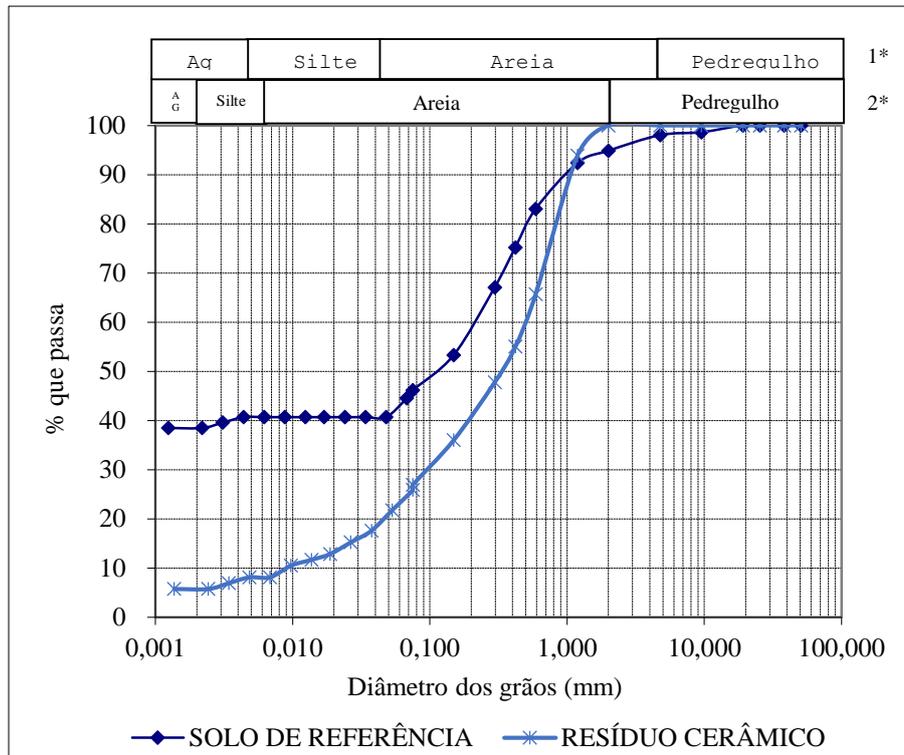
O presente capítulo apresenta os resultados obtidos na caracterização física do solo e das misturas com os resíduos cerâmicos, bem como os resultados dos ensaios geomecânicos. Apresenta ainda a análise da viabilidade técnica e ambiental do uso das misturas na estabilização de solos para aplicação em obras de engenharia civil.

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO, RESÍDUO CERÂMICO E MISTURAS

A partir do ensaio da análise granulométrica foi possível verificar a distribuição por tamanho de grãos do solo, do resíduo cerâmico e das misturas, utilizando como referência as dimensões de tamanho de grãos especificadas pela NBR 6502:1996 – versão corrigida: 2022 - Solos e Rochas, e pela norma internacional ASTM D 422 - *Standard test method for particle-size analysis of soils* (Método de teste padrão para análise granulométrica de solos), para fins de comparação.

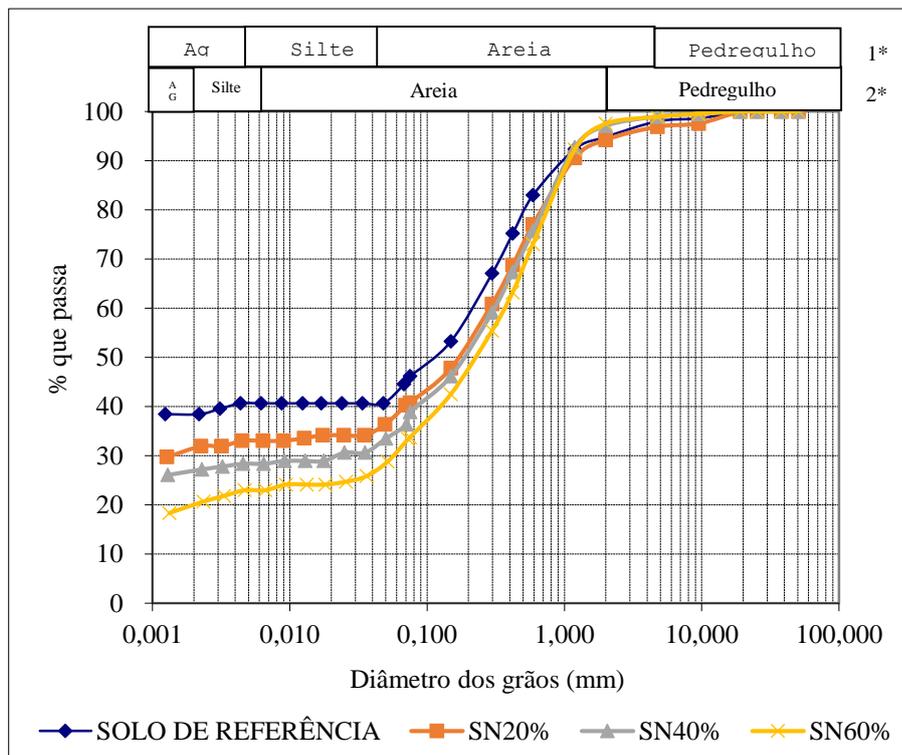
A figura 29 apresenta a curva granulométrica do resíduo cerâmico em comparação ao solo de referência; enquanto a figura 30 apresenta a curva granulométrica das misturas em comparação ao solo de referência. É possível perceber um deslocamento para baixo quando comparada a curva granulométrica do resíduo com a do solo de referência, indicando a diminuição de partículas finas (silte e argila) e aumento da fração areia na composição do resíduo cerâmico.

Figura 29 – Curvas granulométricas - solo de referência e resíduo cerâmico (1* ASTM D 422:2007; 2* NBR 6502:2022).



Fonte: a autora (2024).

Figura 30 - Curvas granulométricas – solo de referência e das misturas (1* ASTM D 422:2007; 2* NBR 6502:2022).



Fonte: a autora (2024).

Com relação a comparação entre a curva do solo de referência e as curvas das misturas, percebe-se um deslocamento gradativo das curvas para baixo, indicando que à medida que se aumentou o percentual de resíduo cerâmico no solo de referência foi diminuída a quantidade de partículas finas presentes na amostra bem como aumentada a fração de areia, considerando as alíquotas definidas para essa pesquisa.

Nas tabelas 4 e 5 estão apresentadas as composições granulométricas do solo de referência e das amostras SN20%, SN40% e SN60%, conforme tamanho das partículas especificadas pela NBR 6502:1996 – versão corrigida: 2022 e pela ASTM D 422:2007.

Tabela 4 - Composição granulométrica das amostras (NBR 6502:2022).

AMOSTRA	PORCENTAGEM DE PARTÍCULAS			
	ARGILA	SILTE	AREIA	PEDREGULHO
RESÍDUO	5,74%	2,37%	91,89%	0,00%
SOLO DE REFERÊNCIA	38,45%	2,20%	54,18%	5,17%
SN20%	31,94%	1,10%	61,20%	5,76%
SN40%	27,21%	1,15%	68,72%	2,92%
SN60%	20,63%	2,32%	74,54%	2,51%

Fonte: a autora (2024).

Tabela 5 - Composição granulométrica das amostras (ASTM D 422/2007).

AMOSTRA	PORCENTAGEM DE PARTÍCULAS			
	ARGILA	SILTE	AREIA	PEDREGULHO
RESÍDUO	8,11%	13,63%	78,26%	0,00%
SOLO DE REFERÊNCIA	40,65%	0,00%	57,36%	1,99%
SN20%	33,04%	3,20%	60,54%	3,10%
SN40%	28,35%	5,14%	65,46%	1,05%
SN60%	22,95%	5,78%	70,17%	1,10%

Fonte: a autora (2024).

Os dados demonstrados nas tabelas 4 e 5 atestam a redução da porcentagem de argila e o aumento da fração areia a partir da incorporação das frações de resíduo cerâmico no solo, indicando que houve mudanças na composição granulométrica do solo estudado, considerando o acréscimo de resíduo cerâmico nas alíquotas definidas para essa pesquisa.

Comportamento semelhante foi percebido por Silva, Fucale e Ferreira (2019), que estudaram o efeito da adição de resíduos da construção civil nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso fazendo uso de alíquotas de RCC nas proporções de 10%, 20% e 30%. Os autores perceberam que a incorporação do agregado de RCC reduziu as frações de silte e argila do solo, no entanto exercendo maior influência na fração de areia, aumentando-a.

Quanto a massa específica real do grão (γ), foi verificado um decréscimo, no entanto pouco significativo, nos valores apresentados à medida que foi acrescentado o resíduo cerâmico

ao solo. Sendo assim, o solo em seu estado natural apresentou o maior valor de massa específica real do grão, a amostra SN60% o menor valor entre as misturas e o resíduo cerâmico puro o menor valor geral, conforme pode ser visto na tabela 6:

Tabela 6 - Massa específica real do grão para o solo, misturas e resíduo cerâmico.

AMOSTRA	γ (g/cm ³)
SOLO DE REFERÊNCIA	2,656
SN20%	2,604
SN40%	2,591
SN60%	2,548
RESÍDUO	2,532

Fonte: a autora (2024).

Silva, Fucale e Ferreira (2019), ainda em sua pesquisa sobre o efeito da adição de resíduos da construção civil nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso, verificaram comportamento semelhante. Os autores constataram diminuição nos valores da massa específica dos grãos, no entanto considerada insignificante tendo em vista que a densidade do agregado reciclado ser próxima a do solo, ficando a massa específica real do grão das amostras com valores entre 2,66 g/cm³ e 2,64 g/cm³.

