UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ALÉSSIA DE ALBUQUERQUE PEDROSA

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE SOLO REFORÇADO COM RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL E FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

Recife, PE

2021

UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ALÉSSIA DE ALBUQUERQUE PEDROSA

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE SOLO REFORÇADO COM RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL E FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco, da Universidade de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profª. Drª. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Recife, PE
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

Pedrosa, Aléssia de Albuquerque
P372c Comportamento geomecânico de solo reforçado com resíduo da construção civil e fibras de polietileno tereftalato (PET). / Aléssia de Albuquerque Pedrosa. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2021.

110 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Construção Civil. 2. Área de Risco. 3. Resíduos. 4. Fibras de PET. I. Engenharia Civil - Dissertação. II. Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690.028

ALÉSSIA DE ALBUQUERQUE PEDROSA

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE SOLO REFORÇADO COM RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL E FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora

Proa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco

Examinadores

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Belo
Universidade Federal de Pernambuco

Recife-PE
2021

DEDICATÓRIA

A Deus por sua infinita misericórdia, bondade e amor. Aos meus pais, Alberes Pedrosa e Ana Albuquerque, por todo amor e suporte, e ao meu irmão, Albérico Pedrosa, por todo carinho e cumplicidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder a vida, me proporcionar força nos momentos mais difíceis e por guiar todo o meu caminho.

Aos meus pais, Ana Lúcia Maria de Albuquerque e Alberes de Albuquerque Pedrosa, e ao meu irmão, Albérico de Albuquerque Pedrosa, por serem meu alicerce de amor, dedicação e incentivo.

A minha professora orientadora, Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette, por toda paciência, persistência e credibilidade depositada em mim e no meu trabalho.

Aos meus colegas da turma 2019.1, com os quais tive a oportunidade de compartilhar as alegrias e aflições desse processo. Em especial, a Suyanne Monteiro, minha grande amiga e dupla de mestrado, que me auxiliou em todas as etapas dessa pesquisa.

Aos meus amigos, que se mantiveram presentes e compreensíveis com minha ausência, sempre me apoiando. Em especial, a Reginaldo Lucas, que compartilhou das minhas maiores angústias e incertezas, sendo capaz de me acalmar e me encorajar para enfrentar todos os desafios.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a minha manutenção e conclusão do mestrado, principalmente em um período tão crítico.

Por fim, agradeço a todos os professores e colaboradores do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco.

RESUMO

A construção civil desempenha papel fundamental no país, contudo é responsável pela geração de resíduos e consumo de recursos naturais. Ademais, também é observado o excessivo consumo de plásticos pela sociedade, impactando o meio ambiente. Associado a essa problemática, o despreparo do espaço urbano promove a ocupação irregular de encostas. Assim, esse trabalho buscou avaliar o desempenho geomecânico de solo proveniente de área de risco, reforçado com resíduo da construção e demolição (RCD) e fibras de Polietileno Tereftalato (PET). A área de estudo está localizada em Olinda-PE. Nessa área foi realizada uma análise da dinâmica de ocupação e posteriormente, foram realizados ensaios físicos, químicos, mineralógicos e mecânicos para os compósitos de solo, RCD e fibras. Na análise da encosta foi verificado o aumento da mancha urbana (123%) e do solo exposto (42%), juntamente com a diminuição da vegetação (55%). O solo foi classificado como argilo arenoso, o RCD como areia bem graduada e as misturas como areias argilosas. Nos resultados da compactação foi observado que a adição de RCD promove o aumento da densidade seca máxima e uma redução da umidade ótima, enquanto que com a incorporação de fibras o comportamento é inverso. No ensaio de compressão simples, o comportamento seguiu basicamente um padrão para as diferentes idades, amostras compostas por fibra demonstram pontos de rupturas mais suaves, com maiores deformações, onde aos 60 dias de cura, a amostra de solo com 30% de RCD e 0,5% de PET demonstrou um aumento de resistência na ordem de 22,6%, alcançando o valor de 902,7 kPa. A análise estatística sugeriu a incorporações de 22,2%, de RCD e 0,8%, de PET para otimizar o valor da RCS até 906 kPa. Dessa forma, foi identificado que a incorporação de fibra e RCD incrementaram a resistência à compressão simples (RCS), promovendo o aprimoramento do comportamento do solo.

Palavras-chave: Construção Civil. Área de Risco. Resíduos. Fibras de PET.

ABSTRACT

Civil construction plays a fundamental role in the country, however it is responsible for the generation of waste and consumption of natural resources. Furthermore, the excessive consumption of plastics by society is also observed, impacting the environment. Associated with this problem, the unpreparedness of the urban space promotes the irregular occupation of slopes. Thus, this work sought to evaluate the geomechanical performance of soil from a hazardous area, reinforced with construction and demolition waste (RCD) and Polyethylene Terephthalate (PET) fibers. The study area is located in Olinda-PE. In this area, an analysis of the occupation dynamics was carried out and, later, physical, chemical, mineralogical and mechanical tests were carried out for the soil, CDW and fiber composites. In the analysis of the slope, an increase in urban sprawl (123%) and exposed soil (42%) was verified, along with a decrease in vegetation (55%). Soil was classified as sandy clay, RCD as well graded sand and the mixtures as clayey sand. In the results of compaction it was observed that the addition of RCD promotes an increase in the maximum dry density and a reduction in the optimum moisture content, while with the incorporation of fibers the behavior is inverse. In the simple compression test, the behavior basically followed a pattern for the different ages, samples composed of fiber demonstrate softer breaking points, with greater deformations, where at 60 days of cure, the soil sample with 30% RCD and 0 .5% of PET showed an increase in strength in the order of 22.6%, reaching the value of 902.7 kPa. Statistical analysis suggested incorporations of 22.2% of RCD and 0.8% of PET to optimize the RCS value up to 906 kPa. Thus, it was identified that the incorporation of fiber and RCD increased the resistance to simple compression (RCS), promoting the improvement of soil behavior.

Keywords: Civil construction. Risk Area. Waste. PET fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aglomeração urbana em encosta na cidade de Salvador/BA. 21
Figura 2 – Ocupação irregular de encosta no município de Olinda/PE. 22
Figura 3 – Construções irregulares próximas a corte de talude sem estrutura de contenção em Olinda/PE. 23
Figura 4 – Resíduos da Construção e Demolição em obra de médio porte na cidade do Recife/PE. 24
Figura 5 – RCD depositado de forma inadequada no município de Olinda/PE. 26
Figura 6 – Deposição irregular de resíduo da construção em encosta no município de Olinda/PE. 26
Figura 7 – Composição gravimétrica dos constituintes das amostras: (a) estrutura; (b) alvenaria; (c) acabamento; (d) demolição. 27
Figura 8 – Composição gravimétrica média dos RCD no Brasil. 28
Figura 9 – Produção global de plásticos de 1950 até 2015 em milhões de toneladas 31
Figura 10 – Fibras de PET em diferentes espessuras 35
Figura 11 – Mapa de localização da área de estudo 37
Figura 12 – Encosta de estudo após a ocorrência de deslizamento. 38
Figura 13 – Vegetação da cidade de Olinda-PE 41
Figura 14 – Médias pluviométricas mensais no período de 2010 a 2021 no município de Olinda 42
Figura 15 – Mapa de solos da cidade de Olinda-PE 44
Figura 16 – Mapa geológico da cidade de Olinda-PE 46
Figura 17– Metodologia de desenvolvimento da Pesquisa 49
Figura 18 – Solo sendo coletado da área de estudo 50
Figura 19 – Agregado reciclado 50
Figura 20 –Fibras de PET. 51
Figura 21 – Teores dos compósitos 52
Figura 22 – Sedimentação do solo 54
Figura 23 – Picnômetro na bomba à vácuo. 55
Figura 24 (a e b) – Espectrômetro de Fluorescência de Raios x 57
Figura 25 – Difratômetro 58
Figura 26 – Compactação da camada 59
Figura 27– Extração do corpo de prova 59

Figura 28 (a e b) – Controle tecnológico realizado nos corpos de prova 60
Figura 29 – Imagem aérea da área de estudo em 1975..... 64
Figura 30 – Imagem aérea da área de estudo em 1986..... 65
Figura 31 – Imagem aérea da área de estudo em 2009..... 65
Figura 32 – Imagem aérea da área de estudo em 2018..... 66
Figura 33 – Percentuais das áreas para os anos de 1975, 1986, 2009 e 2018 67
Figura 34 – Curvas Granulométricas..... 71
Figura 35 (a e b) –Análise mineralógica do solo com lupa binocular..... 75
Figura 36 – Análise mineralógica do RCD com lupa binocular 75
Figura 37 – Difratometria de raio X da fração do solo..... 79
Figura 38 – Difratometria de raioX da amostra de RCD..... 80
Figura 39 – Curvas do ensaio de compactação 81
Figura 40 – Comportamento da adição de RCD à matriz do solo nas curvas de compactação 82
Figura 41 –Comportamento da adição de fibras à matriz do solo nas curvas de compactação 82
Figura 42 – Corpo de prova rompido com plano de ruptura de 60º 83
Figura 43 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos para 7 dias de cura úmida..... 84
Figura 44 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos para 28 dias de cura úmida..... 84
Figura 45 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos para 60 dias de cura úmida..... 85
Figura 46 – Valores de resistência à compressão simples dos compósitos para os períodos de cura estudados. 86
Figura 47 – Taxa de crescimento das RCS dos compósitos para as diferentes idades..... 88
Figura 48 – Comportamento das amostras envolvendo fibra e agregado sob uma mesma perspectiva. 89
Figura 49 – Superfície de resposta para o modelo quadrático..... 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de áreas em m² e taxas de variação para os anos de 1975, 1986, 2009 e 2018 66
Tabela 2 – Matriz de probabilidade e consequência. 69
Tabela 3 – Percentual granulométrico. 72
Tabela 4 – Classificação dos Compósitos. 72
Tabela 5 – Densidade Real das amostras 74
Tabela 6 – Limites de Atterberg e classificação 74
Tabela 7 – Propriedades química do solo e do agregado reciclado 77
Tabela 8 – Principais elementos observados no ensaio de fluorescência de raios X do RCD e solo. 78
Tabela 9 – Úmidade ótima e densidades seca máxima 83
Tabela 10 – Parâmetros e intervalos das variáveis 89
Tabela 11 – Interações entre as variáveis 90
Tabela 12 – Variância das variáveis independentes 90
Tabela 13 – Modelo sintetizado 91
Tabela 14 – Previsão de teores das variáveis responsáveis por promover resposta otimizada 92

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
Cc	Coeficiente de curvatura
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal em Nível Superior
CBIC	Câmara Brasileira da Indúdtria da Construção
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONDEPE/ FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Cu	Coeficiente de uniformidade
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LACC	Laboratório Avançado de Construção Civil
LAGESE	Laboratório de Geologia Sedimentar
LL	Limite de Liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileto Tereftalato
PIB	Produto Interno Bruto
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
RSM	*Response Surface Methodology*
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SUCS	Sistema Unificado de Classificação Dos Solos
TRB	*Transportation Research Board*
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UPE	Universidade de Pernambuco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 Justificativa 19

1.2 Objetivo 20

1.2.1 Objetivo geral 20

1.2.2 Objetivo específicos 20

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1 Área de Risco 21

2.2 Resíduos da Construção e Demolição (RCD) 24

2.2.1 Geração e Caracterização dos Resíduos da Construção Civil 25

2.2.2 Impactos Ambientais 28

2.2.3 Aplicabilidade dos Resíduos Reciclados da Construção Civil (RCD-R) 29

2.3 Resíduos de Plástico: geração e impactos ambientais 30

2.4 Estabilização de solos 32

2.4.1 Reforço do solo com fibras 33

2.4.2 Fibras sintéticas recicladas: PET 34

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA 37

3.1 Localização 37

3.2 Características Socioeconômicas 39

3.3 Características fisiográficas do município 39

3.3.1 Vegetação 39

3.3.2 Clima 42

3.3.3 Relevo 42

3.3.4 Solo 43

3.3.5 Geologia 45

3.3.6 Hidrografia 47

4 MATERIAIS E MÉTODOS 48

4.1 Tipologia da Pesquisa 48

4.2 Programa Experimental 48

4.2.1 Solo 49

4.2.2 Agregado reciclado 50

4.2.3 Fibras de PET 51

4.2.4 Compósitos de solo, agregado reciclado e fibras de PET 51

4.2.5 Análise da dinâmica de ocupação da encosta **52**
4.2.5.1. Análise Temporal *52*
4.2.5.2. Análise de Risco *53*
4.2.6 Ensaios de Caracterização Física **54**
4.2.6.1. Granulometria *54*
4.2.6.2. Densidade real *55*
4.2.6.3. Limites de Atterberg *55*
4.2.7 Ensaios de Caracterização Química e Mineralógica **55**
4.2.7.1. Análise mineralógica com lupa binocular *56*
4.2.7.2. Análise Química *56*
4.2.7.3. Fluorescência de raio X *56*
4.2.7.4. Difração de raio X *57*
4.2.8 Ensaios de Caracterização Mecânica **58**
4.2.8.1. Compactação *58*
4.2.8.2. Resistência à Compressão Simples (RCS) *59*
4.2.9 Análise estatística dos resultados da RCS **61**
5 RESULTADOS **64**
5.1 Análise da dinâmica da ocupação da encosta **64**
5.1.1 Análise Temporal ***64***
5.1.2 Análise de Risco ***68***
5.2 Caracterização Física **71**
5.2.1 Análise Granulométrica ***71***
5.2.2 Densidade real ***74***
5.2.3 Limites de Atterberg ***74***
5.3 Caracterização Química e Mineralógica **75**
5.3.1 Análise mineralógica com lupa binocular ***75***
5.3.2 Análise Química ***76***
5.3.3 Fluorescência de raio X ***78***
5.3.4 Difração de raio X ***79***
5.4 Caracterização mecânica **81**
5.4.1 Compactação ***81***
5.4.2 Resistência à compressão simples (RCS) ***83***
5.5 Análise estatística dos resultados da RCS **89**
6 CONCLUSÕES **94**

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 97
REFERÊNCIAS 98

1 INTRODUÇÃO

A urbanização é uma tendência do mundo moderno e ganhou ênfase com o episódio da revolução industrial no século XX. Nesse período de transformação ocorreu um intenso processo de industrialização e crescimento urbano, eventos que estão altamente relacionados à redistribuição da população no território brasileiro, causas e consequências de profundas mudanças econômicas, políticas, sociais e até ambientais ocorridas no país (ARGUETA *et al*., 2021; CARVALHO, 2019; PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; VERDE *et al*., 2020).

A produção de resíduos é efeito natural do processo de urbanização, juntamente com o desenvolvimento econômico e o crescimento populacional. A atuação em conjunto desses fatores contribui para a crescente oferta de produtos e serviços, os quais estão diretamente e indiretamente relacionados com a geração de rejeitos (RODRIGUEZ; ZAMORA; PÉREZ, 2021). A quantidade produzida atinge níveis alarmantes, quando diante dos dados mais recentes disponíveis, a geração global de resíduos sólidos, em 2016, foi estimada em 2,01 bilhões de toneladas (KAZA *et al*., 2018).

A construção civil que desempenha papel fundamental no progresso da sociedade, como seu alto potencial de empregabilidade, atrelado a sua capacidade de viabilizar moradia e infraestrutura, é a atividade responsável pelo o desenvolvimento social e o fomento econômico do país. No Brasil, esse setor possui influência direta no PIB e compôs 50% dos investimentos nacionais na última década (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO–CBIC, 2020). Ainda com os impasses provenientes da pandemia, a expectativa de ascensão do PIB sobe para 4% e atinge o maior valor desde 2013 (CBIC, 2021).

Apesar das contribuições advindas desse campo, a indústria da construção civil também é considerada a origem de diversos impactos causados ao meio ambiente. Os efeitos danosos provenientes desse setor são resultantes do elevado consumo de recursos naturais e energia não renováveis, associados a alta geração de resíduos e sua deposição irregular, causando diversos prejuízos à sociedade que abrangem desde a qualidade de vida até a saúde pública (LEAL, 2021; NASCIMENTO, 2019; SILVA, 2018; TANG *et al*., 2020).

Em virtude desse cenário e em consequência de novas restrições ecológicas, surgem leis e normativas em busca de uma mudança de paradigmas no âmbito da construção civil, regulamentando acerca da gestão e do gerenciamento adequado dos resíduos, além de abordar sobre possíveis aplicabilidades para o seu reaproveitamento. Dessa forma, a legislação vigente atua prevendo a padronização de procedimentos, que conferem confiabilidade aos resultados, ao passo que estabelece critérios e diretrizes para promover o desenvolvimento sustentável.

Ainda dentro da esfera dos resíduos, foi encontrado no plástico um material que, na forma de resíduo, configura-se bastante nocivo à sociedade e ao meio ambiente, uma vez que se trata de um material de difícil degradação, possui utilização em larga escala e modo de descarte inadequado (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014; RHODES, 2018).

O Polietileno tereftalato (PET), uma das espécies mais difundidas de plástico, apesar de apresentar característica 100% reciclável, consiste ainda em uma possibilidade pouco praticada no país, onde de acordo com o último censo da Associação Brasileira da Indústria do PET (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET –ABIPET, 2019), a taxa de reciclagem atual desse produto ainda encontra-se em 55%. Embora verifique um baixo índice de reciclagem, esse valor representa um crescimento, quando comparado com o censo anterior, o que reflete o fortalecimento da economia circular, aspecto que incentiva ainda mais o investimento em alternativas de reciclagem e reutilização desse material.

Contudo, os desafios oriundos da urbanização vão além da problemática dos resíduos. O crescimento populacional e sua aglomeração nos centros urbanos, provocam inconvenientes multidimensionais, como no plano econômico, socioambiental e de infraestrutura. O despreparo da sociedade para atender a demanda de uma expansão urbanística que vivencia um modelo de desenvolvimento incompatível com os preceitos atuais, conduz essa parcela da população a se estabelecer em áreas impróprias e consideradas de risco (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, 2016).

Associado a esse contexto, verifica-se uma certa indisponibilidade de áreas com solos que possuam características satisfatórias para a realização de obras de engenharia. Essa carência abre espaço para o desenvolvimento de técnicas que visem a melhoria das propriedades do

solo (SILVA, 2018; YARBAŞI; KALKAN, 2020). Assim, a estabilização de solos aparece como um excelente artifício, que por meio da incorporação de alguns materiais no solo, permite conferir o reforço necessário para torná-lo estável e passível de construções.

Alinhando essas informações, a reutilização dos resíduos da construção civil, associado à adição de fibras de PET, surge como uma alternativa compatível para o reforço de solo, à medida que configura uma destinação ambientalmente adequada desses resíduos. A aplicação de fibras poliméricas com esse intuito é uma prática amplamente utilizada, principalmente as fibras de PET, que possui alta densidade, rigidez e resistência (SANTOS *et al*., 2019).

1.1 Justificativa

Os efeitos decorrentes do avanço tecnológico global e da crescente expansão urbana acarretam diversos prejuízos, os quais alcançaram níveis críticos nos últimos anos com a alta geração de resíduos, elevada deposição irregular, escassez de recursos naturais e a ocupação desordenada de áreas de risco. Esses aspectos afetam diretamente o meio socioambiental, interferindo na saúde da sociedade, no seu bem-estar, no meio ambiente e vão de encontro a limitações jurídicas (AMARAL; LOPEZ, 2018; ARGUETA *et al*., 2021; PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; SONG; LI; ZENG, 2015). Os aspectos supracitados, assim como suas consequências, são expressivamente observados na área estudada.

A insuficiência de medidas que solucionem esse impasse, em função de sua dimensão, incentiva o estudo e o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para a destinação desses resíduos e melhoramento dessas áreas. Existem diversas técnicas que promovem a melhoria das características do solo, assim como inúmeras possibilidades para o reaproveitamento dos resíduos sólidos.

Contudo, dentre os métodos mais empregados para ambas as atividades, foi encontrado na técnica de estabilização do solo uma solução articulada, que compatibiliza a reciclagem dos resíduos da construção civil e o reaproveitamento dos plásticos PET’s, com aplicação no reforço de solo proveniente de área de risco.