Em se tratando dos limites de consistência (limite de liquidez - LL, limite de plasticidade - LP) e índice de plasticidade - IP os valores obtidos por meio dos ensaios laboratoriais para o solo de referência, o resíduo cerâmico e as misturas seguem apresentados na tabela 7, bem como, a classificação do tipo de solo em relação ao índice de plasticidade, conforme Caputo (1988) (quadro 3).

Tanto o LL como o LP apresentaram redução ao serem comparados os valores obtidos para o solo de referência e para cada uma das misturas. Entre si, as misturas também apresentaram redução nos valores de LL e LP, à medida que foi aumentado o percentual de resíduo cerâmico acrescentado ao solo.

Tabela 7 - Limites de Atteberg do resíduo, solo de referência e misturas.

AMOSTRA	LL	LP	IP	CLASSIFICAÇÃO
RESÍDUO	0	0	0	Não plástico; não líquido
SOLO DE REFERÊNCIA	38,5%	21,49%	17,02	Altamente plástico
SN20%	37,5%	19,7%	17,8	Altamente plástico
SN40%	30%	17%	13,63	Medianamente plástico
SN60%	26%	16%	9,66	Medianamente plástico

Fonte: a autora (2024).

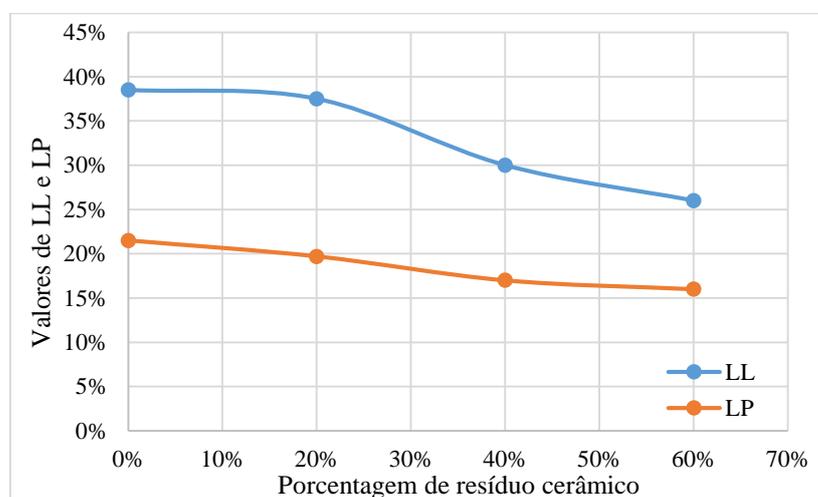
Quadro 3 - Classificação do solo segundo o índice de plasticidade.

IP	CLASSIFICAÇÃO
$1 < IP < 7$	Fracamente plásticos
$7 < IP < 15$	Medianamente plásticos
$IP > 15$	Altamente plásticos

Fonte: adaptado Caputo (1988).

A figura 31 apresenta a tendência de decrescimento dos limites de consistência à medida que foi aumentada a alíquota de resíduo cerâmico acrescentada ao solo.

Figura 31 - Variação dos valores do LL e LP para o solo de referência e para as misturas.



Fonte: a autora (2024)

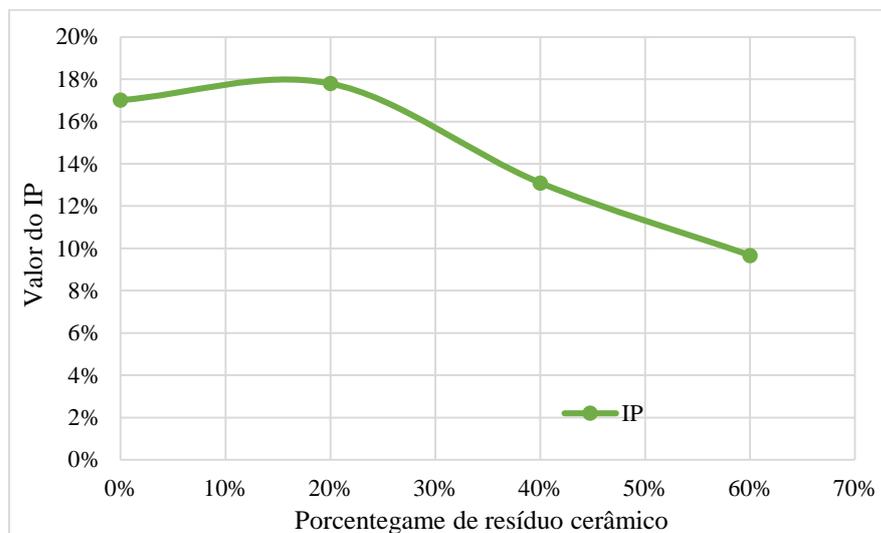
A níveis percentuais, em comparação ao solo de referência, houve redução de 2,6% no LL e 16% no LP na amostra SN20%; 22,08% no LL e 20,9% no LP na amostra SN40%, e; 32,47% no LL e 25,55% no LP na amostra SN60%.

Quanto ao IP, não houve alteração significativa entre as amostras de solo de referência e a SN20%, conforme apresentado na figura 32, resultando na classificação de solo altamente plástico para ambas amostras. Já para as amostras SN40% e SN60% houve redução significativa no IP, quando comparadas ao solo de referência, também apresentado na figura 32, o que resultou em mudança na classificação, sendo as amostras especificadas como medianamente plásticas.

Atribui-se a redução dos valores de limite de liquidez e plasticidade das misturas, em comparação ao solo de referência e entre si, à redução do percentual dos finos no solo e aumento das partículas de areia, além disso, ao fato de que o resíduo cerâmico utilizado constitui um

material não plástico e não líquido, contribuindo com a mudança de comportamento em relação aos limites de consistência das amostras. Com a diminuição do percentual de finos no solo e consequente aumento da fração areia, outro fator de influência considerado é a diminuição da superfície específica das amostras. Solos de textura arenosa tendem a possuir menor superfície específica, sendo consequentemente menor sua retenção de água (Basso; Soares, 2011), acabando por influenciar (ou diminuir) o comportamento plástico e líquido do solo.

Figura 32 - Índice de plasticidade do solo de referência e misturas.



Fonte: a autora (2024)

O mesmo comportamento, quanto aos limites de consistência, foi constatado por Rathore e Tiwari (2023) que avaliaram efeito da adição de várias porcentagens de resíduo cerâmico (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%) nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso. Os autores verificaram que os valores de LL e LP reduziram de 38% e 22% para 23% e 14% comparados o solo utilizado e a mistura com 30% de resíduo, e atribuíram esse comportamento a substituição de partículas de argila expansiva do solo, por partículas não expansiva do resíduo cerâmico.

Onankule, Omole e Ogibiye (2019) também constataram resultados semelhantes. Os autores desenvolveram um estudo sobre estabilização de um solo laterítico de Agbara - Nigéria com resíduos cerâmicos, variando proporções de 5% a 30%, com incrementos de 5%.

Foi verificado neste estudo a redução progressiva nos valores de LL e LP à medida que foram acrescentadas maiores proporções do resíduo cerâmico ao solo. Ao comparar o solo utilizado com a mistura de 30% de resíduo, os autores chegaram aos resultados de redução do LP de 41,11% para 23,31% e para o LL de 59,61% para 35,62%.

A redução nos valores de LL e LP foi justificada por Onankule, Omole e Ogibiye (2019) pela presença de óxido de cálcio (CaO) no resíduo cerâmico, que acaba por reagir com as partículas de água do solo laterítico, diminuindo seu teor de água e formando argamassa (Ca(OH)₂), que é um material resistente.

A partir dos resultados obtidos com a caracterização física dos solos foi possível realizar a classificação do solo de referência e das misturas com base no Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS e no Sistema de Classificação do *Transportation Research Board – TRB* (Conselho de Pesquisa de Transporte). A classificação do solo, resíduo e amostras é apresentada no quadro 4.

Quadro 4 - Classificação SUCS e TRB.

AMOSTRA	SUCS	TRB
RESÍDUO	Areia (S)	A-2-4 Pedregulho e Areia siltosa ou argilosa
SOLO DE REFERÊNCIA	Areia argilosa (SC)	A-6 Solo argiloso
SN20%	Areia argilosa (SC)	A-6 Solo argiloso
SN40%	Areia argilosa (SC)	A-6 Solo argiloso
SN60%	Areia argilosa (SC)	A-2-4 Areia e Areia siltosa ou argilosa

Fonte: a autora (2024).

O resíduo cerâmico tanto no SUCS como no sistema TRB foi classificado como areia, podendo no sistema TRB ser incluído como areia siltosa ou argilosa, grupo A-2-4, apresentando índice de grupo igual zero. Dentro dessas características o TRB define que o resíduo cerâmico se enquadra no grupo de materiais excelentes a bons para o uso como camada de subleito.

Para as demais amostras, no SUCS, como apresentado no quadro 04, não houve mudança de classificação, apesar das alterações nas características de textura e plasticidade do solo, fatores de influência para classificação no sistema em questão.

Para o sistema TRB, as amostras solo de referência, SN20%, SN40% mantiveram a mesma classificação, conforme expresso no quadro 4, sendo considerados do grupo A-6 e identificadas como material não adequado quando da intenção de uso em camadas de subleito, apresentando índices de grupo respectivamente de 3,79, 3,19 e 1,08. No entanto, para a amostra SN60% houve mudança de classificação, equiparando-se ao resíduo cerâmico puro e sendo classificada como do grupo A-2-4, configurando, também, um material excelente a bom quando do uso em camadas de subleito. O índice de grupo para a amostra SN60% equiparou-se ao resíduo cerâmico, sendo igual a zero.

Em relação ao coeficiente de permeabilidade das amostras, o solo de referência apresentou coeficiente de permeabilidade na ordem de grandeza de 10^{-6} cm/s. Com relação as amostras SN40% e SN60% houve um aumento significativo no coeficiente de permeabilidade, passando a ser da ordem de 10^{-5} cm/s, conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Coeficiente de permeabilidade do solo de referência e misturas.

AMOSTRA	K (cm/s)
SOLO DE REFERÊNCIA	$3,605 \times 10^{-6}$
SN20%	$1,89 \times 10^{-7}$
SN40%	$1,49 \times 10^{-5}$
SN60%	$5,08 \times 10^{-5}$

Fonte: a autora (2024).

Com base nos resultados apresentados, é provável que o aumento no valor do coeficiente de permeabilidade, para as amostras de SN40% e SN60%, tenha ocorrido devido ao arranjo dos grãos graúdos, que substituíram grande parte das partículas mais finas (silte e argila), favorecer a formação de grandes poros de modo a facilitar a percolação da água. Além disso, este aumento do coeficiente de permeabilidade também pode ter sido influenciado pela diminuição da absorção de água pelo resíduo cerâmico, devido ao material, em seu processo de fabricação, ter sofrido sinterização. No caso da amostra SN20%, verificou-se uma diminuição do coeficiente de permeabilidade comparada com o valor do solo de referência em dez vezes, passando a ser da ordem de grandeza de 10^{-7} cm/s. É possível que tal comportamento tenha ocorrido devido a reestruturação dos grão do solo durante a compactação para moldagem do corpo de prova, diminuindo os caminhos preferências para condução da água.

Silva, Fucale e Ferreira (2019), ainda em seu estudo sobre o efeito da adição de resíduos da construção civil nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso, verificaram que a adição do RCC proporcionou ganho no coeficiente de permeabilidade do solo estudado em todas as alíquotas utilizadas (10%, 20% e 30% de resíduo cerâmico). Para a alíquota de 10% o coeficiente de permeabilidade passou de 10^{-9} cm/s no solo de referência para 10^{-8} cm/s e para a alíquotas de 20% e 30% passou para 10^{-7} cm/s. Os autores atribuem esse comportamento, provavelmente, a facilitação na redução da pressão neutra no solo pelo acréscimo do RCC. Além disso, destacam que há o aumento das floculações e grumos formados nas misturas, que propiciam caminhos preferenciais de percolação influenciando no aumento da permeabilidade.

Sharma (2020), que realizou um estudo experimental para avaliar a eficiência do uso de cinzas volantes e resíduos de cerâmica para estabilização de solo argiloso, com alíquotas de

resíduo cerâmico variando de 2% a 8%, verificou aumento progressivo do coeficiente de permeabilidade com a incorporação do resíduo ao solo. Os valores do coeficiente de permeabilidade passaram da ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s no solo argiloso para 10^{-4} cm/s com a incorporação do resíduo. Os autores atribuem a mudança no parâmetro ao aumento de partículas de maior graduação no solo, que acabam por facilitar a percolação da água.

5.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO E MISTURAS

5.2.1. Compactação

No ensaio de compactação foram verificados os valores de umidade ótima (h ótima) e massa específica aparente seca máxima (δ máx.), na energia normal, para o solo de referência e as misturas. Os resultados obtidos estão expressos na tabela 9.

Tabela 9 - Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima solo de referência e misturas.

AMOSTRA	h ótima (%)	δ máx (g/cm ³)
SOLO DE REFERÊNCIA	15,96	1,77
SN20%	15,30	1,80
SN40%	13,75	1,80
SN60%	14,04	1,79

Fonte: a autora (2024).

Conforme pode ser observado na figura 33, constatou-se que à medida que a alíquota de resíduo cerâmico acrescentada foi maior a umidade ótima diminuiu, até certo ponto. Este comportamento é percebido pelo deslocamento das curvas de compactação das misturas para a esquerda, em comparação a curva de compactação do solo de referência.

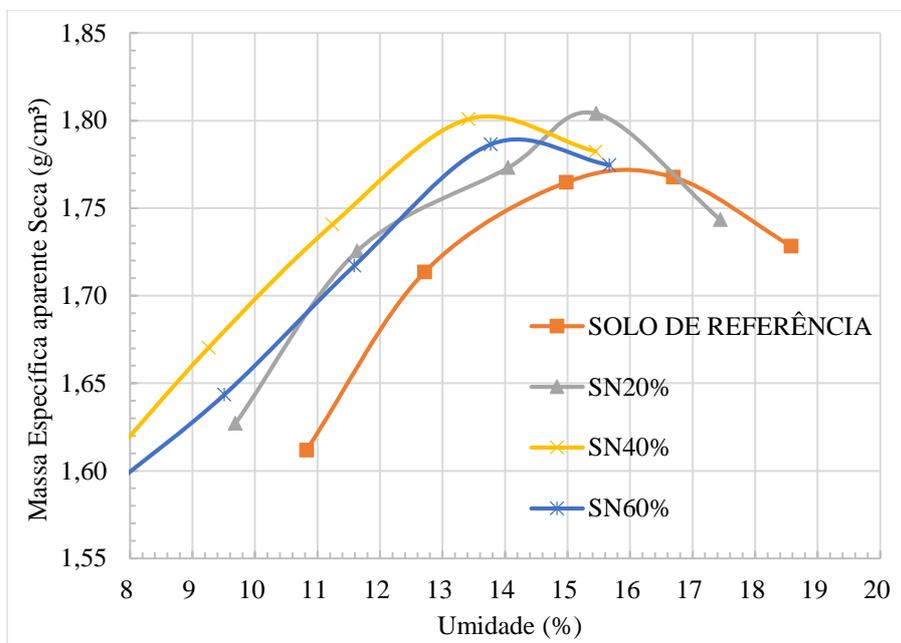
Entre as amostras de solo de referência, SN20% e SN40% o comportamento de queda no valor da h ótima foi mantido, no entanto, entre as amostras SN40% e SN60% houve um sutil aumento do parâmetro. Tais variações consistiram em reduções percentuais dos valores de h ótima entre 0,29% e 2,21%, quando comparados com o solo de referência.

Os resultados alcançados sugeriram que a quantidade ideal de água necessária para alcançar a máxima densidade do solo diminuiu com a adição moderada de resíduo cerâmico, conforme observado na mistura com adição de 40%, indicando uma melhoria nas propriedades de compactação do solo.

Com relação a δ máx., percebeu-se um aumento quando comparadas as amostras de solo de referência e SN20%, sendo os valores, respectivamente de 1,77 g/cm³ e 1,80 g/cm³, como é possível verificar na figura 33. Esse comportamento é percebido pelo deslocamento para cima

da curva de compactação da amostra em comparação a curva de compactação do solo de referência.

Figura 33 - Curvas de compactação do solo de referência e misturas.



Fonte: a autora (2024).

Entre as amostras SN20% e SN40%, não houve variação significativa da δ máx. No entanto, entre as amostras SN40% e SN60% houve uma pequena redução no valor do parâmetro, sendo em torno 0,5%, podendo tal condição, ser explicada pela reestruturação dos grãos. Com o aumento da fração de material com maior diâmetro equivalente e a redução das partículas finas (silte e argila), o arranjo interno da estrutura do solo é afetado. Isso pode resultar em uma menor capacidade de ocupação dos espaços vazios disponíveis por partículas de solo, levando à redução da densidade máxima do material. Essa reorganização dos grãos influencia diretamente na compactação do solo, afetando suas propriedades físicas e mecânicas.

É possível então inferir que a adição de resíduo cerâmico contribui para um aumento na densidade máxima do solo até certo limite, que para esta pesquisa foi a alíquota de 40%, e desse modo uma porcentagem maior de resíduo cerâmico pode não proporcionar o mesmo efeito.

Os resultados encontrados evidenciam uma melhora nas características mecânicas do solo, tendo em vista a tendência da diminuição da umidade necessária para se atingir maiores valores de densidade na energia de compactação normal. Atribui-se a ocorrência desse comportamento, principalmente, ao resíduo cerâmico acrescentado tratar-se de um material não

líquido e não plástico, que, com tamanho de partículas de dimensão areia, apresenta superfície específica inferior à do solo estudado condicionando menor retenção de água.

Voottipruex, Teerawattanasuk e Meepon (2019), que estudaram um solo laterítico marginal tratado com resíduos cerâmicos com a finalidade de aplicação em estradas rurais, verificaram a mesma tendência de comportamento evidenciada nesta pesquisa. Os autores trabalharam com as proporções de resíduo de 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20% e verificaram que, em geral a adição do resíduo cerâmico ao solo laterítico levou a diminuição da h ótima, que passou de 10% para 8%, e aumento da δ máx., que passou de 2,20 g/cm³ para 2,23g/cm³, no entanto, o menor percentual de h ótima e maior valor de δ máx. foi encontrado para a amostra de 90% solo e 10% resíduo cerâmico (8% e 2,23g/cm³). Os autores justificam que o comportamento verificado se deve, provavelmente, ao fato do resíduo cerâmico utilizado no estudo ter passado por processo sinterização a 1200 C°, e desse modo não absorver água.