Nesse contexto, é constatada a importância da inclusão dos materiais reciclados na própria cadeia produtiva e a relevância social de recuperar solos de áreas em situações de fragilidade. Diante dessa conjuntura, a seleção da área de estudo foi feita em consequência do seu estado precário, após deslizamento em 2019, demonstrando aparente instabilidade, e a escolha dos materiais foi realizada conforme sua disponibilidade e seu alto índice de descarte.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento geomecânico de solo proveniente de uma encosta situada no município de Olinda-PE, após a adição de resíduo da construção civil e fibras de Polietileto Tereftalato (PET).

1.2.2 Objetivo específicos

- Analisar a dinâmica de ocupação da encosta localizada no município de Olinda-PE;
- Verificar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais e das misturas;
- Identificar a composição química e mineralógica do solo e do resíduo da construção civil;
- Identificar o teor ideal dos compósitos, através de análise estatística, para o aprimoramento do comportamento do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão abordadas informações acerca de áreas em situações de risco, da geração, caracterização, dos impactos ambientais e aplicações dos resíduos da construção e demolição (RCD), bem como acerca do ciclo de vida dos materiais plásticos, além de desenvolver sobre a técnica de estabilização de solos, e por fim, expor as características de algumas fibras.

2.1 Área de Risco

O padrão da expansão da mancha urbana e da concentração de contingente populacional causaram mudanças significativas na estrutura das cidades, abrangendo o âmbito físico, social, econômico e ambiental (SANTOS, A., 2020). A ocupação desigual dos centros urbanos teve como uma de suas consequências, o assentamento de parcela da população em áreas vulneráveis (Figura 1), consideradas de risco e, consequentemente, inadequadas para a acomodação de moradias (BARBOZA; BEZERRA NETO; CAIANA, 2020; UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, 2016; VERDE *et al*., 2020).

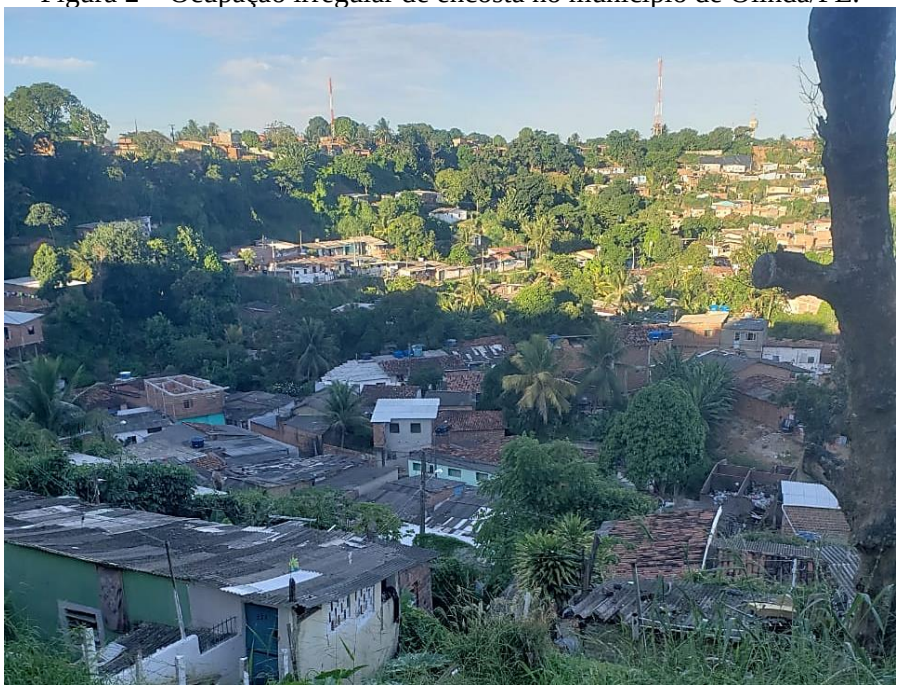
Figura 1 – Aglomeração urbana em encosta na cidade de Salvador/BA.

Fonte: Arquivo pessoal.

Essas áreas geralmente são localizadas em encostas (Figura 2), regiões de taludes com inclinação elevada, e tendem a acomodar a parcela mais humilde da sociedade, que possui baixo poder aquisitivo e por falta de opção buscam se abrigar em locais economicamente

acessíveis, apesar de geotcnicamente inseguros. Assim, a população ocupante dessas áreas está diretamente exposta ao risco de fenômenos de ordem geológica.

Figura 2 – Ocupação irregular de encosta no município de Olinda/PE.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2017), afirma que as áreas consideradas urbanas no Brasil configuram menos de 1% do território nacional (0,63%), porém acomodam 84,3% da população brasileira, concentrando uma totalidade de 160 milhões de pessoas (FARIAS *et al*., 2017).

De acordo com a base de dados lançada pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2018), em cooperação com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), utilizando dados do censo de 2010, estimou 8,3 milhões de pessoas em áreas de risco no país, onde 20,3% dessas pessoas moravam em aglomerados subnormais, compondo 1,7 milhões de moradores.

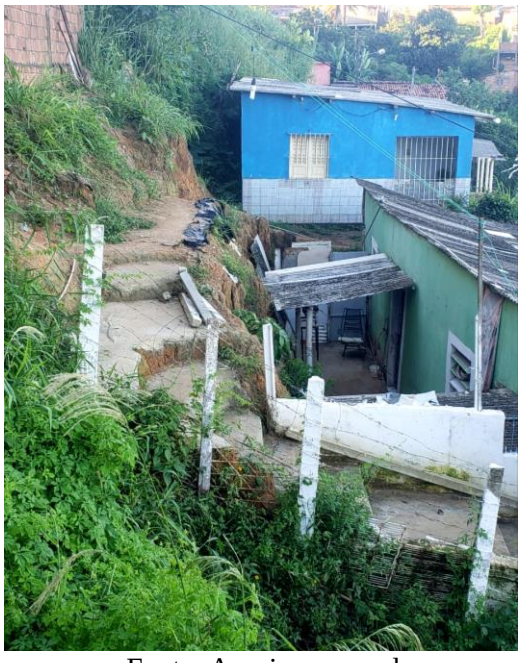
A ação antrópica na ocupação de áreas íngremes, como é o caso de encostas, pode alterar as características naturais do local, modificando a área e tornando-a mais suscetível a dinâmica natural de deslizamentos e desastres (SANTANA; LISTO, 2018). Os fatores que influenciam a ocorrência desses processos estão naturalmente relacionados com o tipo do solo, a

geomorfologia do local, devido sua declividade natural, a presença de vegetação, de água e a mudança climática (LEITE; PINHEIRO; PAMBOUKIAN, 2019).

São diversos os fatores relacionados com os processos de instabilidade de uma encosta que podem ser intensificados com o uso e a ocupação inadequados da área. Atividades como a retirada da cobertura vegetal, além de reduzir a proteção do solo contra as mudanças bruscas de temperatura, impede que ocorra a interceptação das precipitações, não permite a criação de caminhos preferenciais de escoamento, não ajuda a equalizar a poropressão, aumentando a umidade, diminuindo a coesão aparente e a tensão efetiva, além de retirar o reforço do solo fornecido pelas raízes (GERSCOVICH, 2016; LEITE; PINHEIRO; PAMBOUKIAN, 2019).

Ademais, outras práticas como cortes e aterros, deposição irregular de resíduos, alteração da drenagem e construções de moradias (Figura 3), acentuam a fragilidade desses taludes. Essas ações interferem diretamente no comportamento do solo, pois dentre os impactos causados, estão o aumento da variação de peso em uma área sensível e vulnerável, além da mudança de sua geomorfologia, alcançando formas ainda mais instáveis (CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS–CEMADEN, 2016; GOMES *et al*., 2021).

Figura 3 – Construções irregulares próximas a corte de talude sem estrutura de contenção em Olinda/PE.



Fonte: Arquivo pessoal.

Diante dessas condições, a sociedade assume, simultaneamente, papel de sujeito exposto e agente causador do risco dessas áreas em situação de vulnerabilidade. De modo que, Tominaga (2007) afirma que a ocupação urbana indiscriminada de áreas de risco, sem planejamento adequado e sem adoção de técnicas de estabilização, promove a ocorrência de acidentes, os quais, ocasionalmente, atingem dimensões de desastres.

2.2 Resíduos da Construção e Demolição (RCD)

Os resíduos da construção e demolição (RCD) são identificados como os materiais descartados resultantes das atividades que envolvem construção, reformas e/ou demolições (SOUZA *et al*., 2019; WU; YU; SHEN, 2017). A Resolução nº307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002), ratifica que os resíduos da construção civil são materiais provenientes de obras em geral, bem como resultantes da preparação e escavação de terrenos (Figura 4).

Figura 4– Resíduos da Construção e Demolição em obra de médio porte na cidade do Recife/PE.

Fonte: Arquivo pessoal.

Ainda no âmbito dessa resolução nº 307, os resíduos são separados em classificações que permitem e facilitam uma segregação eficiente e uma posterior destinação adequada. Os resíduos inclusos na classe A são os mais interessantes na ótica do aproveitamento, pois são identificados como reutilizáveis ou recicláveis na forma de agregados (BRASIL, 2002).

Os resíduos classe B, apesar de ainda serem considerados recicláveis, são apenas utilizados para outras destinações. Já os de classe C, são aqueles resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias viáveis que justifiquem sua reciclagem ou recuperação. Por fim, existe a classe D, que constitui os resíduos perigosos (BRASIL, 2002).

Wu, Yu e Shen (2017) ressaltam que os resíduos da construção civil ainda podem ser classificados em materiais inertes, por serem compostos não poluentes e não reagirem quimicamente, como também em materiais não inertes, os quais podem se envolver em reações químicas mesmo em condições normais.

Assim, os resíduos pertencentes as classes A e B estão inseridos na classificação II-B, estabelecida pela NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2004), que os definem como inertes, tornando-os materiais atrativos para reciclagem de modo geral.

2.2.1 Geração e Caracterização dos Resíduos da Construção Civil

Os resíduos da construção civil constituem um problema mundial, com uma estimativa que atinge mais de 3 bilhões de toneladas anualmente, com base em diversos países (AKHTAR; SARMAH, 2018). No Brasil, essa produção de resíduo é superior a 44,5 milhões t/ano, e apesar de ser um valor com estimação variável, esse material representa a maior parte dos resíduos sólidos urbanos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE, 2020; ABRELPE, 2018/2019).

No montante referente ao total de resíduos sólidos urbanos no Brasil, o valor registrado corresponde a um índice de 92,00 % de cobertura de coleta, evidenciando uma quantidade em torno de 6,3 milhões de toneladas de resíduos que não foram contabilizados (ABRELPE, 2018/2019). Os dados disponibilizados intensificam a preocupação com a quantidade dos resíduos, visto que, além de serem elevados, representam apenas uma parcela do total existente.

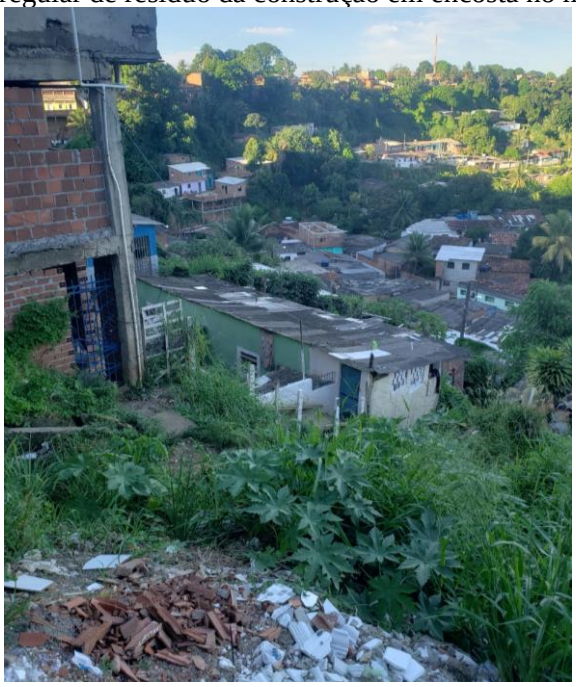
Ao entrar no tocante a deposição irregular dos resíduos sólidos a situação é ainda mais agravante, quando observamos que apenas pouco mais da metade dos resíduos coletados

(59,5%), são depositados em locais adequados, o que totaliza em mais de 29 milhões de resíduos despejados em áreas inapropriadas (Figura 5 e Figura 6), que não possuem um sistema adequado de tratamento e medidas para proteger o meio ambiente e a saúde da sociedade contra danos e degradações (ABRELPE, 2018/2019).

Figura 5 – RCD depositado de forma inadequada no município de Olinda/PE.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6 – Deposição irregular de resíduo da construção em encosta no município de Olinda/PE.



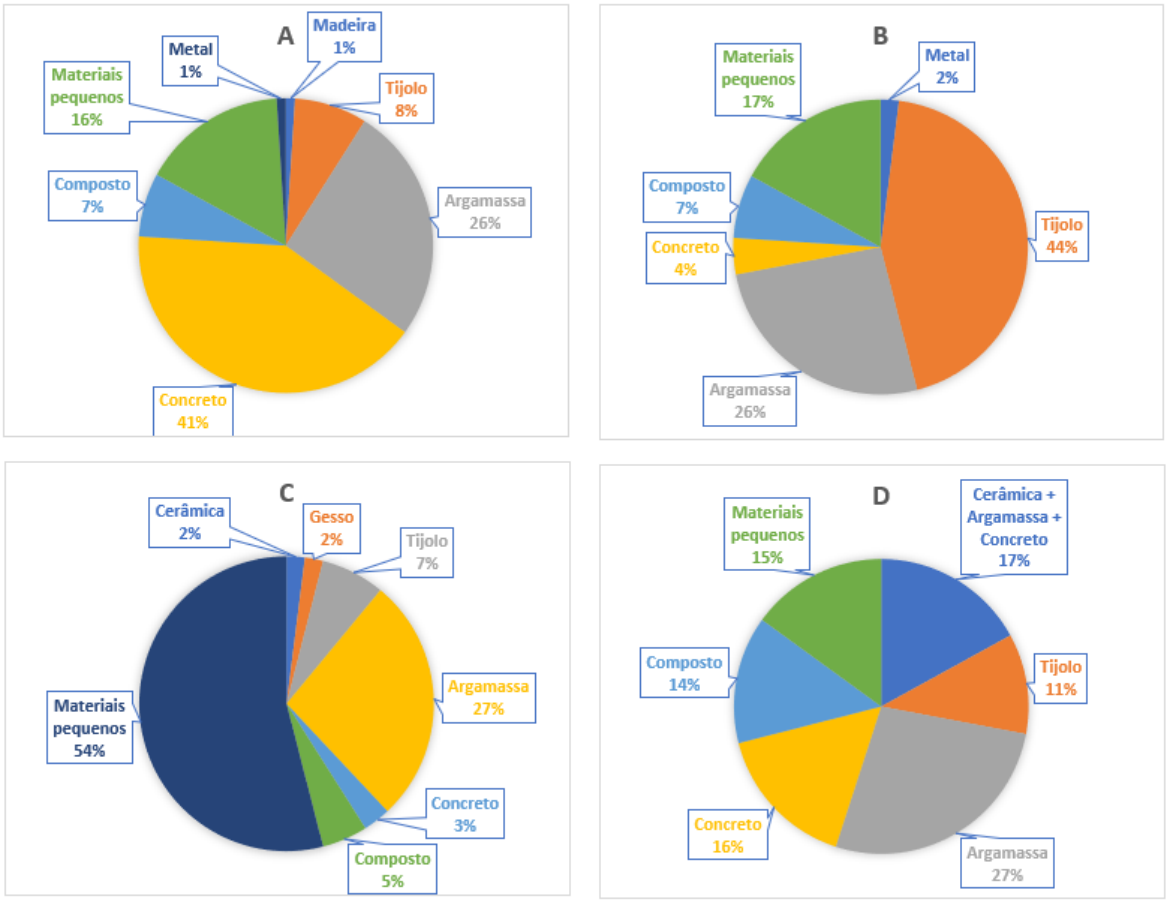
Fonte: Arquivo pessoal.

Dentro de toda essa geração de resíduos sólidos urbanos, a contribuição dos resíduos provenientes da construção e demolição é bastante significativa, representando quase 60%

desse universo, com uma estimativa de 44,5 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2018/2019). Nessas condições, os RCD's se encontram em posição de destaque dentre os materiais que mais precisam de formas alternativas para sua destinação.

O máximo reaproveitamento dos resíduos só é possível mediante sua caracterização física e química, permitindo a identificação do seu potencial de uso e sua forma de destinação (FERREIRA *et al*., 2019; GARCEZ *et al*., 2020). Uma vez que as características dos RCD's diversificam de acordo com múltiplos aspectos, como o estágio da obra que são provenientes, o tipo de obra realizada, a região onde está sendo executada a construção ou a demolição e a qualificação da mão de obra empregada. Lafayette *et al*. (2018) apresenta em seu trabalho a composição gravimétrica de RCD constituintes das amostras A, B, C e D, referentes a etapa de estrutura, alvenaria, acabamento e demolição, respectivamente (Figura 7).

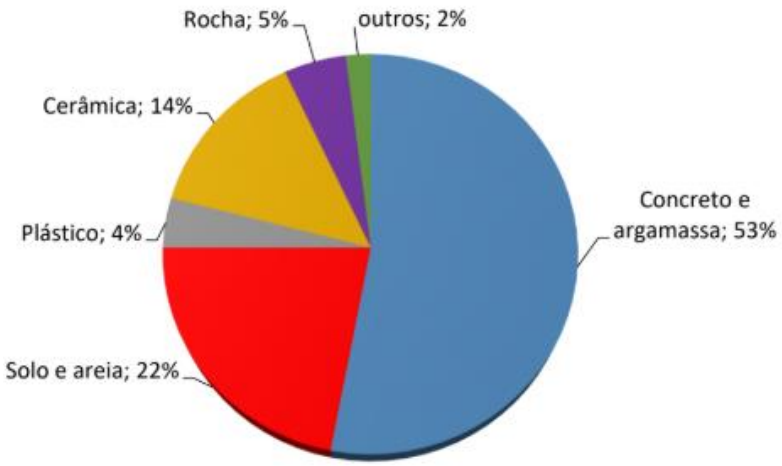
Figura 7 – Composição gravimétrica dos constituintes das amostras: (a) estrutura; (b) alvenaria; (c) acabamento; (d) demolição.



Fonte: Adaptado Lafayette *et al*. (2018).

De acordo com Nascimento (2019, p.24), os RCD's constituem "um material heterogêneo composto por concreto, alvenaria, argamassa, madeira, papel, plásticos, metais (incluindo o aço), solos de escavação, dentre outros a depender do tipo e etapa da obra". Assim, Nagalli (2014) elaborou uma composição gravimétrica média dos RCD's no Brasil (Figura 8). Esse conhecimento prévio do tipo do resíduo auxilia na escolha de sua destinação e na determinação de sua forma de reaproveitamento (NASCIMENTO, 2019).

Figura 8 – Composição gravimétrica média dos RCD no Brasil.



Fonte: Nagalli (2014).

2.2.2 Impactos Ambientais

Os impactos ecológicos são gerados desde as sociedades primitivas, contudo não eram considerados significativos, diante de uma pequena quantidade de resíduos gerados e uma rasa assimilação ambiental. Com o avanço tecnológico e, consequentemente, o adensamento urbano, houve uma intensificação na produção de resíduos, aspectos que motivaram a preocupação com o meio ambiente (GARCEZ *et al*., 2020).

Sendo a indústria da construção civil um seguimento com forte influência na sociedade de modo geral, é compreensível que os resíduos provenientes desse setor componham a maior parte dos resíduos sólidos urbanos. Assim, nos últimos anos, uma literatura crescente abordou os impactos ambientais e econômicos dos setores de construção e demolição, tendo como foco especial sua produção, gerenciamento e destinação (GHISELLINI; RIPA; ULGIATI, 2018).