Saber e Iravanian (2022) pesquisaram a estabilização de solos argilosos com o uso de resíduos de pó cerâmico nas proporções de 5% e 10% e também encontraram comportamento semelhante ao verificado nesta pesquisa. É apresentado pelos autores o aumento da δ máx. e diminuição da h ótima a medida que foram acrescentadas as alíquotas de resíduos cerâmico, sendo os valores encontrados de δ máx e h ótima, para o solo argiloso, o solo mais 5% de resíduo cerâmico e o solo mais 10% de resíduos cerâmico, respectivamente, de: δ máx - 1,842 g/cm³; 1,92 g/cm³ e; 1,97 g/cm³; h ótima - 14,72%; 12,23% e; 10,24%. Os autores atribuíram esse comportamento, principalmente ao fato das partículas de pó cerâmico passarem pelo processo de queima em altas temperaturas, conferindo melhor resistência as misturas e tendo comportamento inerte quando em contato com à água. Outro ponto levantado foi a diminuição da superfície específica a partir do aumento da gradação das partículas nas misturas, o que diminui a retenção de umidade no material.

Isa et al. (2023), que estudaram as características estruturais e análise microestrutural de soft solo estabilizado com resíduos de ladrilhos de solo fino, nas porcentagens de 5%, 10%, 15%, 20% 25%, 30%, 35% e 40%, verificaram, de mesmo modo que os pesquisadores já mencionados, que a medida que é acrescentado resíduo cerâmico ao solo há a diminuição do teor de umidade ótima e o aumento da densidade máxima. Os autores constataram a diminuição acentuada da h ótima entre os acréscimos de 5% a 15% do resíduo, permanecendo, no entanto, a tendência de decréscimo do parâmetro até a alíquota de 40%, atribuindo-se esse comportamento a redução da capacidade de retenção de água dentro das partículas de argila estabilizadas a medida que se aumenta o número de partículas do resíduo. Quanto ao aumento

da δ máx., os autores afirmam que é provável que este tenha ocorrido devido a amostra ter se tornado mais compacta e mais densa à medida que o teor de umidade diminuiu.

5.2.2. Compressão simples

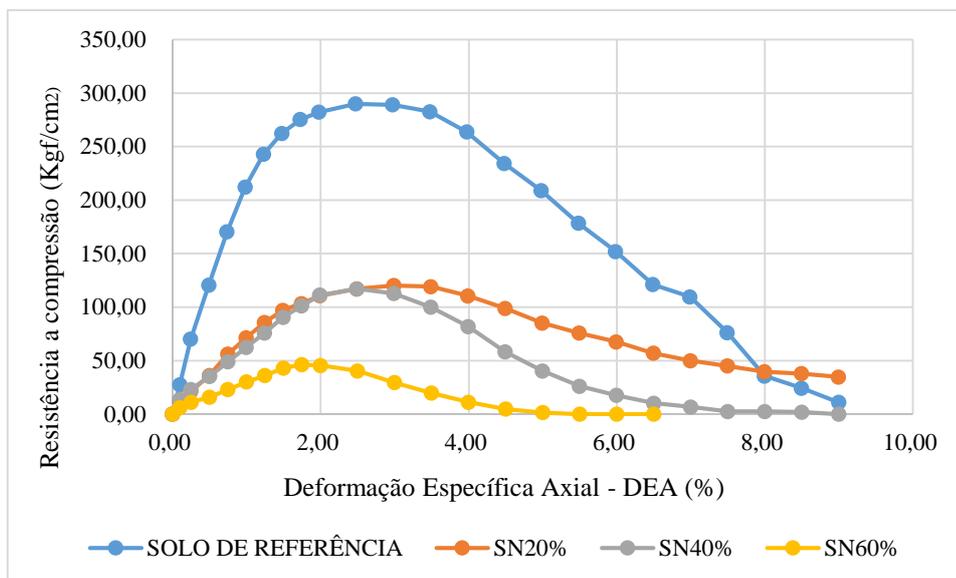
Os valores de resistência a compressão e deformação específica axial (DEA) obtidos a partir do ensaio de compressão simples para cada uma das amostras pode ser observado na tabela 10, e estão expressados graficamente na figura 34.

Tabela 10 – Resistência a compressão e Deformação Específica Axial (DEA) das amostras.

AMOSTRA	Resistência a compressão (KPa)	DEA(%)
SOLO DE REFERÊNCIA	289,95	2,47
SN20%	120,31	2,99
SN40%	117,15	2,49
SN60%	46,24	1,75

Fonte: a autora (2024).

Figura 34 - Curvas da Resistência a compressão – solo de referência e misturas.



Fonte: a autora (2024).

Os resultados obtidos no ensaio de compressão simples demonstraram que à medida que se aumentou a alíquota de resíduo cerâmico misturada ao solo de referência, diminuiu-se a resistência a compressão. Quanto a DEA, o solo de referência e as amostras SN20% e SN40% apresentaram comportamento semelhante. Já a amostra SN60% apresentou a menor deformação em relação a resistência a compressão.

O comportamento apresentado deve-se, provavelmente, a modificação no arranjo estrutural do solo devido ao acréscimo de material granular com dimensão de areia, em substituição as partículas de fino (silte e argila). O aumento na graduação das partículas favorece a formação de macroporos podendo vir a condicionar a diminuição da compactação do solo favorecendo a perda de resistência.

Al-Baidhani e Al-Thaie (2020), que estudaram o uso de escombros cerâmicos triturados reciclados para melhoramento de solo altamente expansivo nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% constataram que, em comparação ao solo utilizado, houve aumento da resistência a compressão não confinada com a mistura do solo com o resíduo cerâmico, exceto com o percentual de 50%. No entanto, o comportamento crescente no ganho da resistência entre as misturas permaneceu até o percentual de 30%, sendo os maiores aumentos referentes aos percentuais de 20% e 30%, com, respectivamente, 1,6 e 1,7 vezes a resistência do solo. Com isso, os autores concluíram que o uso do resíduo de escombros de cerâmica como agente estabilizador para melhorar a resistência do solo altamente expansivo poderia ser potencial e viável com um valor ótimo para a mistura entre 20% e 30%.

Balegh, Sellaf, e Hadjmostefa (2020) que estudaram o efeito dos resíduos cerâmicos nas propriedades mecânicas e geotécnicas do tufo tratado com cimento com a utilização de alíquotas de resíduo cerâmico nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% realizaram o ensaio de compressão simples considerando tempos de cura para os corpos de prova de 1, 7, 14, 28 e 56 dias. Os autores observaram que em relação ao solo de referência estudado, todas as amostras com acréscimo de resíduo cerâmico obtiveram aumento no desempenho mecânico quanto a resistência a compressão não confinada. No entanto, os resultados apontaram que os melhores rendimentos ocorreram ao se utilizar 15% de resíduo cerâmico e no tempo de cura de 14 dias, sendo constatado então que, há efeito negativo da cerâmica na homogeneidade da mistura quando ultrapassa o limite de 15%.

Sivabalaselvamani et al. (2022), que estudaram sobre propriedades de resistência a mecânica de um solo expansivo estabilizado com pó de resíduo cerâmico, com acréscimo de alíquotas de resíduo cerâmico nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% perceberam comportamento semelhante. Os autores realizaram o ensaio de resistência a compressão não confinada utilizando tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias e verificaram que houve ganho de resistência em comparação ao solo utilizado, no entanto, entre as misturas, o comportamento crescente para a resistência a compressão suportada permaneceu até o percentual de 20% decrescendo após isso.

Por fim, Rathore e Tiware (2023) verificaram a resistência a compressão não confinada como um dos parâmetros de verificação da estabilização de solos argilosos com resíduos cerâmicos em um estudo experimental, nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Os autores também utilizaram tempos de cura diferentes (0, 7, 14 e 28 dias) para realização do ensaio e constataram que houve aumento da resistência a compressão em comparação ao solo de referência com todas as alíquotas utilizadas, no entanto, entre as misturas o crescimento do parâmetro permaneceu até o percentual de 25%, chegando ao máximo para esta pesquisa, e decrescendo nos acréscimos posteriores, onde, desse modo, a alíquota de 25% foi considerada o incremento ideal para o objetivo da pesquisa.

Os estudos evidenciados demonstram similaridade a pesquisa realizada, uma vez que percebesse, nos resultados encontrados, que o aumento da alíquota de resíduo cerâmico acrescido ao solo proporciona ganho de resistência para proporções de resíduo cerâmico variando de 15% a 30% e posterior a isso a continuidade do acréscimo de resíduo passa a não favorecer o ganho de resistência das amostras. Para esta pesquisa percebeu-se então que os percentuais de resíduo cerâmico utilizados na mistura com o solo não apresentaram-se em um intervalo de favorecimento as características de resistência mecânica do solo de referência.

5.2.3. Adensamento unidimensional

A partir do ensaio de adensamento unidimensional foram verificadas a deformação volumétrica e a variação no índice de vazios (e) do solo de referência e das misturas com relação as tensões aplicadas.

Os resultados obtidos, quanto a deformação volumétrica, estão evidenciados na tabela 11, bem como, expressos graficamente, na figura 35.

Tabela 11 - Taxa de deformação volumétrica de adensamento unidimensional.