De acordo com Paschoalin Filho, Duarte e Faria (2016), “os resíduos produzidos em uma construção podem representar um significativo passivo ambiental, caso estes não sejam devidamente manejados e destinados”. Os resíduos irregulares causam impactos de ordem estética, poluindo o visual, ambiental, degradando o meio ambiente, econômica, com os custos atribuídos ao seu manejo e destinação, de ordem social, afetando o bem-estar da sociedade, alcançando à saúde pública, com proliferação de vetores e doenças (STRAPASSAO *et al*., 2019).

Assim, surge a busca pelo desenvolvimento sustentável, que possui o intuito de alinhar o desenvolvimento socioeconômico sem comprometer o meio ambiente. A implicação imediata desse desenvolvimento, baseia-se na busca pelo aumento da produção de bens, juntamente com a redução do uso de recursos naturais e minimização da poluição, desvinculando o avanço econômico da geração de impactos ambientais (AKHTAR; SARMAH, 2018; GARCEZ *et al*., 2020).

2.2.3 Aplicabilidade dos Resíduos Reciclados da Construção Civil (RCD-R)

Os resíduos da construção e demolição são considerados um fluxo prioritário pela União Europeia, devido ao seu significativo nível de geração e seu alto potencial de reciclagem (BORGHI; PANTINI; RIGAMONTI, 2018). Assim, o reaproveitamento desses resíduos na forma de materiais reciclados tem sido apontado como uma das alternativas mais convenientes para sua destinação, uma vez que após o processo de beneficiamento, as características apresentadas são compatíveis com sua incorporação no próprio ciclo produtivo da engenharia.

É possível transformar resíduos de construção em materiais de alta qualidade, materiais de construção, como agregados reciclados para diversos usos (ALTSCHUL; OLIVEIRA; NÓBREGA, 2020). A reciclagem do RCD é uma realidade comprovada por diversas pesquisas na área, que verificam e validam sua utilização.

Nesse sentido, é observado o uso do RCD na fabricação de tijolos cerâmicos (MATUTI; SANTANA, 2019), na produção de concreto (ULLOA-MAYORGA *et al*., 2018), na pavimentação (ARTUSO; LUKIANTCHUKI, 2019; BARRETO; AMORIM, 2020), em

sistema de cobertura final de aterros (NASCIMENTO, 2019; OLIVEIRA; BRAGA, 2017) e no reforço de solo (SANTOS, M., 2020; SILVA, 2020; SULUGURU *et al*., 2019).

Em escala mundial, o reaproveitamento do RCD também é considerado um tema relevante. A fim de alcançar a sustentabilidade no setor construtivo, países da União Europeia, da Escandinávia, Canadá e EUA, entre outros, têm buscado alternativas capazes de mitigar os impactos ambientais, sociais e econômicos dos problemas relacionados aos resíduos provenientes das atividades de construção e demolição. Assim, a União Europeia é representada por uma taxa de reciclagem de RCD na ordem de 70%, a qual sobe para mais de 80% no caso da Bélgica e da Holanda. Na Alemanha, ainda em 2002, a taxa de reaproveitamento já era acima dos 85% (FREITAS, 2018).

Contudo, mesmo diante do animador cenário externo, no Brasil, de acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil – ABRECON, dentro dos 84 milhões de metros cúbicos de RCD produzidos por ano, apenas 17 milhões, ou seja, cerca de 20% são reciclados. A vista disso, é verificado, no âmbito interno, o excelente potencial de crescimento para estudos e empreendimentos orientados para o reaproveitamento de RCD (FREITAS, 2018).

Dessa forma, as técnicas que visam à reutilização e o reaproveitamento de determinados resíduos ganham destaque, uma vez que desenvolvem um novo compósito, como fonte de matéria prima, onde se destaca a redução de custos nos processos envolvidos (FRANCISCO, 2017; GARCEZ *et al*., 2020; MEDEIROS JUNIOR; BALESTRA; LIMA, 2017), além da preservação do meio ambiente.

2.3 Resíduos de Plástico: geração e impactos ambientais

Há décadas o uso de produtos plásticos é bastante difundido no mundo em função de sua versatilidade. Esses produtos apresentam características excelentes como material leve, resistente, inerte e de excelente durabilidade. Contudo, a crescente demanda por esse material configura uma das raízes do problema da geração desses resíduos, onde sua fabricação no século XXI equivale ao volume produzido nos últimos 50 anos e as projeções indicam para a

presença de 550 milhões de toneladas desse material em 2030 (RODRIGUEZ; ZAMORA; PÉREZ, 2021; VASCONCELOS, 2019).

A alta geração dos resíduos plásticos é efeito direto da elevada produção desse tipo de material, sem a preocupação ambiental adequada com sua destinação final. A fabricação dos plásticos superou a da maioria dos outros materiais criados pelo homem, nos últimos anos. Atualmente, os dados apontam para um acúmulo aproximado de 8300 milhões de toneladas de plásticos virgens, dos quais cerca de 60% foram descartados e estão acumulando em aterros sanitários ou no ambiente natural, como observado na Figura 9 (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Figura 9 – Produção global de plásticos de 1950 até 2015 em milhões de toneladas

Fonte: Geyer, Jambeck e Law (2017).

Dentre os principais tipos de plástico, o PET ocupa a posição mais crítica, por se encontrar em maior quantidade no volume de resíduos plásticos coletados no país, atingindo o valor de 3,2 mil toneladas em 2018, correspondente a 28,37% do volume total coletado nesse ano, conforme o Anuário da Reciclagem de 2017/2018 (ABRELPE, 2018/2019).

Os impactos relacionados ao uso dos plásticos, com destaque para os tipos PET’s, que são os mais utilizados pela população em geral, manifestam-se em degradação ambiental, a qual é causada desde a forma de produção desses materiais, até a sua destinação inadequada (DIAS, 2016; RHODES, 2018; RODRIGUEZ; ZAMORA; PÉREZ, 2021).

Nesse contexto, é observada a poluição dos ecossistemas a partir da emissão de gases durante a fabricação desse produto, bem como durante a incineração dos seus resíduos, promovendo o efeito estufa, na contaminação do ambiente marinho e de águas doces, com lançamento de rejeitos nos oceanos e rios, com possíveis danos à saúde pelas substâncias componentes desse material. Ademais, o descarte irregular pode ainda causar o bloqueio de sistemas de drenagem, causando prejuízos econômicos, estéticos e de bem estar (DIAS, 2016; RHODES, 2018).

Assim, nos últimos anos, a reciclagem de polímeros sintéticos abandonou a ideia de ser apenas uma opção de progresso econômico, que visava somente redução de custos, e passou a assumir responsabilidade social e ambiental compartilhada (MACEDO *et al*., 2020). Dessa forma, é identificada a relevância do desenvolvimento de pesquisas que designem alternativas sustentáveis para a destinação desses resíduos.

2.4 Estabilização de solos

O solo natural pode não apresentar características técnicas suficientes para atender as exigências de projeto e as especificações normativas, que o classificam como local passível de construções (SANTOS; CRISPIM; PAULO, 2018; YARBAŞI; KALKAN, 2020). Em busca do aproveitamento dessas áreas indisponíveis para ocupação, surge a necessidade de melhoramento desses solos com baixa capacidade de suporte (QUARIGUASI *et al*., 2018).

Dentre as técnicas de melhoramento, o método de estabilização consiste no processo de melhoria das condições do solo natural, modificando suas características e fornecendo melhor desempenho por meio do ganho de resistência, aprimorando o seu comportamento (SAGRILO *et al*., 2017).

Esse método pode ser dividido em duas classes: física e química. A estabilização física, fundamenta-se no aprimoramento das propriedades originais mediante a alteração da densificação do solo por esforços mecânicos, como é o caso da compactação, ou através da adequação da granulometria com a mistura de outros solos, o que permite a relação mais efetiva de grão com grão (CASTRO *et al*., 2019; SILVA, M., 2016).

Na estabilização química o aperfeiçoamento das propriedades solo é baseado no processo de reações químicas que ocorre entre os materiais. O procedimento envolve a incorporação de compostos no solo, denominados de aditivos químicos, visando a melhoria de suas características e consequentemente, o seu reforço. Para isso, os aditivos frequentemente utilizados englobam os cimentos, a cal e alguns polímeros industriais (CASTRO *et al*., 2019; ROCHA; REZENDE, 2017; SILVA, M., 2016).

Embora as formas para estabilizar o solo possam ser executadas de modo isolado, o comum seja a combinação de dois ou mais métodos (BRITO; PARANHOS, 2017). Dessa forma, a seleção dos métodos adotados ainda de acordo com Brito e Paranhos (2017, p. 429) “depende do tipo e das propriedades do solo disponível, da finalidade de aplicação do solo, das exigências de projeto e da viabilidade técnica e econômica das opções disponíveis”.

2.4.1 Reforço do solo com fibras

O reforço do solo é amplamente adotado para melhorar inúmeras de suas propriedades mecânicas e físicas. O uso das fibras naturais e artificias, para essa finalidade, é um método eficaz e seguro para aprimorar diversas características do solo, como sua resistência ao cisalhamento, compressibilidade, rigidez e estabilidade volumétrica. Sendo assim, essa técnica é aplicada a uma variedade de práticas pertinentes à engenharia civil, a exemplo de estruturas de contenção, camadas estruturais de pavimentos, construção de aterros e até na estabilização de taludes (LUCARELLI, 2018; NDEPETE; SERT, 2016; YARBAŞI; KALKAN, 2020).

A incorporação de elementos mais resistentes à tração numa matriz de solo é uma técnica há muito tempo conhecida e empregada pela humanidade, onde há vestígios de sua utilização pelas antigas civilizações, através da adição de fibras naturais para melhorar as propriedades geotécnicas dos solos em aplicações como muralhas, pavimentos e tijolos (ROCHA, 2019).

Contudo, diante do avanço tecnológico e do desenvolvimento de várias pesquisas na área, atualmente, já se tem conhecimento de diversos tipos de fibras. De modo geral, dentre as fibras existentes mais utilizadas, é possível classificá-las em quatro grupos: as naturais,

artificiais também conhecidas como poliméricas ou sintéticas, as minerais e as fibras recicladas (ROCHA, 2019).

A escolha do tipo de fibra a ser utilizado deve considerar as características referentes a cada material, tanto em relação as fibras como ao solo no qual serão inseridas, e assim, conhecer o mecanismo de interação matriz com reforço, de modo a não comprometer o desempenho do conjunto. Nesse sentido, aspectos como a quantidade em proporção da mistura, comprimento, espessura e vida útil das fibras devem ser considerações relevantes quando se objetiva alcançar elevação do desempenho dos compósitos fibras-solo.

Inicialmente, a técnica utilizada no reforço do solo com fibras era evidenciada pela sua inclusão discreta e ordenada. Ao longo do tempo foi observado que a alta resistência à tração através da adição de fibras, proveniente da relação material compósito, apesar de conferir reforço ao solo ao enfrentar esforços externos, provocava uma tendência de movimento diante dessas solicitações (KHATRI; DUTTA; KATRE, 2017; ROCHA, 2019).

A fim de melhorar a força do cisalhamento e o comportamento de assentamento do solo, a distribuição desordenada promove a capacidade de interceptar a zona potencial de ruptura, melhorando assim o comportamento tensão-deformação do solo. Além disso, a mobilização da resistência à tração das fibras aumenta a deformação de ruptura, fazendo com que a amostra de solo rompa de maneira dúctil (KHATRI; DUTTA; KATRE, 2017).

Dessa forma, segundo Roque (2017, p.14), “o uso de fibras, tanto naturais como sintéticas, apresenta-se como uma técnica promissora no melhoramento de alguns parâmetros do solo”. Uma vez que o solo consiste em um material bastante utilizado pelo homem em suas construções e nem sempre apresenta as características necessárias ao tipo de obra para a qual pretende ser destinado (ROQUE, 2017; YARBAŞI; KALKAN, 2020).

2.4.2 Fibras sintéticas recicladas: PET

Há diversos métodos de melhoria do solo com o intuito de aprimorar suas propriedades de engenharia, entre os quais, o reforço por fibras sintéticas pode ser considerado bastante eficaz, devido à sua relação de custo benefício e fácil adaptabilidade (WOUATONG *et al*., 2017).

De acordo com Senez (2016), por se tratar de um material confeccionado pelo homem, as fibras sintéticas, também conhecidas como poliméricas, são materiais passíveis de modificações, como a alteração de sua estrutura química. Tal aspecto confere outros benefícios a esse material, como a produção de fibras não degradáveis, com excelentes propriedades mecânicas, além de quimicamente neutras e não prejudiciais à saúde.

Os polímeros são materiais atraentes no melhoramento de solo por possuírem ductilidade e boa resistência à tração, além de apresentar alta versatilidade. Quando empregados na forma de compósitos, constituídos pela interação matriz e fibra, promove a potencialização da rigidez, da ductilidade, diminuição da fragilidade e ampliação da capacidade de absorção de energia de deformação, propriedades mecânicas que são necessárias para a aplicação em reforço de solo (GOMES, 2018).

As fibras poliméricas são consideradas as mais promissoras para o reforço de solos, quando observadas a partir da ótica das características ideais que se deseja alcançar em um material compósito. Ao analisar o uso dessas fibras em elementos como concreto, argamassa e solo, a utilização das fibras de poliéster, especificamente o Polietileno Tereftalato (PET) (Figura 10), merece um destaque especial dentre os polímeros por apresentar alta densidade, rigidez e resistência (GOMES, 2018).

Figura 10– Fibras de PET em diferentes espessuras

Fonte: Arquivo Pessoal.

Assim, pesquisas desenvolvidas acerca das fibras de PET ratificam o uso desse material no melhoramento dos parâmetros do solo. De modo que o trabalho de Gomes (2018) identificou o aumento da resistência à tração máxima do compósito, além do retardamento da abertura de fissuras e a redução de sua magnitude. Freitas *et al*. (2021) e Lucarelli (2018) observou desempenho superior do solo com fibras em relação ao solo puro, no que concerne à resistência. Louzada, Malko e Casagrande (2019) também obtiveram melhoria das propriedades do solo, com resultados que apresentaram maiores capacidade de carga.

Dessa forma, segundo Louzada, Malko e Casagrande (2019), diante dos resultados observados nos compósitos após a incorporação das fibras e em pesquisas desenvolvidas no âmbito do reforço de solo, o novo material geotécnico formado pode ser designado para diversas aplicações na engenharia, bem como para a estabilização de taludes.

Ademais, o PET é uma das espécies de plástico mais produzidas no planeta, onde após o seu uso os resíduos são geralmente descartados em aterros sanitários, inserindo esse material no contexto atual das questões ambientais. Assim, alto potencial de reciclagem e/ou reutilização inerente a esse resíduo incentivam o desenvolvimento e a aplicação de alternativas que visem minimizar esse passivo ambiental, como é o caso da sua aplicação no reforço de solo através das fibras (LOUZADA; MALKO; CASAGRANDE, 2019; LUCARELLI, 2018).

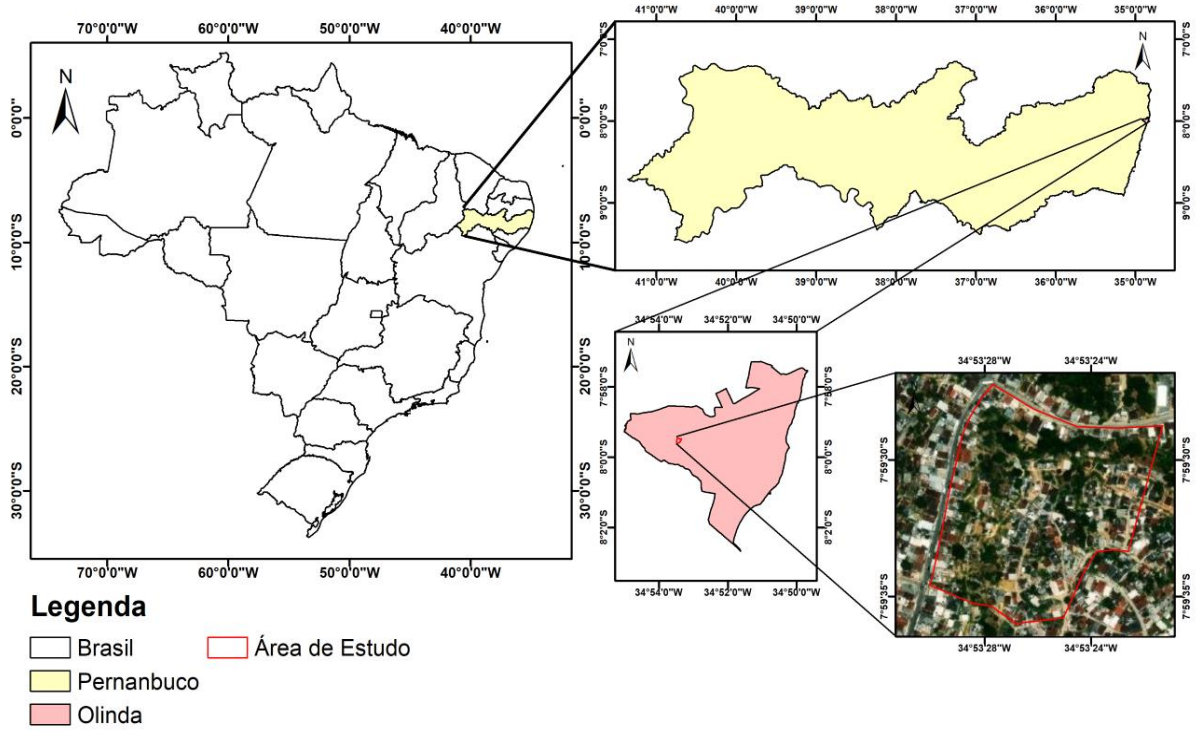
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Nesse capítulo serão abordadas informações acerca da localização da área, das características socioeconômicas e das características fisiográficas, como a vegetação, clima, solo, hidrografia e geologia.

3.1 Localização

A área selecionada para o estudo está situada no bairro de Sapucaia, sob as coordenadas 34º 59’ 33” e 7º 50’ 33”W, na cidade de Olinda-PE (Figura 11), a qual configura a terceira maior cidade do estado de Pernambuco, pertencente a região Nordeste do país (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA, 2019).

Figura 11– Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

A extensão territorial da cidade é de 43, 55 km², onde 9,73km² pertence às Zonas Especiais de Proteção Cultural e Urbanística (ZEPEC), subdividida em ZEPEC 1 (Sítio histórico), com 1,89 km², e na área de seu entorno, com 7,84 km². O município possui cerca de 98% de área

urbanizada, caracterizando-o como eminentemente urbano (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA, 2019).

O bairro Sapucaia dispõe de 0,87 km² de área total, contendo 15.024 habitantes e sendo integrante da 2ª Região Político-Administrativa – RPA 2. O bairro em questão é composto por duas regiões, denominadas de Sapucaia de dentro e Sapucaia de Fora, as quais compartilham características semelhantes de povoamento, como a presença de comunidade de baixa renda, ocupando de forma desordenada áreas consideradas de risco (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA, 2019).

A encosta estudada (Figura 12) foi vítima de um deslizamento no primeiro semestre do ano de 2019, o qual provocou a destruição de uma casa e deixou um dos seus moradores ferido. O acidente ocorrido é considerado efeito do processo de ocupação desordenada da área, associado ao episódio de fortes chuvas, característico do período estacional de inverno (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; TARDIN, 2019).

Figura 12– Encosta de estudo após a ocorrência de deslizamento.

Fonte: Arquivo pessoal.

Diante desse cenário, a defesa civil do município de Olinda realizou a interdição da casa em questão e de mais cinco moradias próximas, com base no risco de acidente futuros. Ademais, outros fatores observados contribuíram para o deslizamento da encosta, como a grande quantidade de lixo e o cultivo de bananeiras (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020; TARDIN, 2019).

Devido à falta de recursos financeiros, várias famílias do bairro são levadas a ocupar de forma desordenada, locais que não oferecem o mínimo de infraestrutura, contribuindo para o aumento do risco de acidentes. A ação antrópica nas áreas de encostas tem sido um fator determinante para a ocorrência de incidentes como esse.

3.2 Características Socioeconômicas

A economia do município de Olinda está intimamente ligada ao turismo cultural, quando observada a partir das proximidades do centro histórico, e especialmente relacionada ao comércio local, quando acompanhada de áreas mais afastadas, nos arredores da cidade, com bairros que acomodam aglomerados subnormais, como é o caso do bairro de Sapucaia.

De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017), essa região possui apenas 21,7% de sua população economicamente ativa, com renda média mensal de 1,7 salários mínimos, referente apenas aos trabalhadores formais. Esses aspectos contribuem para a formação de uma população economicamente precária e ocupante de áreas irregulares.

3.3 Características fisiográficas do município

3.3.1 Vegetação

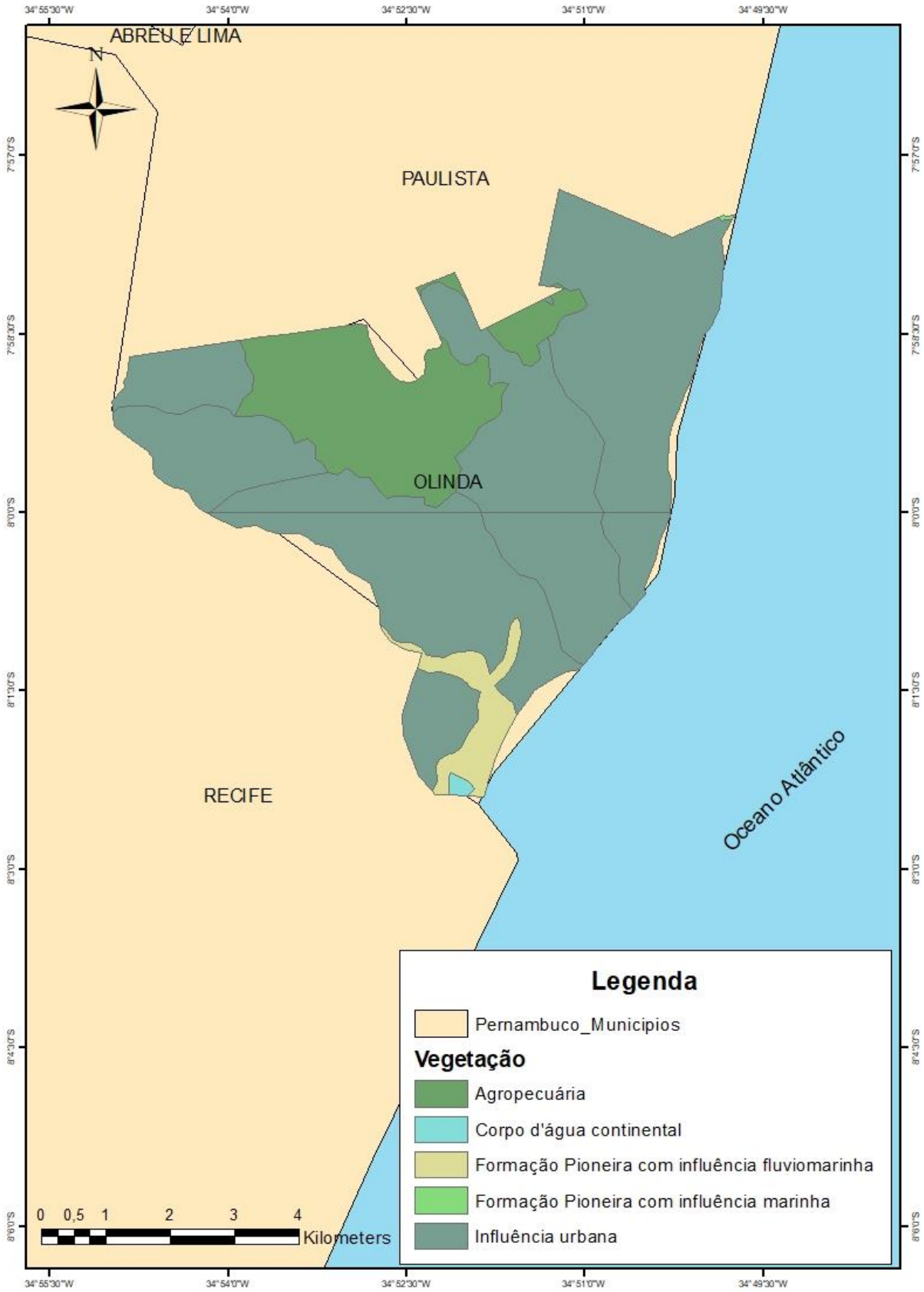
A vegetação da cidade de Olinda é fruto do impacto provocado pelo desenvolvimento urbano e devido a sua localização em zona litorânea, apresenta uma diversidade de ecossistemas. Assim, a vegetação é predominantemente composta por remanescentes da mata atlântica, campos, matas de restinga e manguezais, formando sua vegetação nativa e típica. Sendo válido salientar que os efeitos desse desenvolvimento acarretam no aumento da frequência e

magnitude da deterioração ambiental (PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA, 2008; SILVA, 2011).

O mapa de vegetação do Brasil classifica a mata atlântica como um conjunto de formações florestais, constituídas por: floresta ombrófila densa atlântica, floresta ombrófila mista, floresta ombrófila aberta, floresta estacional semidecidual, floresta estacional decidual, além dos ecossistemas associados, como os manguezais, restinga, campos de altitude, brejos interioranos e encraves florestais (BEZERRA, 2006; IBGE, 2004).

A mata atlântica possui aparência comumente exuberante, composta por três estratos arbóreos, mais ou menos densos: um arbustivo menos denso e um herbáceo. Os estratos apresentam altura que variam desde 4 metros e alcançam até 35 metros, podem compreender copas amplas, uniformes ou pequenas, assim como suas ramificações e folhas (BEZERRA, 2006). A figura 13 mostra os aspectos da vegetação da cidade de Olinda/PE.

Figura 13–Vegetação da cidade de Olinda-PE



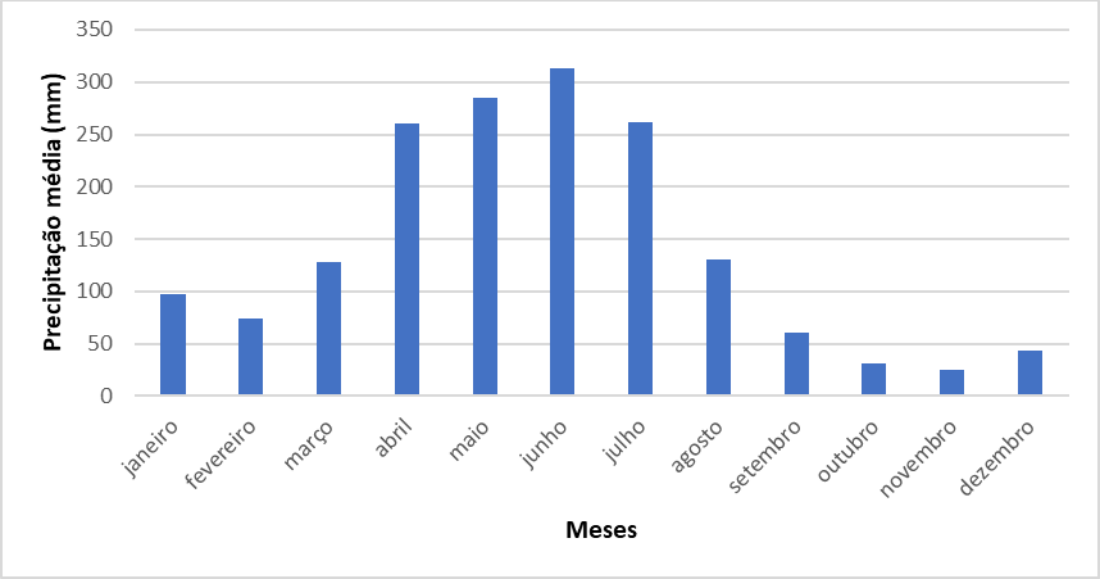
Fonte: Adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020).

3.3.2 Clima

O clima do município de Olinda é definido como tropical úmido do tipo Am, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, típico do litoral nordestino. A temperatura média anual abrange desde os 26º até pouco mais de 30º no verão. A região apresenta baixas amplitudes térmicas, precipitações abundantes na maior parte do ano e alta umidade relativa do ar.

De acordo com os dados obtidos Agência Pernambucana de Águas e Clima– APAC (2021), baseados em postos representativos da região estudada, foi elaborado um gráfico, apresentado na Figura 14, correspondente as precipitações médias mensais ao longo de onze anos, referentes ao período de 2010 até o ano de 2021. O índice pluviométrico médio mensal obtido engloba valores que vão desde 24, 54 mm a 312, 84 mm, revelando um período predominantemente chuvoso de janeiro a agosto.

Figura 14 – Médias pluviométricas mensais no período de 2010 a 2021 no município de Olinda



Fonte: Elaborado pela autora com dados disponíveis no site da APAC (2021).

3.3.3 Relevo

Ao refletir a dinâmica geomorfológica da área que está situado, o município de Olinda apresenta relevo formado por tabuleiros costeiros e planícies costeiras. A altitude média do munícipio é de 16 metros acima do mar, com amplitudes topográficas dos seus relevos que

variam de 2 a 20 metros e 20 a 50 metros, compondo respectivamente as planícies e colinas, onde destacam-se algumas com expressões bastante íngremes (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014). Ainda a respeito das determinações das morfologias urbanas, é observado o assentamento arbitrário das unidades familiares justamente nessas áreas íngremes que apresentam alto risco de deslizamento.

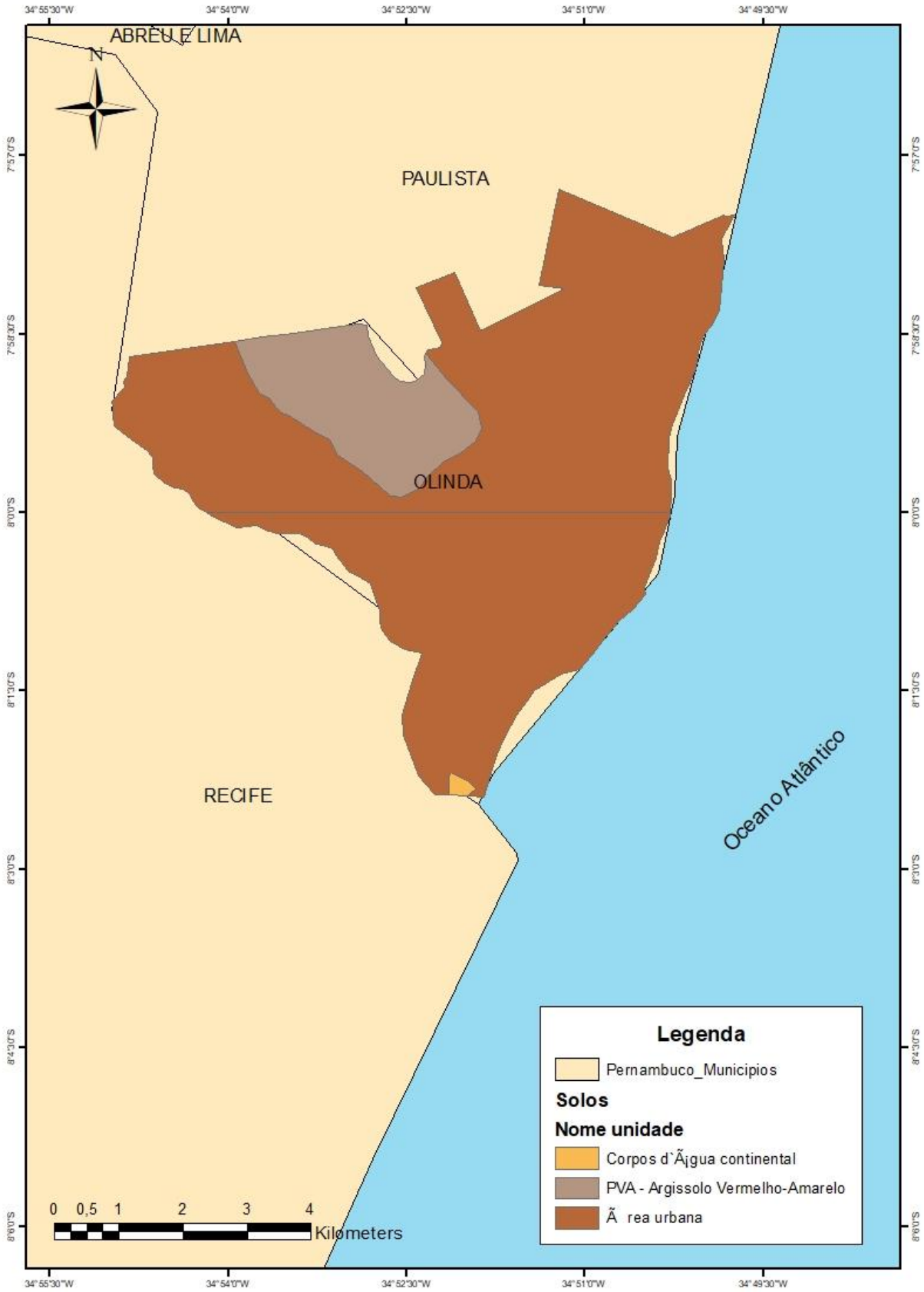
Os tabuleiros costeiros constituem a representação das formas de relevo tubulares esculpidas em rochas sedimentares, as quais em geral, apresentam pouca litificação e dissecação por uma rede de canais com densidade de drenagem de baixa a moderada, padrão subparalelo nos trechos de topos mais conservados e padrão dendrítico nas áreas mais dissecadas, com predomínio de processos de pedogênese e formação de solos espessos e bem drenados, com baixa suscetibilidade à erosão (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

As planícies costeiras compreendem o agrupamento dos ambientes deposicionais de origem fluviomarinha, onde há predominância de relevo com planícies fluviomarinhas, as quais apresentam extensos manguezais em estuários afogados formando rias. No que condiz as planícies costeiras propriamente ditas, são encontradas praias arenosas e terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos, além dos recifes de arenito de praia ou, subordinadamente, coralinos, representando características dominantes do litoral pernambucano.

3.3.4 Solo

A região do município de Olinda desenvolvida a partir dos sedimentos de Grupos Barreiras, apresenta predominância dos solos Podzólicos Vermelho-Amarelos, atualmente denominados, pelo novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, de Argissolos Vermelho-Amarelos, conforme é apresentado na Figura 15 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA–EMBRAPA, 2000; TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

Figura 15 – Mapa de solos da cidade de Olinda-PE



Fonte: Adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020).

São solos com características gerais da classe dos Podzólicos, mas individualizados em um nível hierárquico imediatamente abaixo por critério de cor. Apresentam acúmulo de argila, com cores na faixa do vermelho-amarelado, podendo conter também partes vermelhas e, ou, bruno forte, devido à presença da mistura de óxidos de ferro (hematita mais goethita) (EMBRAPA, 2000; TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

Essa classe engloba solos com ampla variabilidade de características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. As cores podem diversificar entre amarela, vermelho-amarela, vermelha e acinzentada; a textura varia de arenosa a argilosa na superfície e de média a muito argilosa em subsuperfície; a profundidade, desde rasa até muito profunda; a drenagem, desde imperfeita até acentuadamente drenada; a CTC, de baixa a alta (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

3.3.5 Geologia

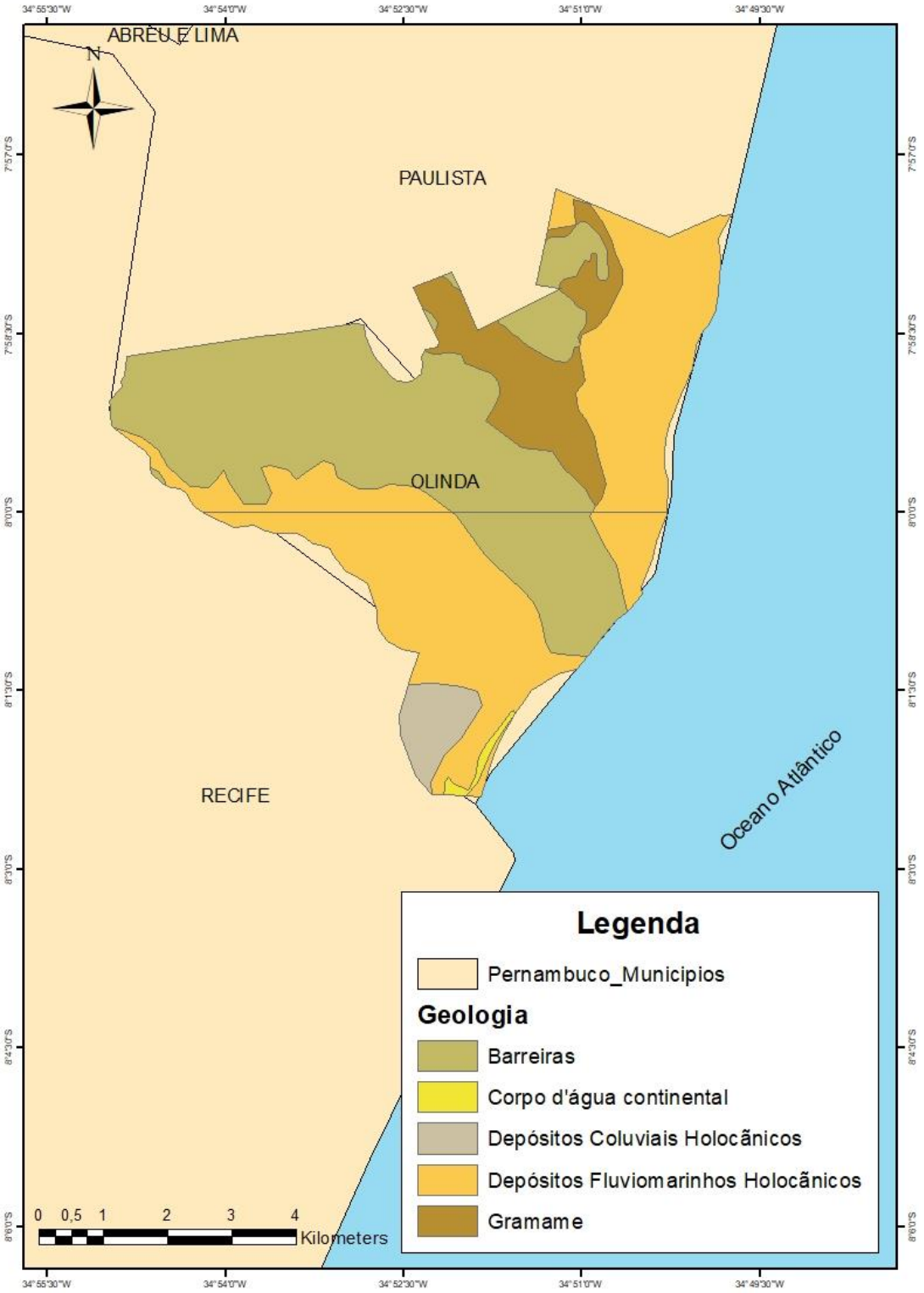
O município é formado por três conjuntos geológicos: Rochas Sedimentares Cretáceas, Sedimentos Terciários e Sedimentos Quaternários. As rochas Cretáceas estão relacionadas com a deposição das Bacias Sedimentares sobre blocos de embasamento cristalino durante o período cretáceo (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS–CPRM, 2003; EMBRAPA, 2000; TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

No período quaternário ocorre a formação sedimentares mais recentes, dos quais predominam os depósitos fluviais (Aluviões) e coluviais, recife de arenito, restingas, mangues e dunas, compostos também por sedimentos não consolidados de natureza e granulometria variadas (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS–CPRM, 2003; EMBRAPA, 2000; TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

O estado de Pernambuco no período terciário está representado pelo Grupo de Barreiras, constituindo uma faixa sedimentar costeira que abrange desde o lineamento de Pernambuco até o alto estrutural de Mamanguape (EMBRAPA, 2000; PEDROSA, 2007; TORRES; PFALTZGRAFF, 2014). O grupo compõe tabuleiros costeiros com morfologia bastante uniforme, apesar de sua grande variação granulométrica (EMBRAPA, 2000; TORRES;

PFALTZGRAFF, 2014). A figura 16 apresenta os aspectos geológicos da cidade de Olinda/PE.