AMOSTRA	Taxa de deformação volumétrica (%)
SOLO DE REFERÊNCIA	10,6
SN20%	12,83
SN40%	10,15
SN60%	10,71

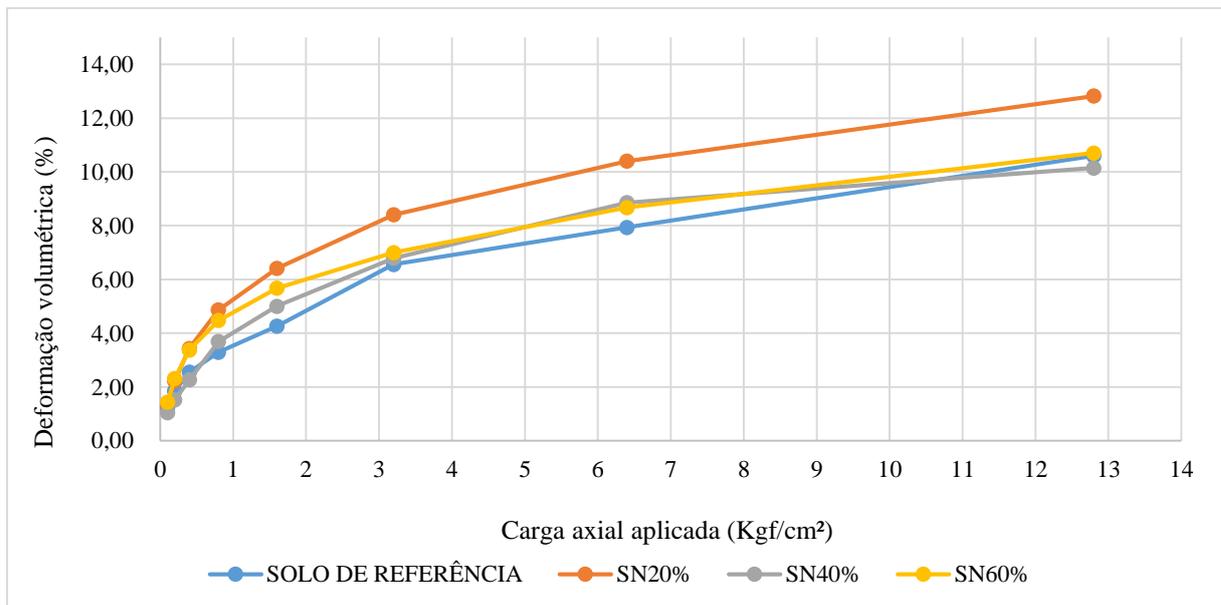
Fonte: a autora (2024).

A partir dos resultados obtidos foi verificado que o solo de referência e as amostras SN40% e SN60% apresentaram comportamento semelhante quanto a deformação. Apesar do comportamento semelhante foi possível evidenciar uma pequena redução da deformação

comparando-se o solo de referência e a amostra SN40%. Percebeu-se então, que houve uma influência sutil da incorporação do resíduo cerâmico quanto a minimização das deformações do solo, quando considerada a alíquota de 40%. Sugere-se que tal comportamento se deu devido a substituição de parte significativa do solo de referência, que configura um material altamente plástico, pelo resíduo cerâmico, que confere um material não plástico, condicionando a diminuição do comportamento de deformação.

Quanto a amostra SN20% houve aumento na taxa de deformação em comparação ao solo de referência, sendo este de 2,23%. Sendo assim, para essa amostra os resultados demonstraram menor estabilidade do solo quanto a deformações se comparado ao solo de referência e demais amostras. Como justificado em resultados anteriores, é possível que tal condição se deu devido a reorganização das partículas do solo no processo de moldagem dos corpos de prova.

Figura 35 – Curvas da deformação volumétrica por carga aplicada - solo de referência e misturas.

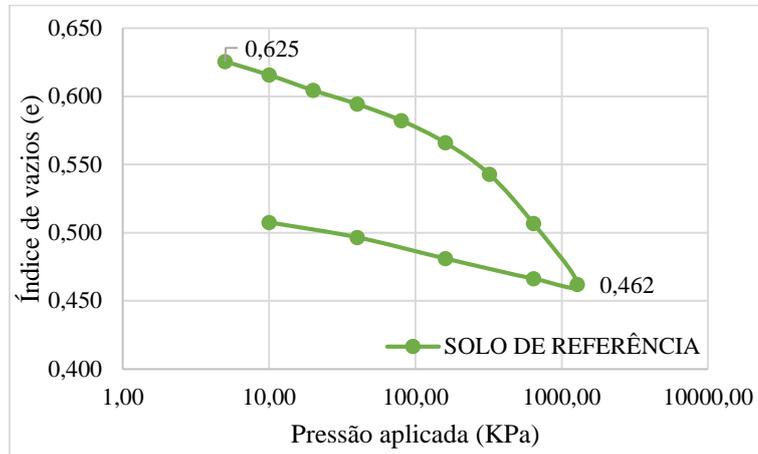


Fonte: a autora (2024).

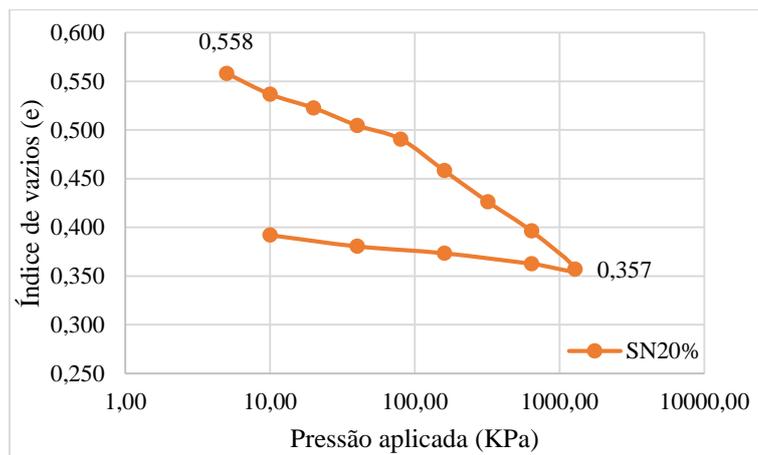
Quanto a relação entre as tensões aplicadas e o índice de vazios, é possível verificar o comportamento do solo e misturas na figura 36.

Figura 36 - Índice de vazios por tensão aplicada – a) solo de referência; b) SN20%; c) SN40%; d) SN60%.

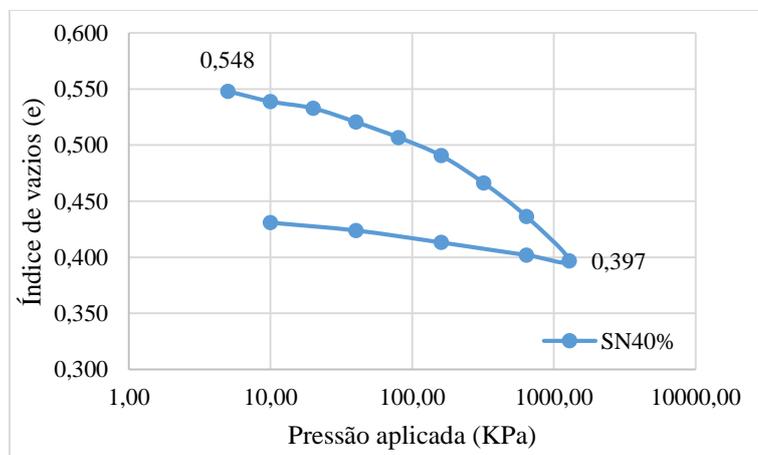
a)



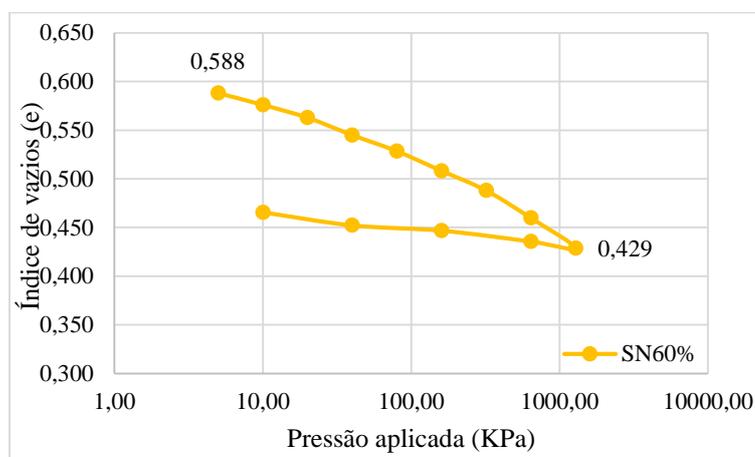
b)



c)



d)



Fonte: a autora (2024).

A tabela 12 apresenta a redução em porcentagem do índice de vazios inicial do solo de referência e misturas, após o ensaio de adensamento.

Tabela 12 - Redução em porcentagem dos índices de vazios do solo e misturas após ensaio de adensamento.

AMOSTRA	e_0	e_f	Redução (%)
SOLO DE REFERÊNCIA	0,625	0,462	26
SN20%	0,558	0,357	36
SN40%	0,548	0,397	27
SN60%	0,588	0,429	27

Fonte: a autora (2024)

Considerando os resultados obtidos para redução do índice de vazios após realização do ensaio de adensamento unidimensional, constatou-se mais uma vez o comportamento semelhante entre as amostras do solo de referência, SN40% e SN60%, apresentando redução de vazios variando entre 26% e 27%.

A amostra SN20% apresentou a maior taxa de redução de vazios, sendo 10% maior quando comparada com a taxa apresentada pelo solo de referência. O resultado para essa amostra acompanha o comportamento obtido quanto a deformação, pois apresentando a maior taxa de deformação esperava-se também a apresentação da maior redução no índice de vazios.

Dentro das buscas realizadas para composição do portfólio de referências não foram encontrados estudos similares a temática abordada para pesquisa que fizeram uso do ensaio de adensamento. As pesquisas têm seu foco voltado para as características de resistência do solo,

no entanto achou-se relevante a aplicação do ensaio de adensamento para o conhecimento sobre as características de deformação do solo de maneira complementar, auxiliando na compreensão do comportamento das amostras, obtendo assim melhor direcionamento quanto a sugestão de aplicações na engenharia civil.