Figura 16–Mapa geológico da cidade de Olinda-PE



Fonte: Adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020).

3.3.6 Hidrografia

O município de Olinda é caracterizado pelas bacias hidrográficas do Beberibe e do Paratibe. A bacia do Beberibe compõe 18,32km², representando 44,87% do território de Olinda, abrangendo uma população de 177.218 habitantes, além de possuir como afluentes: o Canal Lava Tripa, Canal Azeitona, Canal da Malária, Lagoas de Jardim Brasil, Lagoa de Santa Tereza e Lagoa da Pulsação (PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA, 2013).

A bacia do Paratibe, também representando o município da área de estudo, compõe uma área 24, 51 km², correspondente a 55, 13% do território de Olinda, abrangendo uma população de 190. 684 habitantes e sendo constituído pelos afluentes: Canal Lava Tripa, Canal Azeitona, Canal da Malária, Lagoas de Jardim Brasil, Lagoa de Santa Tereza e Lagoa da Pulsação (PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é composto por dois subitens, de modo que o primeiro é responsável por descrever a tipologia da pesquisa realizada, enquanto que o segundo compreende a metodologia experimental do estudo presente.

4.1 Tipologia da Pesquisa

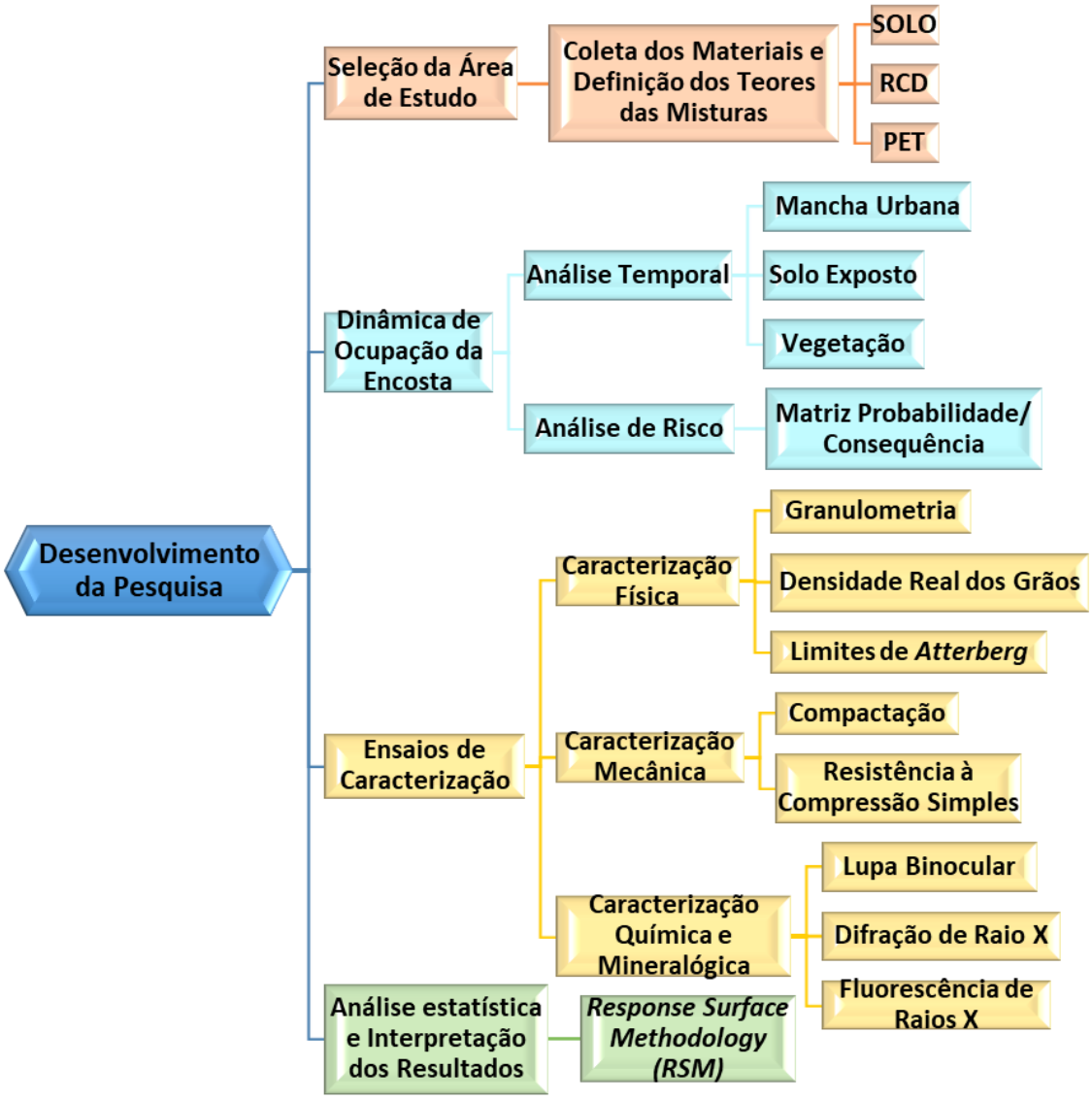
A definição da tipologia da pesquisa é uma etapa muito importante na elaboração de trabalhos científicos, pois serve de alicerce estrutural para a produção das pesquisas. Nesse contexto, Pereira *et al.* (2018) expõem algumas tipologias e suas características, dentre as quais o presente trabalho se enquadra como um estudo exploratório, analítico ou descritivo, sendo o tipo de pesquisa realizada para áreas com escasso conhecimento e com intuito de suprir tais lacunas.

4.2 Programa Experimental

A pesquisa é composta por um programa experimental realizado em laboratório, bem como orientado pelos instrumentos normativos e as legislações vigentes, sendo todo esse processo precedido por uma revisão bibliográfica, norteada por trabalhos científicos realizados na área.

O desenvolvimento da pesquisa (Figura 17) foi iniciado com a seleção da área de estudo e coleta dos materiais, com a definição dos teores das misturas e posterior análise da dinâmica da ocupação da área e execução dos ensaios. Em seguida, foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e mineralógica. Por fim, foi feita análise estatística e interpretação dos resultados.

Figura 17– Metodologia de desenvolvimento da Pesquisa



Fonte: Elaborado pela Autora.

4.2.1 Solo

A quantidade de solo coletado foi de aproximadamente 200 kg (Figura 18), seguindo as especificações da NBR 9604 (ABNT, 2016) e da NBR 6457 (ABNT, 2016). A área de estudo está localizada numa encosta em uma situação de instabilidade, após a ocorrência de um deslizamento recente, pertencente ao bairro de Sapucaia na cidade de Olinda-PE.

Figura 18 – Solo sendo coletado da área de estudo

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2.2 Agregado reciclado

O agregado reciclado (Figura 19), proveniente dos resíduos da construção e demolição, que foi utilizado nessa pesquisa foi fornecido pela Usina de Beneficiamento – Ciclo Ambiental, localizada no município de Camaragibe – PE. A empresa é referência no mercado em Pernambuco, com capacidade para processar de 3.500 a 4.500 toneladas de RCD por mês.

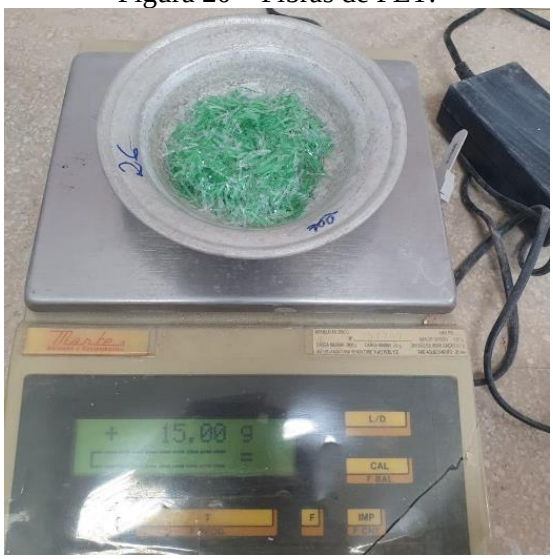
Figura 19 – Agregado reciclado

Fonte:Arquivo Pessoal.

4.2.3 Fibras de PET

As fibras utilizadas no desenvolvimento dessa pesquisa são de Polietileno Tereftalato (PET), foram produzidas através de um filetador artesanal, construído manualmente, e obtidas a partir de garrafas de refrigerante. Os formatos das fibras foram definidos com base na análise de pesquisas científicas, de modo que comprimento da fibra utilizado foi de 1 cm e espessura de 2 mm (Figura 20).

Figura 20 – Fibras de PET.



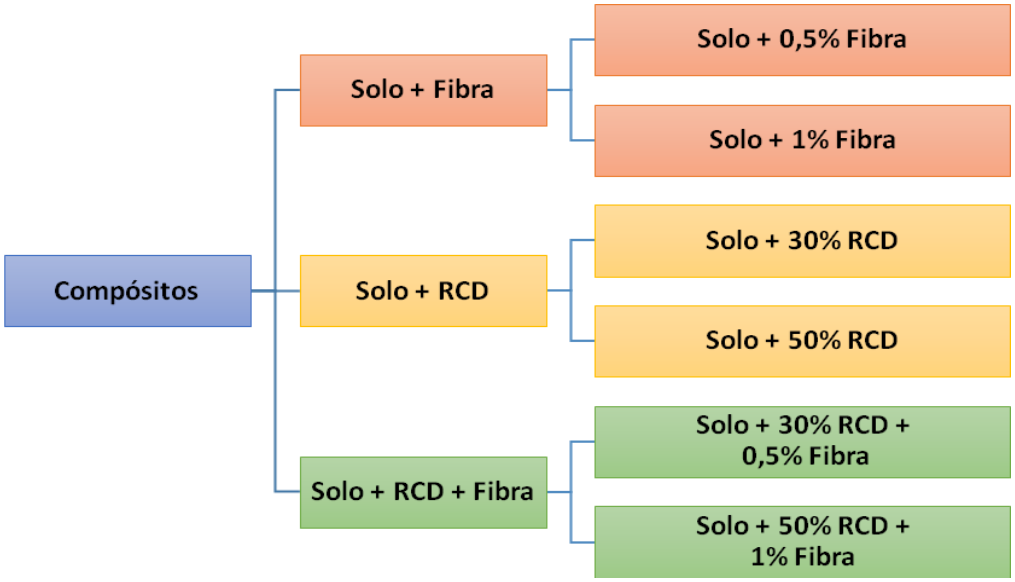
Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2.4 Compósitos de solo, agregado reciclado e fibras de PET

Os compósitos são misturas com diferentes teores dos elementos que as compõe. Assim, os elementos que participaram dessa pesquisa foram resíduos da construção, fibras de PET e demolição após seu processo de beneficiamento, também conhecido como agregado reciclado e o solo pertencente a área de risco. A definição da proporção dos elementos na formação dos compósitos foi baseada em pesquisas desenvolvidas com a utilização desses resíduos, como as de Gomes (2018), Louzada, Malko e Casagrande (2019) e de Lucarelli (2018).

Os valores encontrados conduziram para a utilização de percentuais de fibras que envolvem 0,5% e 1%, enquanto a contribuição do agregado reciclado foi de 30% e 50%, bem como a parcela de solo que formará o complemento do compósito (Figura 21).

Figura 21– Teores dos compósitos



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.5 Análise da dinâmica de ocupação da encosta

4.2.5.1. Análise Temporal

A análise da dinâmica de ocupação da encosta foi feita inicialmente mediante a coleta de ortofotocartas na agência CONDEPE/FIDEM de Pernambuco, acerca dos anos de 1975 e 1986, e com o auxílio do *Google Earth* para a obtenção de imagens dos anos 2009 e 2018. As imagens coletadas foram vetorizadas através da ferramenta de software QGIS versão 10.14, o qual é uma aplicação do Sistema de Informação Geográfica (SIG), que possibilitou gerar os mapas referentes a área de estudo, os quais expõem dados relativos à presença de cobertura vegetal, solo exposto e mancha urbana.

Dessa forma, a análise da encosta foi feita em face da evolução verificada, através das modificações ocorridas na área. Ao observar as alterações relativas às áreas de vegetação, que compreendem uma camada de proteção ao solo, tanto para erosão quanto para deslizamentos; as áreas de solo exposto, que são vulneráveis a quaisquer intempéries; e as áreas de ocupação urbana, que representam construções, que além de aumentar o sobrepeso da área, as fragilizam com cortes, aterros, aumento do escoamento superficial, entre outros aspectos. Assim, é possível correlacionar essas mudanças com as características de instabilidade do solo local.

4.2.5.2. Análise de Risco

A matriz escolhida para a análise do nível de risco foi a de probabilidade/consequência descrita pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ISO/IEC 31010, permitindo a identificação e a avaliação dos indicadores que potencializam a ocorrência de incidentes na encosta estudada (ABNT ISO/IEC 31010, 2012).

A matriz probabilidade/consequência possibilita a combinação das classificações qualitativas de consequências e probabilidades para definir um nível de risco, reconhecendo a(s) correlação(ões) de impactos mais significativa(s), diante daqueles analisados. Por esses aspectos, essa matriz é aplicada em diversas áreas, calculando vários tipos de risco (ABNT ISO/IEC 31000, 2018; PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

A estrutura da matriz é composta por prováveis conseqüências eixo e a probabilidade de ocorrência no outro. Para construção da matriz, foi elaborado um quadro com os impactos provenientes das ações antrópicas no ambiente natural, a exemplo da retirada da vegetação original, lançamento de esgoto diretamente no solo, deposição irregular de lixo, associadas à probabilidade de ocorrência de alguns fenômenos que afetam o meio ambiente, como o caso de processos erosivos e da instabilidade da área (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

A escala utilizada para avaliar a magnitude dos impactos ambientais variou de zero até cinco, sendo definida da seguinte forma: 0 – nenhum impacto causado; 1 – impacto muito baixo; 2 – impacto de baixo grau; 3 – impacto de médio grau; 4 – impacto de alto grau; e 5 – impacto de altíssimo grau (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

A identificação do nível em que os impactos ambientais afetaram a encosta foi feita mediante a separação em faixas (intervalos) de percentuais, referentes ao total das interações encontradas em relação ao total de interações possíveis, atreladas as suas respectivas magnitudes. As faixas percentuais foram categorizadas do seguinte modo: 0% a 16,7% - não afetam; 16,8% a 33,7% - afetam em nível muito baixo; 33,8% a 50,4% - afetam em nível baixo; 50,5% a 67,1% - afetam em nível médio; 67,2% a 83,8% - afetam em nível alto e 83,9% a 100% - afetam em nível altíssimo. (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

4.2.6 Ensaios de Caracterização Física

A caracterização física foi realizada mediante a execução de ensaios laboratoriais envolvendo solo e os compósitos apresentados compostos apenas por solo e agregado reciclado. A execução dos ensaios foi feita no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica de Pernambuco, constando de: granulometria, densidade real e limites de *Atterberg*, os quais seguiram as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.2.6.1. Granulometria

A composição granulométrica do solo, do agregado reciclado e dos compósitos envolvendo esses materiais foi determinada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2017). O gráfico obtido com a realização desse ensaio permite definir a curva granulométrica dos materiais e das misturas, identificando também a porcentagem de argila, silte, areia e pedregulho de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995).

O estudo da parte fina foi realizado através da sedimentação (Figura 22). Dessa forma, o solo, o agregado reciclado e os compósitos formados foram classificados de acordo com o *Transportation Research Board* – TRB e com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Figura 22– Sedimentação do solo

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2.6.2. Densidade real

A determinação da massa específica do solo, do agregado reciclado e dos compósitos foi realizada de acordo com as orientações descritas na NBR 6458 (ABNT, 2016), utilizando como ferramenta picnômetro e bomba a vácuo.

4.2.6.3. Limites de Atterberg

Os limites de *Atterberg* determinados foram os limites de liquidez (Figura 23) e limites de plasticidade. A execução do ensaio seguiu as determinações estabelecidas na NBR 6459 (ABNT, 2017) e na NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

Figura 23–Picnômetro na bomba à vácuo.

Fonte: Arquivo Pessoal

4.2.7 Ensaios de Caracterização Química e Mineralógica

A execução dos ensaios foi realizada no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. Os ensaios contemplaram o estudo do solo e do RCD por meio de lupa binocular, pela aplicação de difração de raios X e fluorescência de raios X, assim como análise do pH dos materiais e do teor de sulfatos.

4.2.7.1. Análise mineralógica com lupa binocular

O ensaio utilizando lupa binocular promove o estudo morfológico e composicional dos grãos. Esse estudo foi aplicado à amostra de RCD e à fração de areia do solo (ø2-0,063 mm), em razão da condição fina do solo não ser passível de identificação por esse método. A metodologia desse ensaio prevê a secagem prévia da amostra ao ar e sua passagem na peneira de abertura de 2 mm sob água corrente. O material retido deve ser colocado em estufa a 100º C para sua posterior análise, utilizando o equipamento estereomicroscópio Zeiss A1 (lupa binocular).

4.2.7.2. Análise Química

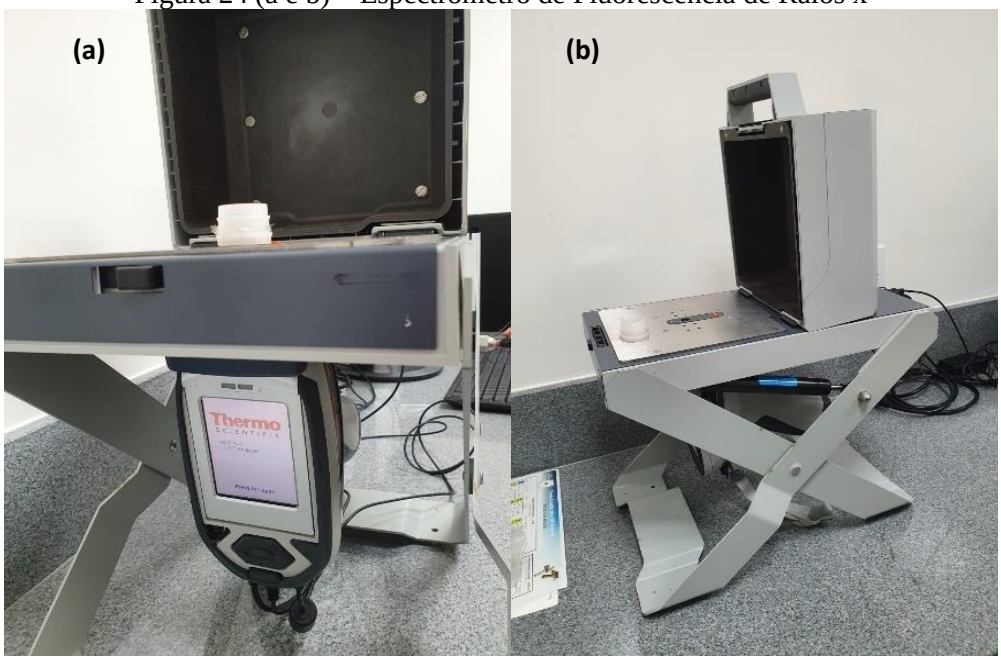
A partir da análise química é possível identificar o teor de sais dissolvidos na água intersticial do solo, o complexo sortivo e a capacidade de troca catiônica. O ensaio foi realizado no Laboratório de Química Ambiental de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), seguindo as diretrizes estabelecidas pelo Manual de Métodos de Análises de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017).

4.2.7.3. Fluorescência de raio X

A fluorescência de raio x é uma técnica analítica que permite determinar a composição elementar de diferentes materiais, estabelecendo uma proporção, em forma quantitativa, de determinados elementos em uma amostra analisada (NASCIMENTO, 2019; RIBEIRO *et al*., 2017). A presente pesquisa analisará as amostras de solo e RCD, verificando a presença da fração dos elementos: SiO_2, MgO, Fe_2O_{3T}, Al_2O_3, K_2O, CaO, TiO_2, Cr_2O_3e MnO.

As amostras de solo e RCD foram analisadas através do equipamento de Fluorescência de Raio-X portátil modelo NITON XL3t (*Thermo Scientific*) (Figura 24 a e b), pertencente ao Laboratório de Geoquímica Aplicada ao Petróleo (LGAP-LAGESE-UFPE), onde a leitura de cada amostra teve duração de 300 segundos.

Figura 24 (a e b) – Espectrômetro de Fluorescência de Raios x



Fonte: Arquivo Pessoal

4.2.7.4. Difração de raio X

A difração por raios-X é uma poderosa técnica não destrutiva de investigação da estrutura cristalina de materiais. O ensaio viabiliza a caracterização microestrutural de materiais cristalinos, possibilitando a determinação qualitativa da composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes na amostra estudada (SILVA, 2020; NASCIMENTO, 2019; PORTELA, 2019).

A execução do ensaio foi realizada no laboratório da Universidade Federal de Caruaru. A análise foi feita com amostras em forma de pó natural e não orientado, utilizando um difratômetro da marca Rigaku (MiniFlex600) (Figura 25), com radiação K-alfa do cobre, operando com voltagem de 40kV, amperagem de 30 mA, intervalo de 5 a 70 graus e velocidade de análise 2 graus/min.

Figura 25–Difratômetro

Fonte: Arquivo Pessoal

As amostras foram interpretadas com base no espaçamento Inter cristalino (D°; Armstrong). A identificação dos picos se deu através de comparação com amostras de referência do banco de dados do Instituto Internacional de Dados Cristalográficos – ICDD; bem como com o banco de dados de Chen (1977).

4.2.8 Ensaios de Caracterização Mecânica

A realização dos ensaios de caracterização mecânica envolveu os compósitos compostos por solo, agregado reciclado e/ou fibra. A execução dos ensaios foi efetuada no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) e no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco e comtemplou os ensaios de compactação e resistência à compressão simples, ao passo que foram norteados pelas diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.2.8.1. Compactação

O ensaio de compactação determina o peso específico aparente máximo e a umidade ótima do solo para uma determinada energia de compactação. A execução do ensaio seguiu as especificações descritas na NBR 7182 (ABNT, 2016).

A energia empregada foi de Proctor Normal, com reuso de materiais, aplicada para amostras de solo e seus respectivos compósitos. O ensaio foi executado utilizando um soquete e um cilindro pequeno, operando 26 golpes ao longo de 3 camadas (Figura 26). Após a moldagem,

extração (Figura 27) e pesagem do corpo de prova foi retirada uma pequena amostra de sua parte central, que foram levadas em cápsulas à estufa para a determinação da umidade.

Figura 26– Compactação da camada

Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 27– Extração do corpo de prova

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2.8.2. Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de compressão simples determina a compressão não confinada de corpos de prova formados por solos coesivos, através da aplicação de uma carga axial associada a um controle de deformação. A execução do ensaio foi orientada pelas diretrizes estabelecidas na NBR 12770 (ABNT, 1992).

A moldagem dos corpos de prova foi iniciada com a determinação do percentual de cada material na mistura. A quantidade de água adicionada foi definida pelo ensaio de

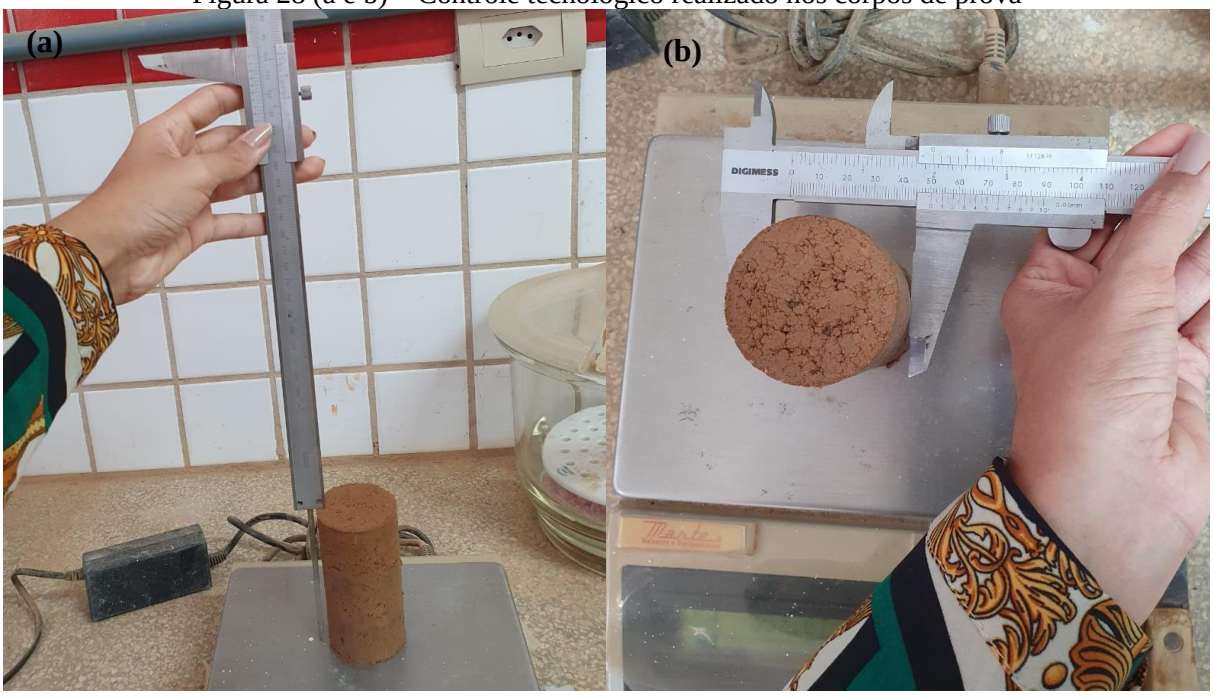
compactação, através dos valores de umidade ótima e peso específico seco máximo obtidos, que permitiu estabelecer o peso úmido da mistura a ser utilizado na moldagem.

O compósito formado após a mistura foi separado em três partes iguais, envolvidas por papel alumínio e armazenadas em um recipiente de isopor, a fim de preservar a umidade. Ademais, previamente à separação do compósito foram retiradas duas pequenas amostras para a determinação da umidade, obtida após vinte quatro horas de armazenamento em estufa.

O processo de moldagem foi realizado de forma estática, no interior de um cilindro com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. O material colocado dentro do cilindro foi compactado em 3 camadas, e antes da prensagem da camada seguinte era realizada a escarificação da superfície anterior para contribuir com a interação entre as camadas.

Após finalizar a moldagem dos corpos de prova, foi feita sua desmoldagem com auxílio da vaselina previamente aplicada no interior do molde cilíndrico. Em seguida, os corpos de prova foram medidos e pesados, verificando se satisfaziam os critérios de avaliação preestabelecidos (Figura 28 a e b). Aqueles que apresentaram inconformidades com as exigências foram descartados.

Figura 28 (a e b) – Controle tecnológico realizado nos corpos de prova



Fonte: Arquivo Pessoal.

Os critérios de avaliação preestabelecidos para os corpos de prova foram:

- Diâmetro de 50 ± 0,5 mm e altura de 100 ± 1 mm;
- Teor de umidade de ± 3,0 %;
- Grau de compactação de 97% a 103%, o qual foi definido pelo valor do peso específico aparente seco após a moldagem, dividido pelo peso específico seco determinado no ensaio de compactação.

Ao satisfazer os critérios estabelecidos, cinco corpos de prova de cada mistura foram colocados em câmara úmida para aguardar o tempo de cura, com períodos de 7, 28 e 120 dias, totalizando 135 corpos de prova. Ao final do respectivo tempo de cura, os corpos de prova foram levados para o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Universidade de Pernambuco, onde ocorreu a execução do ensaio de resistência à compressão simples na prensa de marca Emic, modelo DL 30.000 com uma velocidade de 0,040 mm/s.

4.2.9 Análise estatística dos resultados da RCS

A técnica de estabilização de solo exige uma rigorosa atenção na definição dos teores de materiais utilizados, pois consiste numa etapa fundamental para alcançar um resultado efetivo no processo de intervenção geotécnica (SILVA, 2020). Uma vez que, segundo Güllü e Fedakar (2017), um erro na definição das proporções pode acarretar inconvenientes significativos na otimização do desempenho do solo.

A utilização de recursos que auxiliem na tomada de decisões, como ferramentas de identificação de valores responsáveis por maximizar o resultado, demonstram relevância na operação com elevado número de componentes. Assim, metodologias que trabalham com proporções ideais são defendidas por Yu e Bathurst (2017), como é o caso da modelagem estatística.

Na modelagem estatística contribuição das variáveis independentes é alterada de forma isolada, ao passo que as outras variáveis independentes são mantidas constantes. Com isso, é possível reduzir substancialmente o tempo gasto, afetando positivamente os custos. Outro

aspecto interessante é a necessidade de um baixo quantitativo de ensaios para avaliar inúmeros parâmetros e suas interações (YU; BATHURST, 2017).

Nesse contexto, destaca-se a metodologia *Response Surface Methodology* (RSM), a qual corresponde a uma união de técnicas matemáticas e estatísticas que visam o aperfeiçoamento de projetos. A utilização desse método possibilita analisar o efeito causado em variáveis dependentes (ou de saída) por variáveis independentes (GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017; WANG; CHENG; TAN, 2018; ZHANG *et al*., 2020). Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) afirmam que o sucesso do modelo estatístico depende expressivamente da confiabilidade das informações fornecidas pelas interações entre as variáveis estudadas.

Ademais, esse método permite utilizar resultados obtidos com ensaios laboratoriais como referência para fornecer valores de otimização do sistema dentro de uma previsão de resultados alcançáveis(YOUSEFPOUR *et al*., 2021; YU; BATHURST, 2017; ZHANG *et al*., 2020), fator que demonstrou excelente viabilidade de sua aplicação em estudos de estabilização de solo (GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017; YU; BATHURST, 2017).

De modo semelhante, o estudo realizado por Zhang *et al*. (2020) propôs a otimização da mistura de concreto com agregado reciclado utilizando o modelo estatístico de *Response Surface Methodology* (RSM). Outros autores, como Güneyisi *et al*. (2014), Olgun (2013), Wang, Cheng e Tan (2018), validam essa ideia, indicando esse método para demais estudos nessa esfera.

Diante da análise dos parâmetros observados no estudo de estabilização do solo foi definido o tipo de variável para cada componente estudado, uma vez que segundo Silva *et al.* (2021), a identificação do compósito ideal depende dos parâmetros que exerçam maior influência no valor da resistência. Assim, nessa pesquisa, a resistência à compressão simples (RCS) foi definida como variável dependente, em contrapartida, os teores de RCD, fibras de PET e o tempo de cura (TC) das amostras, equivalem às variáveis independentes.

Os cálculos realizados para relacionar as variáveis independentes foram executados através da análise de variância, de testes sobre a distribuição probabilística dos dados e verificação da capacidade de influência desses no resultado da resistência a compressão simples (GÜLLÜ;

FEDAKAR, 2017; SCHOEFS; LE; LANATA, 2013). Tal verificação é possível mediante a identificação dos níveis de significância (Valor-P), o qual não deve ser superior a 0,05 para cada uma das variáveis independentes e de suas interações (DELOACH; ULBRICH, 2007).

A concepção do modelo matemático ainda depende de outros aspectos, como da análise da diferença entre o R^2 ajustado e o R^2 previsto, valor que não deve ser superior a 20% (0,2). Diante da modelagem matemática empírica é possível estabelecer as relações das diferentes variáveis (dependentes e independentes), onde a identificação da qualidade do ajuste indicaria para a tendência do resultado (GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017).

Por fim, após o encerramento da modelagem, foi iniciada a checagem de adequação do modelo. Nessa etapa é feita a verificação da adaptação do modelo aplicado ao comportamento experimental do estudo de estabilização do solo, dentro de determinadas limitações, as quais foram definidas através das taxas de variação média entre os resultados experimentais e os obtidos pelo modelo.

5 RESULTADOS

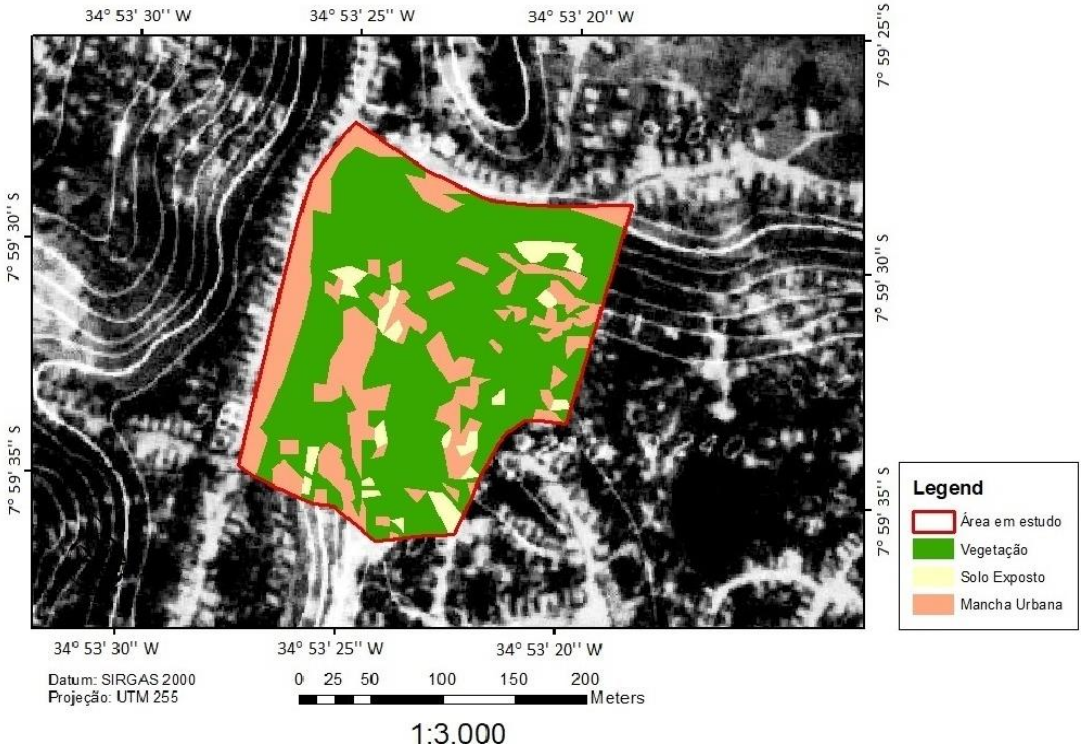
Este capítulo contempla os resultados alcançados durante a elaboração do projeto, bem como a análise dos dados obtidos. Dessa forma, são apresentadas informações acerca da análise da dinâmica da ocupação da encosta, ensaios de caracterização física, química, mineralógica e mecânica dos materiais e compósitos envolvidos na pesquisa.

5.1 Análise da dinâmica da ocupação da encosta

5.1.1 Análise Temporal

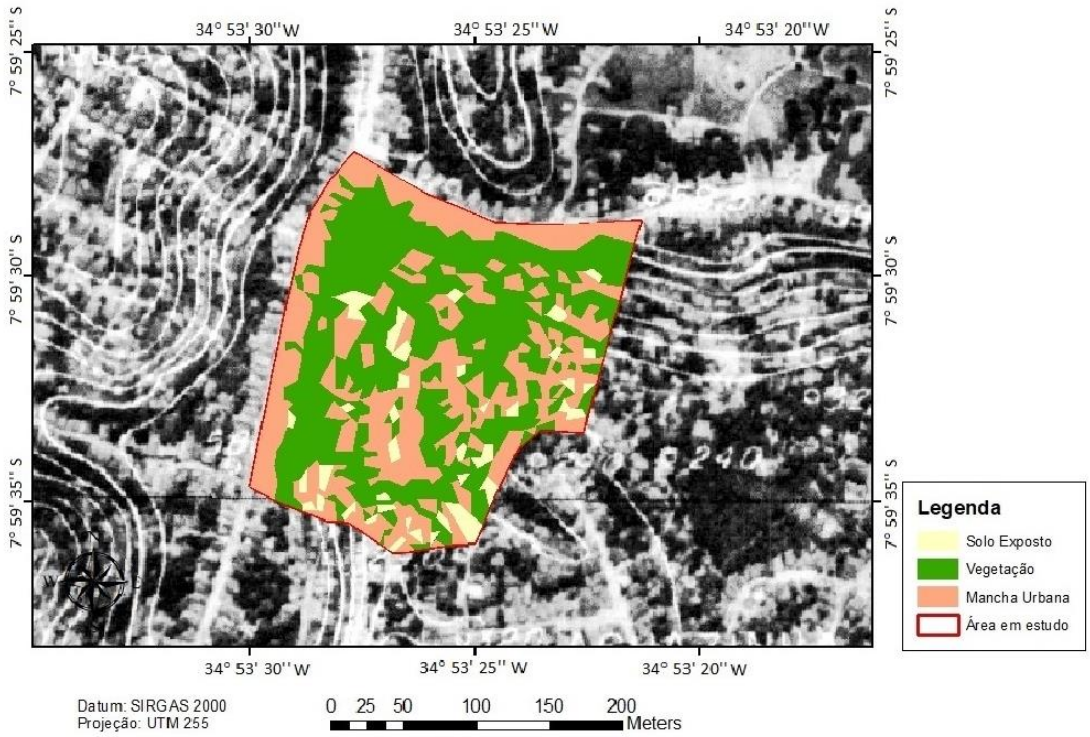
A detecção remota permitiu a elaboração dos mapas referentes aos anos 1975, 1986, 2009 e 2018, pelo software QGIS versão 10.14, fornecendo informações acerca da dinâmica de ocupação do local selecionado. Os mapas apresentados nas Figuras 29, 30, 31 e 32, expõem a redução significativa da vegetação ao passar dos anos e como efeito do processo de urbanização, além do aumento expressivo da área de mancha urbana e com leve expansão da área de solo exposto (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

Figura 29– Imagem aérea da área de estudo em 1975



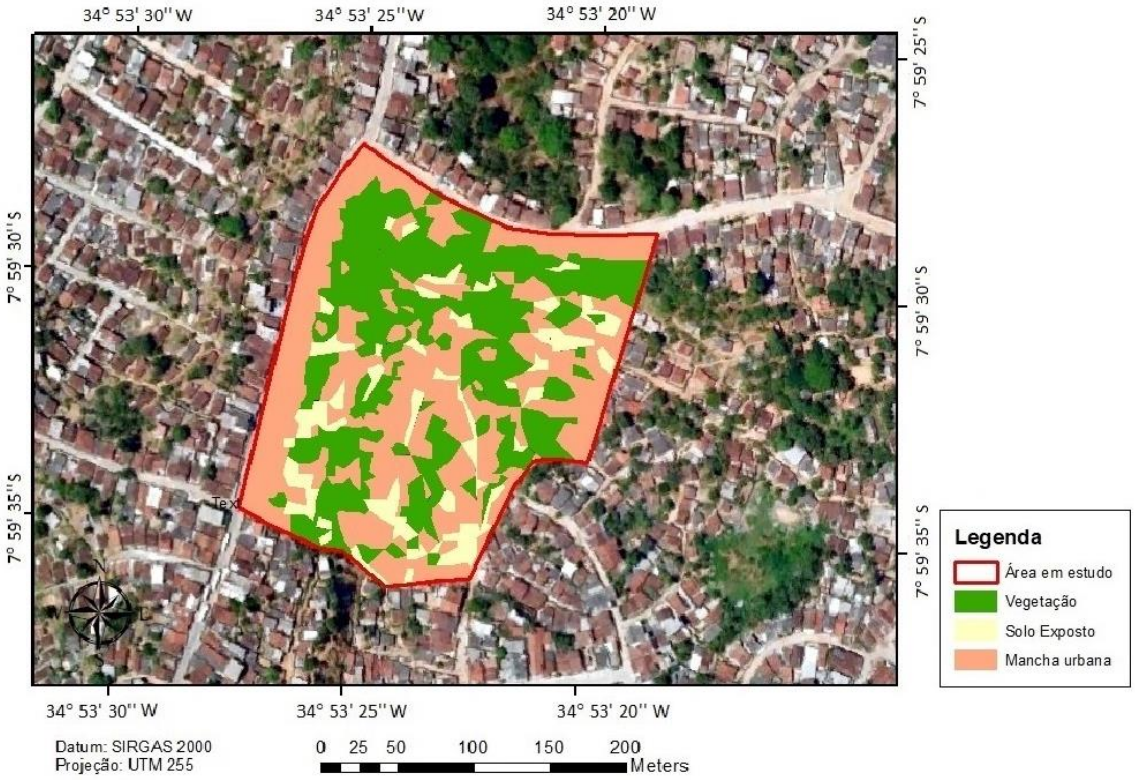
Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