5.2.4. Índice de Suporte Califórnia – ISC

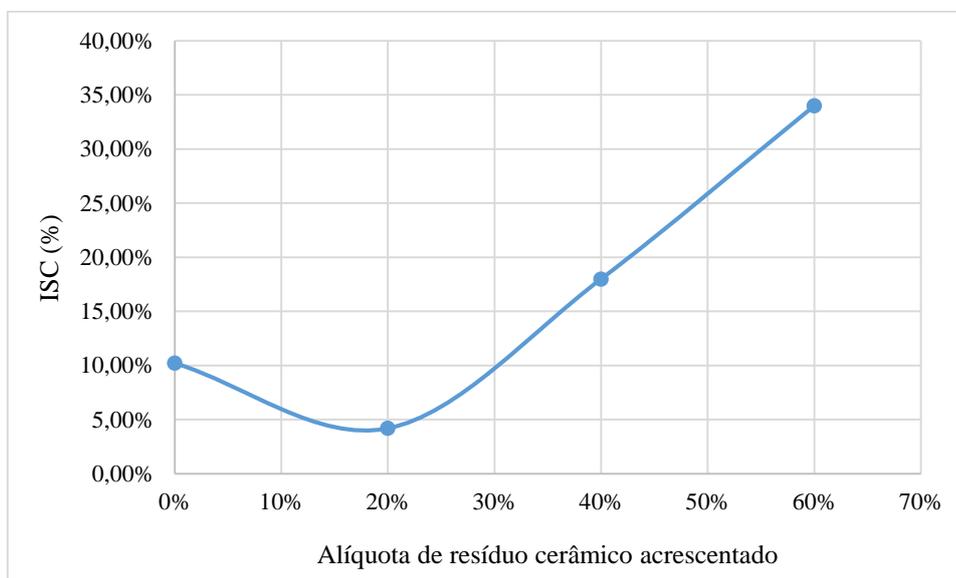
Os valores da taxa de Índice de Suporte Califórnia e de expansão para o solo de referência e misturas pode ser observado na tabela 13, e estão expressados graficamente na figura 37.

Tabela 13 - Taxa do Índice de Suporte Califórnia e Expansão.

AMOSTRA	ISC (%)	EXPANSÃO (%)
SOLO DE REFERÊNCIA	10,23	0,01
SN20%	4,2	0,01
SN40%	18,0	0
SN60%	34	0

Fonte: a autora (2024).

Figura 37 - Taxa ISC do solo de referência e misturas.



Fonte: a autora (2024).

Quanto as características de expansão, houve variações pouco significativas nas amostras de solo de referência e SN20%, sendo apresentado um deslocamento de 0,01%. Já as amostras SN40% e SN60% não apresentaram variação, demonstrando a diminuição da expansão à medida que foi aumentada a alíquota de resíduo cerâmico.

É provável que tal comportamento se deu devido as partículas do resíduo cerâmico sendo de maior gradação e possuindo menor superfície específica e tendo passado por processo de sinterização, absorverem menor quantidade de água, preservando a estabilidade da amostra.

Com relação a taxa ISC, houve aumento do parâmetro, em comparação aos valores encontrados para o solo de referência, a partir da incorporação de 40% de resíduo cerâmico, sendo o ganho de 176% e passando para 332% quando adicionado 60% de resíduo cerâmico ao solo.

Sugere-se que o ganho de resistência se atribuiu ao aumento do atrito entre as partículas pelo maior intertravamento entre os grãos de maior gradação e as partículas do solo de referência. Comportamento semelhante foi verificado por Sharma (2020), que realizou um estudo experimental para avaliar a eficiência do uso de cinzas volantes e resíduos de cerâmica juntamente com areia pobre para estabilização de solo argiloso, utilizando resíduo cerâmico variando de 2% a 8%, com incrementos de 2%.

Nas duas composições base utilizadas, representadas por 70% de solo, 30% de areia e 10% de cinza volante e 60% de solo, 40% de areia e 10% de cinza volante, os autores verificaram um aumento no valor da taxa do ISC com o aumento da porcentagem de resíduos cerâmicos incorporadas, quando comparado ao valor atingido pelo solo de referência. Os valores passaram de 13,6% para 14,5% na taxa do ISC para primeira composição descrita e de 12,3% para 13,9% para a segunda composição. Os autores atribuíram a possibilidade desse comportamento a ocorrência do intertravamento entre o material compósito e o percentual de partículas cerâmicas, esclarecendo que o intertravamento ocorre devido ao envolvimento das partículas compostas de argila-areia-cinza volante pelas partículas cerâmicas residuais mais grossas resultando no aumento da resistência.

Beyene et al. (2022), que realizaram um estudo experimental sobre a potencial adequação da cal natural e do pó cerâmico residual na modificação de propriedades de argila altamente plástica, também verificaram aumento da taxa do ISC ao se utilizar o resíduo cerâmico como estabilizante. Os autores fizeram uso de alíquotas entre 2% e 30% (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%) e verificaram que a taxa do ISC passou de 2% no solo de referência para 8,13% com o uso de 30% de resíduo cerâmico. Além disso, os autores verificaram a diminuição na expansão das amostras que fizeram uso do resíduo cerâmico. Para o uso de 6% de resíduo cerâmico houve uma redução de 6,08% para 4,81%. Os autores afirmam que o ganho de resistência está diretamente associado às reações pozolânicas e que esse ganho

não é imediato, mas são resultado da formação de materiais cimentícios como o hidrato de silicato de cálcio e o hidrato de aluminato de cálcio.

Rathore e Tiware (2023) realizaram o ensaio de ISC nas condições não encharcado e encharcado, e para os dois cenários obtiveram valores crescentes quando comparados os resultados obtidos para o solo estudado e as misturas com as alíquotas de resíduo cerâmico (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%). Os autores relataram um ganho de aproximadamente 150% de resistência comparando-se o solo de referência com a mistura com 30% de resíduo na condição não encharcado e de aproximadamente 140% na condição encharcado. O comportamento de ganho de resistência é justificado pelos autores pelas atividades pozolânicas ocorridas em compósitos argilocerâmicos na presença de umidade que os fez concluir que o uso de resíduos cerâmicos representa, portanto, alternativa de melhoria da resistência mecânica do solo argiloso.

Para a amostra SN20% houve redução da taxa ISC ao comparar-se os resultados encontrados com os do solo de referência. Mais uma vez, é possível que esse comportamento tenha ocorrido devido ao rearranjo das partículas do solo na moldagem dos corpos de prova.

5.3. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE, POR MEIO DE NORMAS TÉCNICAS, DAS MISTURAS SOLO-RESÍDUO CERÂMICO EM OBRAS DE ENGENHARIA.

A partir dos resultados obtidos com os ensaios realizados e a avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas e no comportamento do solo acrescido de resíduo cerâmico, foi possível sugerir algumas aplicações na engenharia para as amostras estudadas nessa pesquisa.

Foi verificada a aplicabilidade do solo estabilizado em camadas de aterros sanitários. De acordo com a NBR 13896/1997, que trata sobre aterros de resíduos não perigosos - critérios para projeto, implantação e operação; um dos critérios a ser atendido para escolha do local onde o aterro será instalado é que o solo de referência deve apresentar coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s. A mesma norma especifica que para as camadas de cobertura finais do aterro o solo utilizado deve apresentar coeficiente de permeabilidade inferior a do solo de referência onde foi instalado o aterro (item 5.8.2; alínea b).

Tendo por base o estabelecido em norma, verificou-se que a amostra SN20% atingiu o parâmetro especificado ($k = 1,89 \times 10^{-7}$ cm/s) sendo possível sua aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

As demais amostras e o solo de referência, por apresentarem coeficiente de permeabilidade acima do estabelecido em norma (entre 10^{-6} cm/s e 10^{-5} cm/s) não estão aptas ao uso como camadas de aterros sanitários.

Para determinação de aplicações em pavimentação foram consultadas as normas 108/2009, 139/2010 e 141/2021 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que tratam especificamente de: terraplenagem – aterros – especificação de serviços; sub-base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço, e; base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço.

A norma 108/2009 estabelece as características mínimas necessárias para solos utilizados como corpo de aterro e camadas finais de aterros para estradas, estando esses parâmetros apresentados no quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros norma 108/2009 DNIT para uso de solo em aterros de estradas.

CAMADA	ISC	EXPANSÃO
Corpo do aterro	$\geq 2\%$	$\leq 4\%$
Camada final do aterro	Melhor possível adequada aos preceitos técnicos-econômicos	$\leq 2\%$

Fonte: adaptado DNIT (2009).

Com base no exposto foi verificada a adequação de todas as amostras analisadas para uso em corpos de aterros de estradas, uma vez que os valores de taxa ISC atingidos foram superiores a 4% e os valores de expansão que foram apresentados apenas pelas as amostras de solo de referência e SN20% foram de 0,01%.

Quanto ao uso como camada final de aterro de estradas, compreende-se potencial para uso das amostras, uma vez que apresentam expansão inferior ao especificado como máximo pela norma e por apresentarem ISC maior em até 13 vezes o especificado como mínimo para corpo de aterro, no entanto a confirmação de apto ao uso confirma-se apenas em especificação de projeto.

A norma 139/2010 estabelece como parâmetros para uso de materiais estabilizados granulometricamente como sub-base, apresentar um valor de taxa ISC $\geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$ e índice de grupo igual a zero. Com base nesses parâmetros foi possível verificar que a amostra SN60% conferiu melhoramento ao solo de modo a torna-lo apto para o uso na composição de camadas de sub-base, uma vez que a taxa ISC apresentada foi maior em 14% do que a mínima

exigida e não houve expansão da amostra, e ainda, o índice de grupo apresentado por essa amostra foi igual a zero. As demais amostras, incluindo o solo de referência, não atenderam aos critérios mínimos estabelecidos, não sendo, dessa forma, adequadas ao uso como sub-base.