Figura 30– Imagem aérea da área de estudo em 1986



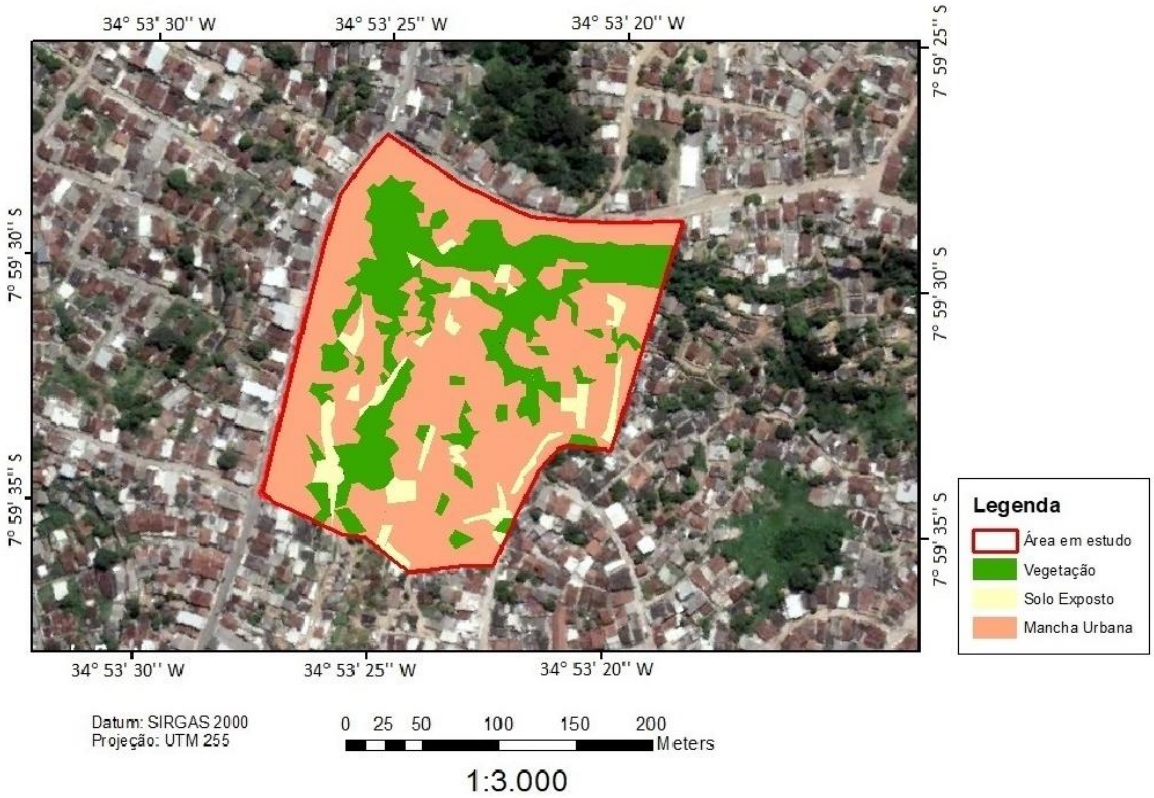
Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

Figura 31– Imagem aérea da área de estudo em 2009



Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

Figura 32– Imagem aérea da área de estudo em 2018



Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

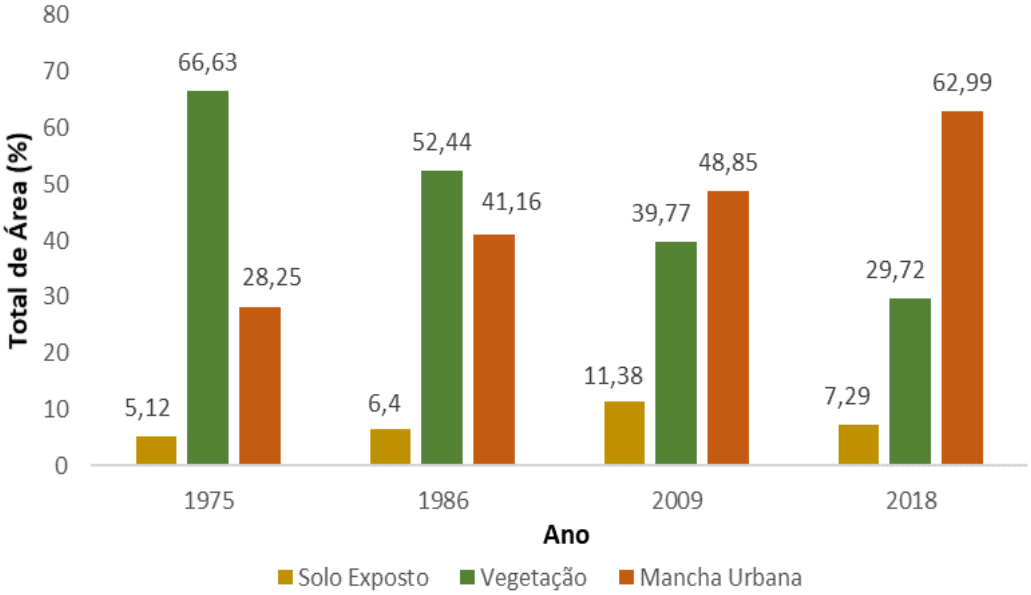
A Tabela 1 apresenta os valores das áreas ocupadas por cada elemento para os anos de estudo, assim como as taxas de variações ocorridas nesse período, referente a todas as tipologias analisadas (vegetação, solo exposto e mancha urbana). Na Figura 33, os valores percentuais das áreas ocupadas por cada elemento são exibidos de forma gráfica.

Tabela 1–Valores de áreas em m² e taxas de variação para os anos de 1975, 1986, 2009 e 2018

CLASSE	Área (m²)				Taxas de variação (%)			
	1975	1986	2009	2018	1975-1986	1986-2009	2009-2018	1975-2018
Vegetação	32461,58	25549,07	19376	14480	(-) 21,29	(-) 24,16	(-) 25,30	(-) 55,40
Mancha urbana	13764,48	20054,52	23800	30688	(+) 45,70	(+) 18,68	(+) 28,94	(+) 122,95
Solo exposto	2493,94	3116,41	5544	3552	(+) 24,96	(+) 77,90	(-) 35,93	(+) 42,42

Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

Figura 33 – Percentuais das áreas para os anos de 1975, 1986, 2009 e 2018



Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

A área composta por vegetação ocupava em 1975 a extensão de 32461,58m², correspondente a 66,63% da área total da encosta, apresentando o maior valor encontrado para essa classe nos anos estudados. Ao longo do tempo, essa área sofreu um processo de redução, decorrente da expansão urbana ocorrida no local, atingindo seu valor mais baixo em 2018, com uma área de ocupação de 14480 m² (29,72%). Assim, no intervalo entre os anos de 1975 e 2018, foi verificada uma redução percentual de 55,40% dessa área (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

A área referente a mancha urbana foi a que sofreu uma mudança mais significativa na análise temporal. Em 1975, essa área ocupava 13.764,48 m², correspondendo a 28,25% da área total, sendo este o menor valor constatado para os anos em estudo. Ao comparar com o ano de 2018, é verificado um elevado crescimento da região referente a mancha urbana, a qual alcançou um valor de 30688,0 m² (62,99%) (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

O aumento ocorrido nessa área apresentou valor percentual de 122,95%, o que significa que o espaço, correspondente a mancha urbana, foi expandido em mais que o dobro entre os anos de 1975 e 2018. Esse processo é justificado pelo rápido crescimento populacional, o qual provoca uma ocupação desordenada do espaço urbano disponível (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

Quanto à área de solo exposto, em geral, apresentou um acréscimo de 42,42% ao passar do ano de 1975 para o ano de 2018, apesar de ter sofrido um decréscimo entre os anos de 2009-2018. Sendo observado que essa topologia foi a menos afetada com o tempo decorrido (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

O resultado obtido com análise temporal exibe o acréscimo significativo de área construída na região estudada, tal como a supressão da vegetação original ao longo de 44 anos de estudo. Esses são os principais fatores que interferem na instabilidade da encosta, intensificando o risco de deslizamentos (PEDROSA; ALMEIDA; LAFAYETTE, 2020).

O trabalho realizado por Albuquerque *et al.* (2017) trouxe a análise temporal para uma encosta localizada no município de Jaboatão dos Guararapes - PE, demonstrando que houve uma supressão da cobertura vegetal de 30,05% e o aumento da ocupação populacional no valor de 10,39% no período entre 1975 e 2014. A pesquisa realizada por Santos M. (2020), numa encosta situada na Ilha de Itamaracá, também revela a expansão da área urbanizada, conforme ocorre a supressão na área de vegetação, ao longo dos anos.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020) e mostram o quanto as encostas em outros locais também sofreram com a ação antrópica, principalmente nas questões de desmatamento e da impermeabilização do solo, contribuindo para a degradação ambiental e aumentando os riscos de deslizamentos.

5.1.2 Análise de Risco

A matriz de probabilidade/consequência representa a interação obtida com a formação de 90 quadrículas pontuadas com 13 quadrículas de impacto de altíssimo grau; 25 quadrículas de impacto de alto grau; 18 quadrículas de impacto de médio grau; 13 quadrículas de impacto de baixo grau; 16 quadrículas de impacto desprezível e 5 quadrículas que não apresentaram nenhum impacto ou potencial de dano para a área, conforme é apresentado na Tabela 2.

Com a elaboração da matriz de probabilidade/consequência, pode-se verificar que cada impacto gerado pela ação antrópica pode atingir a magnitude mínima de 0 e a máxima de 50, indicando um maior potencial danoso para a área. Em relação às ações antrópicas, a

magnitude mínima obtida foi de 0 e a máxima de 45. Com a elaboração de todas as interações obtidas pela relação entre os impactos gerados e as ações antrópicas correspondentes, é possível perceber que a magnitude máxima, resultado da soma de todas as interações, é de 450 pontos.

Tabela 2 – Matriz de probabilidade e consequência.

AÇÃO ANTRÓPICA QUE PODE GERAR IMPACTO	IMPACTOS GERADOS									
	Erosão	Instab. do solo	Escoamento superficial	Alagamentos	Impermeabilização	Redução da biodiversidade	Doenças	Qualidade de vida	Exclusão social	TOTAL
Supressão da cobertura vegetal	5	4	4	4	3	5	1	3	0	29
Alteração na consistência do terreno	5	4	4	4	3	2	1	0	0	23
Construções em áreas de encostas	3	4	2	2	3	3	0	4	4	25
Uso e ocupação do solo	5	5	4	4	4	4	2	4	3	35
Esgoto lançado em fossa séptica	2	1	2	2	1	1	2	3	1	15
Esgoto lançado diretamente no solo	4	4	3	2	1	5	5	4	4	32
Tipologia construtiva	2	4	3	2	3	1	1	3	3	22
Deposição irregular de lixo	1	3	2	3	1	5	4	5	4	28
Contaminação da água e do solo	1	1	1	1	1	5	4	5	4	23
Cortes no terreno para construções	5	5	4	4	2	3	0	3	3	29
TOTAL	33	35	29	28	22	34	20	34	26	**261**

Qualificação: 0 - Nenhum impacto; 1 - Impacto desprezível; 2- Impacto de baixo grau; 3 - Impacto de médio grau; 4 - Impacto de alto grau; 5 - Impacto de altíssimo grau

Faixas percentuais: 0% a 16,7% - não afetam; 16,8% a 33,7% - afetam em nível muito baixo; 33,8% a 50,4% - afetam em nível baixo; 50,5% a 67,1% - afetam em nível médio; 67,2% a 83,8% - afetam em nível alto e 83,9% a 100% - afetam em nível altíssimo

Fonte: Adaptado Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

Com a elaboração das interações referentes à análise da área de estudo, foi identificado que a matriz resultante apresentou uma magnitude total de 261 pontos, ou seja, 58,0% da magnitude máxima possível, o que leva a conclusão de que os impactos ambientais analisados na área

afetam a encosta em nível médio. Além disso, foi verificado que as ações antrópicas que mais afetam a localidade, gerando um maior impacto, são o esgoto que é lançado diretamente no solo e o uso e ocupação do solo, com magnitudes de 32 e 35, respectivamente.

As ações antrópicas de supressão da cobertura vegetal e realização de cortes no terreno para construção apresentaram magnitude máxima de 29 pontos, em que a supressão da cobertura vegetal afetou a localidade, com impacto de altíssimo grau na formação de processos erosivos e na redução da biodiversidade. As ações de cortes no terreno para construções influenciaram a área com impacto de altíssimo grau, no processo de erosão e instabilidade do solo. Resultados semelhantes podem ser obtidos nas pesquisas realizadas por Santos *et al*. (2020) e Santos, Silva e Lafayette (2019).

A supressão da cobertura vegetação original, ausência de sistema de esgotamento sanitário adequado, os cortes irregulares para realização de construções, o despejo inadequado de resíduos aliados com o peso da edificação no terreno, constituem os principais fatores para o agravamento da situação, principalmente em períodos chuvosos, como mostrado na Figura 37 (a e b). Foi observado no local também a presença de vetores transmissores de doenças, como ratos, aumentando o risco à saúde da população.

Figura 37 (a e b) – Sistema de esgoto sanitário precário e deposição irregular de lixo

Fonte: Pedrosa, Almeida e Lafayette (2020).

A erosão do solo, a redução da biodiversidade e a instabilidade do solo são os impactos obtidos pela elaboração da matriz, que apresentam a maior probabilidade de afetar a área de estudo, com magnitudes de 33, 34 e 35 pontos, respectivamente. Analisando o aspecto social da localidade, a qualidade de vida também representa um impacto com a maior probabilidade de ser afetado, em decorrência das ações antrópicas realizadas na área.

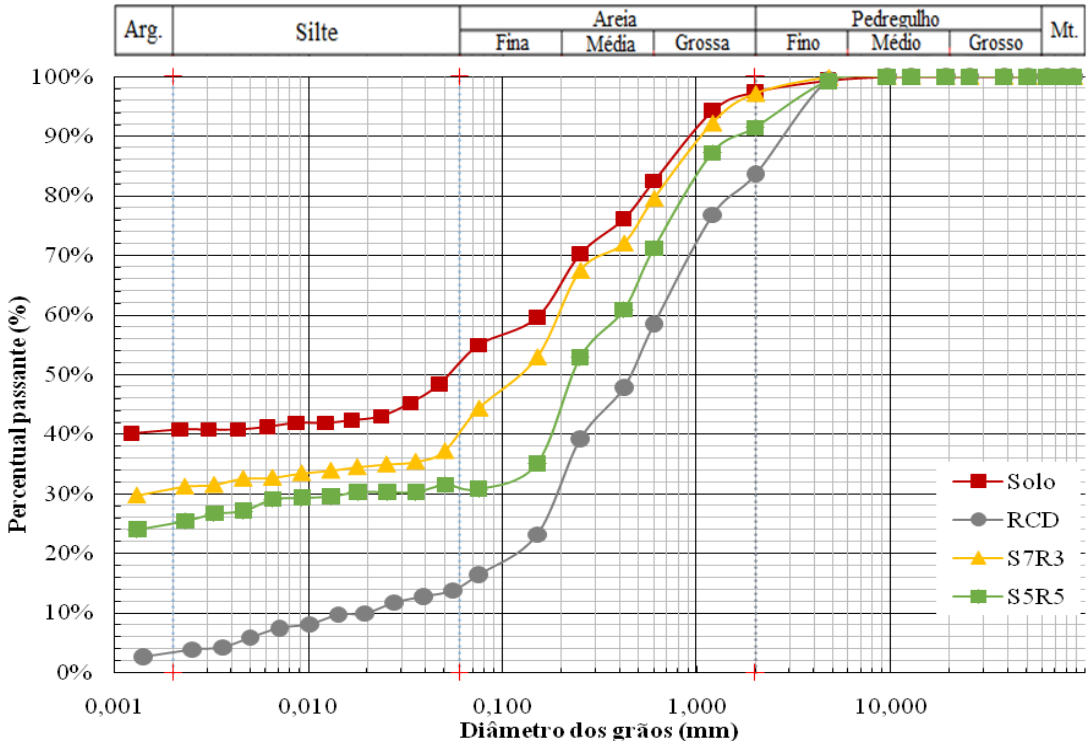
Com a análise da Tabela 2, é observado que a maior parte das ações antrópicas podem gerar impactos que irão a atingir a encosta de forma expressiva, ocasionando uma maior degradação ambiental.

5.2 Caracterização Física

5.2.1 Análise Granulométrica

As curvas granulométricas obtidas são referentes aos materiais e compósitos ensaiados, os quais envolveram solo, RCD e misturas de ambos materiais em diferentes percentuais. As curvas são apresentadas na Figura 34.

Figura 34 – Curvas Granulométricas



Fonte: Elaborado pela autora.

Para identificar a composição específica de cada curva obtida foi elaborada a Tabela 3, onde é possível observar os percentuais da fração granulométrica correspondentes aos materiais e suas misturas, além de permitir sua caracterização e classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (Tabela 3) e de acordo com *Transportation Research Board* – TRB (Tabela 4).

Tabela 3 – Percentual granulométrico.

Fração (mm)	**Percentuais**			
	SOLO	**RCD**	**S7R3**	**S5R5**
Argila	40,73%	3,50%	31,09%	24,11%
Silte	11,47%	10,60%	9,04%	7,29%
Areia	45,25%	69,51	56,98%	60,03%
Pedregulho	2,55%	16,39%	2,89%	8,57%
Relação Silte/ Argila	0,28%	3,03%	0,29%	0,30%

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 – Classificação dos Compósitos.

Compósitos	**Classificação**	
	SUCS	**TRB**
Solo	Argila arenosa – CL	Argila (A-6)
Solo + AR (30%)	Areia argilosa – SC	Solos siltosos (A-4)
Solo + AR (50%)	Areia argilosa – SC	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas (A-2-4)
Agregado reciclado	Areia bem graduada – SW	Fragmentos de pedra, pedregulhos e areias (A-1-b)

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, de acordo com o Sistema de Unificado dos Solos (SUCS), o solo foi classificado como uma argila arenosa (CL) de baixa plasticidade, tendo como predominância uma fração de areia com pouco mais de 50% e limite de liquidez inferior a 50. O agregado reciclado foi classificado como uma areia bem graduada (SW), e as misturas envolvendo os dois materiais tiveram uma classificação intermediária, como uma areia argilosa (SC).

Ao observar a fração dos elementos que compõe os materiais estudados, foi identificado um valor significativamente baixo para a relação de Silte e Argila na caracterização do solo, o que aponta para um maior estágio de intemperismo, ao se tratar de solos pertencentes às regiões tropicais (SANTOS; ZARONI, 2019). Contudo, devido ao fato dessa relação ser mais elevada no agregado reciclado, nas misturas envolvendo esse material também ocorre um aumento na relação de Silte e Argila, o que contribui para redução do processo erosivo sofrido pelo solo.

No estudo do RCD foi encontrado o coeficiente de uniformidade (Cu) no valor de 32 e o coeficiente de curvatura (Cc) no valor de 2,67. No entanto, o solo e os compósitos não apresentaram esses coeficientes, devido à ausência de um diâmetro efetivo, uma vez que não foi possível reconhecer o diâmetro da peneira na qual 10% das partículas do material ficaram retidas, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

De acordo com a classificação TRB, o solo estudado pertence ao grupo A-6, geralmente constituído de material argiloso e plástico, esse tipo de solo comumente sofre elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido, sendo considerado de mau comportamento quando aplicados como subleitos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, 2006).