Já a norma 141/2022, descreve que a combinação de solos ou materiais selecionados em fase de projeto deve comprovadamente apresentar a melhoria substancial nas características do solo de referência, de modo a justificar sua utilização em base de pavimentos, devendo ser ainda atendidos os parâmetros apresentados no quadro 6.

Quadro 6 - Parâmetros norma 141/2022 DNIT para uso de solo estabilizado granulometricamente como camada de base em pavimentos.

CAMADA	CBR	EXPANSÃO	LL	IP
Base	≥ 60% para $N \leq 5 \times 10^6$ ≥ 80% para $N > 5 \times 10^6$	≤ 5%	≤ 25%	≤ 6%

Fonte: adaptado DNIT (2022)

Nenhuma das amostras verificadas nessa pesquisa apresentou as características mínimas par uso como camadas de base de pavimento, as tornando inaptas para esta finalidade.

5.4. VERIFICAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL DO USO DAS MISTURAS EM OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL

A partir da constatação da possibilidade do uso dos resíduos cerâmicos como material estabilizante para adequação de solos à obras de engenharia, verificou-se a contribuição ambiental do uso desse material para redução de impactos ambientais negativos gerados pelo setor da construção, sobretudo das indústrias cerâmicas.

A aplicação dos resíduos cerâmicos como agregados reciclados impacta diretamente na transformação de um passivo ambiental e rejeito para as indústrias cerâmicas, em um insumo sustentável para a cadeia produtiva do setor da construção.

Com tal técnica viabiliza-se a redução do consumo de matérias-primas naturais, em muitos casos, não renováveis; contribui-se para o aumento de vida útil dos aterros sanitários, uma vez que se minimiza o quantitativo de material enviado para deposição nesses locais, bem como; reduz-se as taxas de emissão de gases contribuintes ao efeito estufa pelos veículos que transportam esses materiais aos aterros, uma vez que se diminui essa demanda.

Além disso, por tratar-se de um material inerte, como já mencionado, classificado como não perigoso pela NBR 10004/2004, apresenta-se como um material de baixo risco, quanto a contaminações, para o uso em misturas com solos não adequados a obras de engenharia.

6. CONCLUSÕES

Levando-se em consideração os resultados obtidos, foi possível inferir as seguintes conclusões:

1. A utilização dos resíduos cerâmicos na estabilização do solo melhorou suas propriedades físicas, diminuindo os limites de consistência e em consequência o índice de plasticidade, passando de solo altamente plástico para medianamente plástico e chegando, com o incremento da alíquota de 60% de resíduo, a mudança de classificação de solo argiloso para areia ou areia siltosa ou argilosa no sistema de classificação TRB;
2. A partir do ensaio de adensamento unidimensional foi possível constatar mudança no comportamento de deformação do solo a partir do incremento da alíquota de 40% de resíduos cerâmicos, demonstrando eficiência da técnica de estabilização quanto às melhorias na estabilidade do solo estudado;
3. O emprego de resíduos cerâmicos na estabilização do solo argiloso estudado mostrou-se uma técnica viável para utilização em aterros sanitários, considerando a proporção de resíduo cerâmico adicionado em 20%, uma vez que foram atingidos os parâmetros estabelecidos na legislação vigente para este fim;
4. O uso de resíduos cerâmicos como técnica de estabilização do solo argiloso estudado também se mostrou viável para utilização em pavimentos, tanto como aterro de estradas como em camadas de sub-base, uma vez que a técnica conferiu um aumento significativo na capacidade de suporte do solo, atingindo em até 17 vezes os valores recomendados na legislação vigente e desse modo viabilizando a sua utilização.
5. A reciclagem e reutilização dos resíduos cerâmicos enquanto agregados mostrou-se vantajosa do ponto de vista ambiental, uma vez que é reduzido um

passivo ambiental com o não envio desses resíduos a aterros sanitários e ainda pelo potencial de diminuição de extração de matérias-primas naturais finitas;

6. A pesquisa gerou resultados relevantes do ponto de vista da minimização dos impactos ambientais negativos produzidos pela indústria da construção civil e sobretudo pelas indústrias de revestimento cerâmico, uma vez que, por meio de ensaios normatizados, os resultados obtidos demonstraram opções para retorno dos resíduos cerâmicos ao ciclo produtivo da indústria da construção aumentando a vida útil dos recursos naturais extraídos, trazendo soluções as empresas do ramo que não o descarte desses materiais em aterros ou em condições inadequadas e conferido sustentabilidade ao setor da construção civil.
7. Como propostas de estudos futuros recomenda-se realizar a análise química e microestrutural em complemento ao estudo físico e o geomecânica para solos estabilizados com resíduos cerâmicos, bem como, realizar a investigação e mapeamento do montante de resíduos cerâmicos de revestimento gerados no estado de Pernambuco, com fins de verificar a disponibilidade desse material para uso enquanto agregado em obras de construção civil, objetivando a implementação dos princípios da economia circular e minimização do descarte inadequado desses resíduos ao meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS

ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo, SP, Brasil.

AL-BAIDHANI, A. F.; AL-TAIE A. J. Recycled Crushed Ceramic Rubble for Improving Highly Expansive Soil. **Transportation Infrastructure Geotechnology**. v. 7, p. 423-444, 2020.

AL-BARED, M. A. M.;HARAHAP, I. S. H;MARTO, A. Sustainable Strength Improvement of Soft Clay Stabilized with two sizes of Recycled Additive. **International Journal of GEOMATE**. v. 15, n. 51, p. 39-46, 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Panorama do setor de fabricantes de cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres - 2024**. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/portfolio-anfacer> Acesso em: abr de 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **D 422: Standard test method for particle-size analysis of soils**, West Conshohocken, 2007.

ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, C. B.; MARQUES, F. A. Solos. In: PFALTZGRAFF, P. A. S; TORRES, F. S. M.; COSTA, M. R. (org.). Caracterização do meio físico na pesquisa da geodiversidade da Região Metropolitana do Recife. 1. ed. Brasília: CPRM, 2022. p. 108-120.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457:2016. Versão corrigida:2016. Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6402:1996. Versão Corrigida: 2022. Solos e rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13896:1997. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459:2016. Versão Corrigida: 2017. Solo: Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180:2016 Solo: Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181: 2016.Versão Corrigida 2: 2018. Solo: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9895: 2016.Versão Corrigida 1: 2017. Solo: Índice de Suporte Califórnia – Método de ensaio -** . Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16853: 2020.Solo — Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13292: 2021.Solo** — **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12770:1992. Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 7182:2016 Versão Corrigida:2020.Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 10004:2004. Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Perfil da cadeia da construção civil - 2020.** Disponível em: <https://abramat.org.br/wp-content/uploads/2022/03/ABRAMAT-Perfil-da-Cadeia-Produtiva-da-Construcao-e-Industria-de-Materiais-2021-Resumo.pdf> Acesso em: outubro de 2022.

A Região Metropolitana do Recife. **Governo de Pernambuco**, Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.pdui-rmr.pe.gov.br/RMR>. Acesso em: 20 out. 2023.

BALEGH, B.; SELLA, F.; HADJMOSTEFA, A. Effect of ceramic waste on mechanical and geotechnical properties of tuff treated by cement. **Case Studies in Construction Materials**. v. 13, p. 1-11, 2020.

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamento de encostas na Região Metropolitana do Recife.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2010.

BASE de dados: metodologia. **Portal da escrita científica USP São Carlos**, São Paulo, 2024 Disponível em: <https://escritacientifica.sc.usp.br/metodologia/bases-metodologia/> . Acesso em: 20 jan. 2024.

BASSOI, L. H.; SOARES, J. M. Relação solo-água-plantas. In: ROCHA, E. M. de M.; DRUMOND, M. A. (Ed.). *Fruticultura irrigada: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

BEYENE, A.; TESFAYE, Y.; TSIGE, D.; SORSA, A.; WEDAJO, T.; TESEMA, N.; MEKURIA, G. Experimental study on potential suitability of natural lime and waste ceramic dust in modifying properties of highly plastic clay. **Heliyon**. v. 8, p. 1-13, 2022.

BESSA, M. J.; BRANDÃO, F.; VIANA, M.; GOMES, J. F.; MONFORT, E.; CASSEE, F. R.; FRAGA, S. TEIXEIRA, J. P. Nanoparticle exposure and hazard in the ceramic industry: an overview of potential sources, toxicity and health effects. **Environmental Research**. v. 184, p. 1-14, 2023.

BORBA, T. R.; QUARESMA, J. E. A. Importância da Gestão de Resíduos Sólidos na Construção Civil. **Revista Científica Semana Acadêmica**. 2019. Fortaleza, ano MMXIX, Nº.

000185. Disponível em: <https://semanaacademica.com.br/artigo/importancia-da-gestao-de-residuos-solidos-na-construcao-civil>. Acessado em: outubro de 2022.

BOSCHI, G.; MASI, G.; BONVICINI, G.; BIGNOZZI, M. C. Sustainability in Italian Ceramic Tile Production: Evaluation of the Environmental Impact. **Applied Sciences**. v. 10, n. 24, p. 1-15, 2020.

BOSCHI, G.; BONVICINI, G.; MASI, G.; BIGNOZZI, M. C. Recycling insight into the ceramic tile manufacturing industry. **Open Ceramics**. v. 16, p. 1-8, 2023.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas aplicações - Fundamentos. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CHEN, Z.; ZHANG, D.; CHEN, S.; XU, X. ZHAO, C.; WANG, X.; WU, Q. BAI, X. Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties, durability and microstructure assessment. **Journal of Building Engineering**. v. 52, p. 2-15, 2022.

CLASSIFICAÇÃO dos Solos. **EMBRAPA**, Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/classificacao-de-solos>. Acesso em: 20 abr. 2024.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 307:2002 – Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Brasília, DF, Brasil.

DA PAZ, D. H. F; LAFAYETTE, K. P. V; HOLANDA, M. J. O; SOBRAL, M. C. M; COSTA, L. A. R. C. Assessment of environmental impact risks arising from the illegal dumping of construction waste in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**. n. 22, p. 2289-2304, 2020.

DARAEI, A.; SHERWANI A. F. H.; FARAJ, R. H.; MOHAMMAD, S.; KURDO, S.; ZARE, S.; MAHMOODZADEH, A. Stabilization of problematic soil by utilizing cementitious materials. **Innovative Infrastructure Solutions**. v.4, n. 33, p. 1-11, 2019.

DEBOUCHA, S.; MAMOUNE, S. M. A.; ZIANI, Y. S. H. Effects of Ceramic Waste, Marble Dust, and Cement in Pavement Sub-base Layer. **Geotech Geol Eng**. v. 01, n. 38, p. 3331-3340, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. Norma DNER-ME 093:1994 – Solos: determinação da densidade real – Método de ensaio. Brasília, DF, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 108/2009. **Terraplenagem – Aterros – Especificação de serviços**. Brasília, DF, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 139/2010. **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Brasília, DF, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 141/2022. **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço**. Brasília, DF, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Publicação IPR – 719: 2006. **Manual de pavimentação**. Brasília, DF, Brasil.

DONDI, M.; GUARINI, G.; CONTE, S.; MOLINARI, C.; SOLDATI, R.; ZANELLI, C. Deposits, composition and technological behavior of fluxes for ceramic tiles. **Reviste Online Sapienza** v. 88, n. 3, p. 235-257, 2019. Disponível em: https://rosa.uniroma1.it/rosa04/periodico_di_mineralogia/article/view/16195/15590 Acessado em: janeiro de 2024

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GUSMÃO FILHO, J. A. Riscos em taludes. In: GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; MAIA, G. B. (org.). **Geotecnia no Nordeste**. 1. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005. p. 204-206.

HISTÓRICO da Região Metropolitana do Recife. **CONDEPE/FIDEM**, Brasil, 2023. Disponível em: <http://www.condepefidem.pe.gov.br/web/condepe-fidem/historico1>. Acesso em: 20 out. 2023.

ISA, M. H. M; KOTING, S.; HASHIM, H.; AZIZ, S. A.; MOHAMMED, S. A. Structural Characteristics and Microstructure Analysis of Soft Soil Stabilised with Fine Ground Tile Waste. **Materials**. v. 16, n. 5261, p. 1-20, 2023.

JALAEI, F.; ZOGHI, M.; KHOSHAND, A. Life cycle environmental impact assessment to manage and optimize construction waste using Building Information Modeling (BIM). **International Journal of Construction Management**.v. 27, n. 1, p. 163-176, 2019.

JILI, Q.; HAO, Z. Modifying mechanical properties of Shanghai clayey soil with construction waste and pulverized lime. **Science and Engineering of Composite Materials**.v. 21, n. 8, p. 784-801, 2020.

LASSEUGUETTE, E.; BRUNS, S.; SIMMONS, D.; FRANCIS, E.; CHAI, H. K.; KOUTSOS, V. Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems.**Journal of Cleaner Production**. v. 211, p. 1228-1238, 2019.

LIMA, J. S. P.; VICENTE, G. O.; FAGUNDES, L. P.; CABRAL, C. L. B.; CRUZ, F. A.; TASHIMA, M. M. Estabilização física de solo laterítico arenoso utilizando resíduos cerâmicos. **Revista Matéria**. v. 25, n. 4, 2020.

LUKIANCHUKI, J. A.; OLIVEIRA, J. R. M. S.; ALMEIDA, M. S. S.; DOS REIS, J. H. C; SILVA, T. B.; GUIDELI, L. C. Geotechnical Behavior of Construction Waste (CW) as a Partial Replacement of a Lateritic Soil in Fiber- Reinforced Cement Mixtures. **Geotech Geol Eng**. v. 39, 2021.

MAGALHÃES, R. F.; DANILEVICZ, A. M. F.; SAURIN, T. A. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. **Waste Management**, v. 67, p. 265-277, 2017.

MAUÉS, L. M.; BELTRÃO, N.; SILVA, I. GHG Emissions Assessment of Civil Construction Waste Disposal and Transportation Process in the Eastern Amazon. **Sustainability**, v. 13, n. 10 p. 01-26, 2021.

MICHALEK, J.; PARTYKA, J.; PASIUT, K.; KACZMARCZYK, K. Reuse of high-alumina C130-type porcelain waste. **Open Ceramics**. v. 9, p.2-6, 2022.

MONTEIRO, H.; CRUZ, P. L.; MOURA, B. Integrated environmental and economic life cycle assessment of improvement strategies for a ceramic industry. **Journal of Cleaner Production**. v. 345, p. 1-14, 2022.

OLIVEIRA, M. L. S.; IZQUIERDO, M.; QUEROL, X.; LIEBERMAN, R. N.; SAIKIA, B. K.; SILVA, L. F. O. Nanoparticles from construction wastes: A problem to health and the environment. **Journal of Cleaner Production**. v. 219, , p. 236-243, 2019.

ONAKUNLE, O.; OMOLE, O. D.; ADEBANJI O. S. Stabilization of lateritic soil from Agbara Nigeria with ceramic waste dust. **Cogent Engineering**. v. 6, n. 1, p. 1-10, 2019.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2007

RATHORE P.; TIWARI, S. K. Soil Stabilization using Ceramic Waste: an Experimental Study. **Journal of Mining and Environment**, v. 14, n. 1, p. 47-65, 2023.

ROQUE, R. A. L.; PIERRI, A. C. Intelligent use of natural resources and sustainability in civil construction. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 2, p. 1-18, 2019.

RUIZ, L. A. L.; RAMÓN, X. R.; DOMINGO, S. G.. The circular economy in the construction and demolition waste sector—A review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119238, 2020.

SABER, S. A.; IRAVANIAN, A. Using Waste Ceramic Dust in Stabilization of Clay Soils. **International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology**. v. 13, n. 1, p. 68-80, 2022.

SANTOS JÚNIOR, O. F. Estabilidade de encostas e erosão. In: GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; MAIA, G. B. (org.). Geotecnia no Nordeste. 1. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005. p. 182.

SCOPUS: banco de dados de resumos e citações multidisciplinar, abrangente e confiável. **Elsevier**, Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br/products/scopus>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SHARMA, R. K. Utilization of Fly Ash and Waste Ceramic in Improving Characteristics of Clayey Soil: A Laboratory Study. **Geotech Geol Eng**. v. 01, n.38, p 5327-5340, 2020.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; SINGH, M. Recycle option for metallurgical by-product (spent foundry sand) in green concrete for sustainable construction. **Journal of Cleaner Production**. v. 20, p. 1111-1120, 2018.

SILVA, A. C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Revista Matéria**, v.24, n.2, 2019.

SILVA, M. P. S; SANTOS, L. F.; SILVA, A. C. L; FROTA, C. A. Shear Strength of a typical soil from Manaus, Brazil, stabilized with ceramic residue additive. **Revista Matéria**. v. 24, n. 2, 2019.

SIVABALASELVAMANI, D. KULANTHAIVEL, J.; YOGAPRIYA, J.; DHANOA, S. Study on engineering strength properties of ceramic waste powder stabilized expansive soil using machine learning algorithms. **Journal of Ceramic Processing Research**. v. 23, n. 6, 2022, p. 902-911.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SPIŠÁKOVÁ, M.; MANDICÁK, T.; MÉŠÁROŠ, P.; ŠPAK, M. Waste Management in a Sustainable Circular Economy as a Part of Design of Construction. **Applied sciences**. v. 12, p. 2-19, 2022.

TAFESSE, S.; GIMMA, Y. E.; DESSALEGN, E. Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. **Heliyon**. v. 8, n. 3 p. 2-10, 2022.

TORRES, S. F. M.; PFALTZGRAFF, P. A. S; ALCÂNTARA, V. C.; MORAIS, D. M. F. Evolução Geológica. In: PFALTZGRAFF, P. A. S; TORRES, F. S. M.; COSTA, M. R. (org.). Caracterização do meio físico na pesquisa da geodiversidade da Região Metropolitana do Recife. 1. ed. Brasília: CPRM, 2022. p. 21-24.

VIEIRA, A. W.; ROSSO, L. S.; DEMARCH, A.; PASINI, D.; RUZZA, S. P.; ARCARO, S.; RIBEIRO, M. J.; ANGIOLETTO, E. Life cycle assessment in the ceramic tile industry: a review. **Journal of Materials Research and technology** . v. 23, p. 3904-3915, 2023.

VIJAYAN, L. V.; JOSE, J. P. A, Stability Studies Of Cohesive Soil With Nano Magnesium And Zinc Oxide. **Materials and technology**. v. 56, n. 2, p. 187-191, 2022.

VOOTTIPRUEX, P.; TEERAWATTANASUK, C.; MEEPON, I. Marginal Lateritic Soil treated using Ceramic Waste for rural road application. **International Journal of GEOMATE**. v. 16, n. 53, p. 70-77, 2019.

WANG, Y.; LIU, Y; CUI, S.; SUN, B.; GONG, X.; GAO, F.; WANG, Z. Comparative life cycle assessment of different fuel scenarios and milling technologies for ceramic tile production: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**. v. 273, p. 1-15, 2020.