Ainda conforme a classificação do TBR, o agregado reciclado foi enquadrado no subgrupo A-1-b, representado por fragmentos de pedras, pedregulhos e areia, bem como as misturas compostas por solo com 50% de agregado e solo com 30% de agregado, são correspondentes ao subgrupo A-1-b (fragmentos de pedras, pedregulhos e areia) e ao grupo A-4 (solos siltosos), respectivamente.

A classificação TRB também confirma que os compósitos compostos por 30% de agregado possuem comportamento variando de regular a ruim, já aqueles com mais de 50% de agregado reciclado apresentam comportamento que variam de excelente a bom, quando observados pela ótica da pavimentação, tendo sua aplicabilidade indicada para subleito de rodovias. Dessa forma, a adição de agregado aponta para uma melhoria do solo estudado.

5.2.2 Densidade real

O ensaio de densidade real dos grãos, realizado para diferentes amostras, apresentou valores compreendidos entre 2,69 e 2,48, como apontado na Tabela 5. Os resultados obtidos demonstram semelhança àqueles alcançados por pesquisas anteriores como de Nascimento *et al*. (2021), Portela (2019) e Silva, Fucale e Ferreira (2019) em que os valorem variaram de 2,61 até 2,73.

Tabela 5–Densidade Real das amostras

Amostra	Densidade Real (g/cm³)
Solo (100%)	2,69
Solo + AR (30%)	2,62
Solo + AR (50%)	2,60
AR (100%)	2,48

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3 Limites de Atterberg

Os limites de consistência apresentados na Tabela 6 apontam para amostras que variam de classificação altamente plástica para não plástica. É valido ressaltar que apenas a amostra de RCD apresentou classificação não plástica. Assim, foi observado que a adição de RCD às misturas, promove a redução do índice de plasticidade, tornando-as em amostras medianamente plásticas. Tal condição também é verificada no estudo de Souza, Rudnick e Lukiantchuki (2020).

Tabela 6–Limites de Atterberg e classificação

Amostra	LL (%)	LP(%)	IP (%)	Classificação
Solo (100%)	38,09	22,48	15,61	Altamente plástico
Solo + AR (30%)	31,28	19,08	12,2	Medianamente plástico
Solo + AR (50%)	28,64	18,30	10,34	Medianamente plástico
AR (100%)	NL	NP	-	Não Plástico

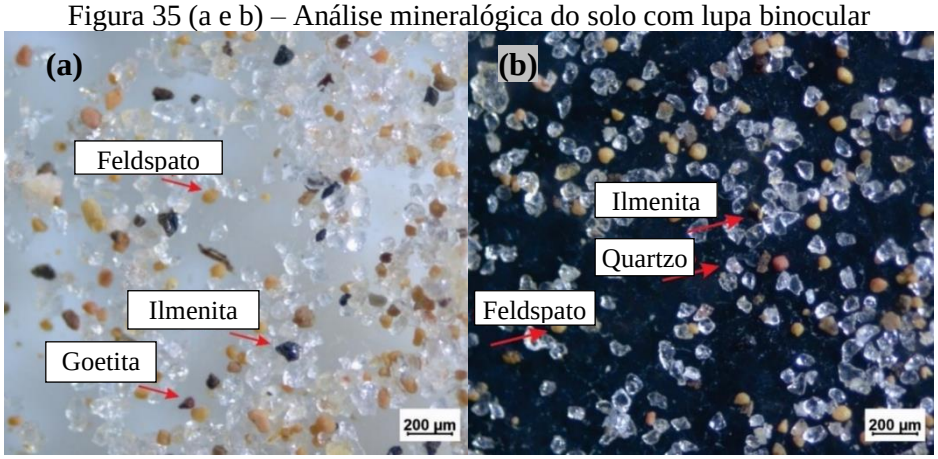
Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 Caracterização Química e Mineralógica

5.3.1 Análise mineralógica com lupa binocular

Na análise mineralógica da amostra fina do solo (Figura 35 a e b) e dos grãos de agregado reciclado (Figura 36), foram observadas a presença de quartzo, feldspato/Caulinita, goetita e/ou hematita, além de grãos de ilmenita.

Figura 35 (a e b) – Análise mineralógica do solo com lupa binocular



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 36–Análise mineralógica do RCD com lupa binocular

Fonte: Arquivo pessoal.

O quartzo é um mineral primário mais comum nas rochas, apresentando-se normalmente branco ou sem cor, mas exibindo coloração quando proveniente dos vestígios de impurezas, juntamente com sua capacidade de absorção de luz. Constitui um material bastante resistente ao intemperismo devido à estabilidade de sua estrutura, sendo comumente encontrado na maioria dos solos. A presença desse mineral em grande quantidade ocorre em solos com

características arenosas, sendo o principal mineral das frações de areia e silte dos solos (EARLE, 2019).

De modo semelhante, o feldspato compõe o grupo dos minerais primários, estando entre os mais comuns das rochas e da própria crosta terrestre, sendo também relativamente resistente à intemperização (SARAIVA *et al*., 2020). É encontrado com mais frequência nas frações de areia e silte e, somente em pequenas quantidades, na argila, de modo que sua presença depende da composição da rocha matriz e da intensidade do intemperismo ao qual foi exposta (EARLE, 2019). Na forma de mineral acessório, a ilmenita também está presente na porção de areia e silte, e possui a capacidade de liberação de íons de ferro após sofrer atuação do intemperismo (SILVA, L., 2016).

Com relação à amostra de RCD, o quartzo pode estar associado à porção de areia presente no concreto e na argamassa (NASCIMENTO, 2019). Enquanto que a caulinita está associada a presença de materiais cerâmicos, uma vez que consiste no principal componente do mineral caulim (ARTUSO; LUKIANTCHUKI, 2019).

Nos sistemas tropicais e subtropicais, assim como em solos intemperizados, ocorre frequentemente a presença de goethita sinalizada pela coloração amarelada ou brunada, e hematita, que confere coloração avermelhada, até mesmo quando presente em menor quantidade (PEREIRA *et al*., 2020). A goetita e a hematita também são responsáveis por afetar a estabilidade e morfologia do solo e apresentam influência na sua estruturação e agregação, uma vez que favorecem a absorção e infiltração de água, além de atuar no controle da erosão (RATIÉ *et al*., 2019; SILVA, L., 2016).

5.3.2 Análise Química

A análise química (Tabela 7) apresentou informações acerca dos elementos químicos, do complexo sortivo, da soma de bases trocáveis, da capacidade de troca catiônica e do percentual de saturação por bases, tanto para o material de RCD como para de solo.

Tabela 7–Propriedades química do solo e do agregado reciclado

Amostra	Ca	Mg	Al	Na	K	H+Al	S	CTC	V
			$cmol_c\,dm^{-3}$				(cmol/dm³)	(cmol/dm³)	(%)
SOLO	4,1	0,6	0	0,27	0,36	1,72	5,33	7,05	76
RCD	13,7	2,7	0	0,95	0,52	0	17,87	17,87	100

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a Embrapa (2017), o complexo sortivo representa as partículas trocadoras de íons do solo. Já a soma das bases trocáveis (S) consiste no somatório dos valores referentes aos íons de cálcio, magnésio, sódio e potássio, resultando em 5,33cmol/dm³ para o solo e 17,87cmol/dm³ para o RCD. Esse somatório serve de base para o cálculo do CTC, o qual é a capacidade do material estudado de manter esses íons carregados negativamente.

O resultado do CTC corresponde ao valor S somado às bases de hidrogênio e alumínio, assumindo o valor de 7,05cmol/dm³ e 17,87cmol/dm³ para as amostras de solo e RCD respectivamente. Ferreira *et al*. (2017) afirma que esses valores são considerados baixos quando inferiores a 27 cmol/Kg, apontando para um solo não expansivo.

O percentual de saturação por bases (V%) condiz com a proporção da CTC do material preenchida pelas bases trocáveis (EMBRAPA, 2017). O valor encontrado para o solo foi de 76%, sendo considerado um valor alto (V% > 50%) (PORTELA, 2019). Ainda conforme Embrapa (2017), o solo é caracterizado como eutrófico, equivalendo à um material altamente fértil, favorecendo seu uso na agricultura.

Os Solos argilosos costumam possuir maior quantidade de Mg (magnésio), devido ao alto CTC, enquanto que no RCD é provavelmente originado da cal virgem, assim como o Ca (cálcio), o qual possui poder cimentante. Os solos com altos teores de cálcio possuem baixo grau de intemperização, mas também apresentam alto CTC. Por fim, o K (potássio) está relacionado com absorção de água e transporte de nutrientes, enquanto que sua lixiviação será mais evidente em solos com baixo CTC, associado a ambientes pouco argilosos (BATISTA *et al*., 2018).

5.3.3 Fluorescência de raio X

O ensaio de fluorescência de raio X apresentou alta predominância da sílica (SiO2) para ambas as amostras estudadas, solo e principalmente, RCD, conforme a Tabela 8. Na amostra de RCD também foi observado presença significativa de alumínio (Al_2O_3) e óxidos de ferro totais (Fe2O3t).

Tabela 8– Principais elementos observados no ensaio de fluorescência de raios X do RCD e solo.

Amostra	**SiO_2**	**MgO**	**Fe_2O_{3t}**	**Al_2O_3**	**K_2O**	**CaO**	**TiO_2**	**Cr_2O_3**	**MnO**	**Total**
RCD (%)	69,7	1,2	11,3	10,2	2,7	4,0	0,7	0,0	0,1	100
Solo (%)	45,1	0,0	35,2	14,9	0,2	0,6	3,9	0,1	0,0	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Na amostra de RCD, o elevado teor de sílica pode estar relacionado com a presença de resíduos de agregados e de argamassa, já teores de alumínio (Al2O3) apontam para cerâmicas vermelhas. Ademais, os óxidos de silício, alumínio, cálcio e de ferro correspondem aos constituintes fundamentais do cimento Portland, comprovando a participação predominante do concreto nesse resíduo, o que favorece o ganho de resistência (NASCIMENTO, 2019; PORTELA *et al*., 2021).

Para a amostra de solo, o ensaio de fluorescência de raios-X apresentou além da predominância da sílica (SiO_2), teores relevantes de óxidos de ferro totais (Fe_2O_{3t}) e de alumínio (Al_2O_3). A presença desses óxidos pode estar associada ao elemento da caulinita, a qual é responsável por desenvolver plasticidade e expansão de solos argilosos (ORTEGA; CAMPOS, 2017), uma vez que o solo em estudo se trata de um material argilo arenoso. Os óxidos de ferro e alumínio, em função de sua ação cimentante, fornecem ao solo um alto grau de agregação natural, favorecendo no ganho de resistência (ROCHA, 2018).

A sílica é forma mais comum que o elemento silício (Si) se apresenta na natureza, pertencente ao grupo dos minerais silicatados responsáveis pela formação de rochas e sedimentos, como areia, silte e argila. O silício está diretamente relacionado com o processo de intemperismo sofrido pelo solo e além de atuar na intensificação da capacidade fotossintética, com a redução da transpiração, evitando a perda excessiva de água, também promove o aumento da

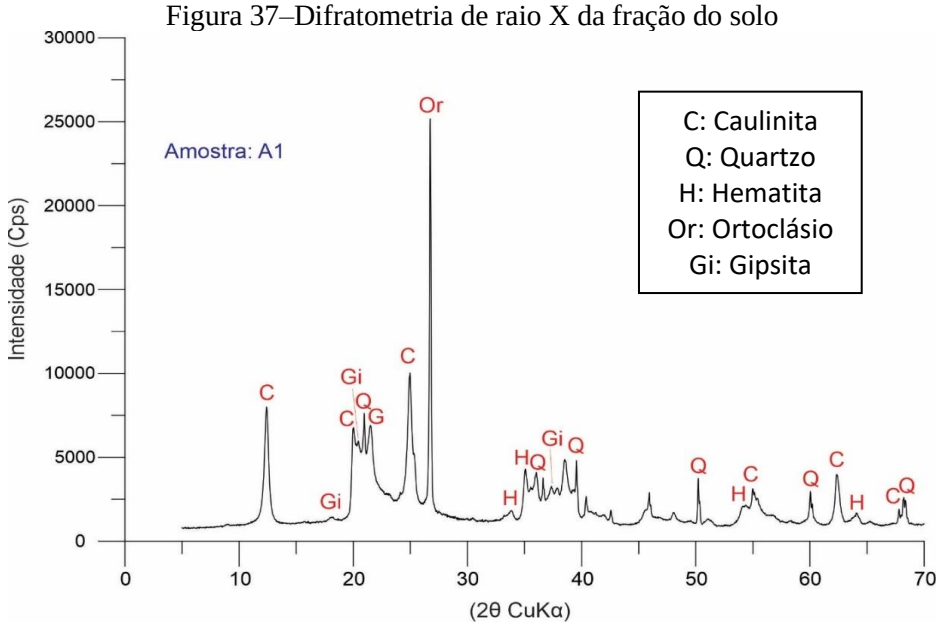
disponibilidade de nutrientes, bem como o fortalecimento das plantas. Assim, o silício é capaz de reduzir o grau de toxidade do solo e proporcionar maior resistência a inconvenientes bióticos e abióticos (LANNA; FERREIRA; FILIPPI, 2021; SANTOS *et al*., 2021) .

Observações pertinentes acerca do ensaio são que, os valores expressos em porcentagem na forma de óxidos, demonstram 95% de confiabilidade; o elemento NaO_2 não é detectado por este método; a soma dos óxidos foi corrigida para 100%, sem considerar a perda ao fogo; e Fe_2O_{3t} se refere aos óxidos de ferro totais.

5.3.4 Difração de raio X

A análise do solo demonstrou a presença de caulinita, que é predominante nos solos lateríticos, e gipsita, minerais associados a fração de argila (ARTUSO; LUKIANTCHUKI, 2019). Além da hematita que está intimamente ligada à coloração do material, e também indentificou a presença de quartzo e ortoclásio que são minerais relacionados com a fração arenosa (Figura 37).

Figura 37–Difratometria de raio X da fração do solo



Fonte: Elaborado pela autora.

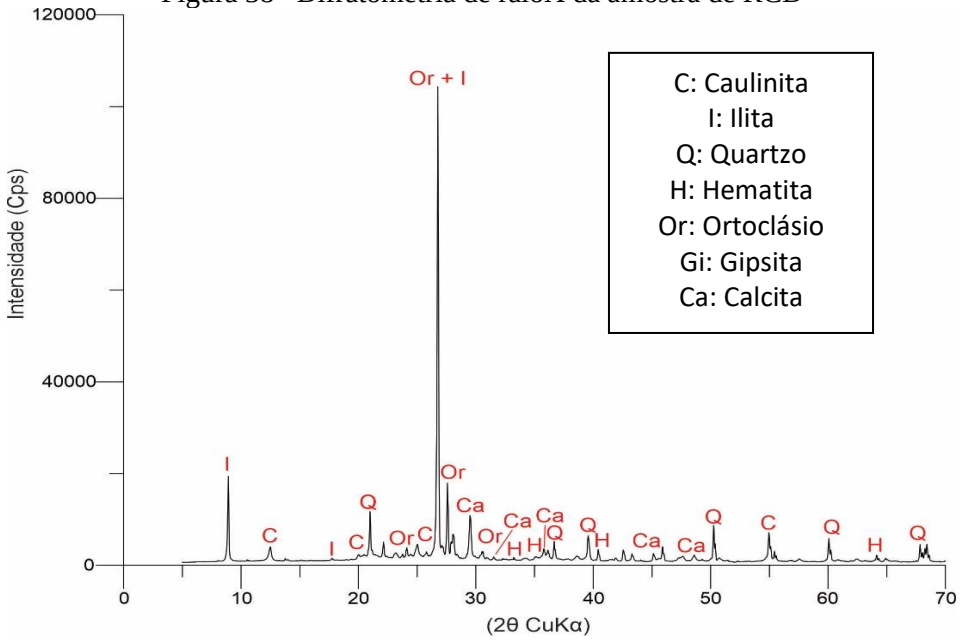
A caulinita está principalmente associada às grandes concentrações de ferro e alumínio, possuindo certa estabilidade no solo, com baixa Capacidade de Troca de Cátions (CTC). É um

mineral ligado às áreas onde há predisposição para ação de intemperismo, com climas de temperatura elevada, boa drenagem e alta umidade (PEREIRA *et al*., 2020).

De acordo com Melo *et al.* (2017), a gipsita *in natura* confere ao solo o aumento do teor de cálcio, ao passo que reduz a quantidade de alumínio, promovendo o desenvolvimento radicular, devido a redução da compactação do solo e seus efeitos tóxicos. Assim, a gipsita estimula a absorção de água e nutrientes, potencializando a resistência das plantas. Ademais, esse mineral apresenta boa solubilidade e atua no aumento da permeabilidade, da drenagem e da aeração do solo.

Na análise realizada na amostra de agregado recilado (AR) (Figura 38), foram identificados picos de caulinita, Ilita, quartzo, hematita, ortoclásio, gipsita e calcita. A caulinita aponta a presença de materiais cerâmicos, os quais de modo semelhantes estão associados ao ortoclásio (ARTUSO; LUKIANTCHUKI, 2019). Com relação ao minerais de quartzo, ocorrem em decorrência da fração de areia geralmente utilizada no concreto e na argamassa dos resíduos da contrução, similarmente a calcita é amplamente empregada na fabricação de cimentos e cal para argamassa (SOUZA; RUDNICK; LUKIANTCHUKI, 2020).

Figura 38– Difratometria de raioX da amostra de RCD



Fonte: Elaborado pela autora.

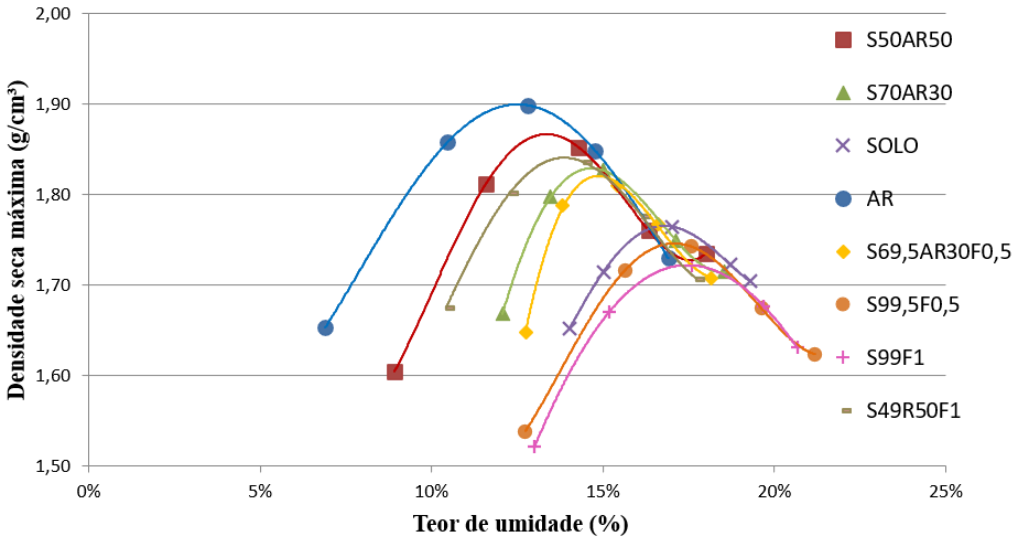
A hematita é proveniente de material ferroso. Já a gipsita pode ser utilizada na forma natural ou calcinada, a forma natural é bastante usada na agricultura e na indústria de cimento, enquanto a forma calcinada, conhecida como gesso, encontra várias utilizações na construção civil.

5.4 Caracterização mecânica

5.4.1 Compactação

As curvas de compactação são exibidas na Figura 39, observando o comportamento das amostras de solo, de RCD e fibras, bem como de suas misturas. O solo ensaiado apresentou umidade ótima de 17,02% e densidade seca máxima de 1,763 g/cm³, ao passo que o RCD apresentou umidade ótima de 12,39% e densidade seca máxima de 1,894 g/cm³.

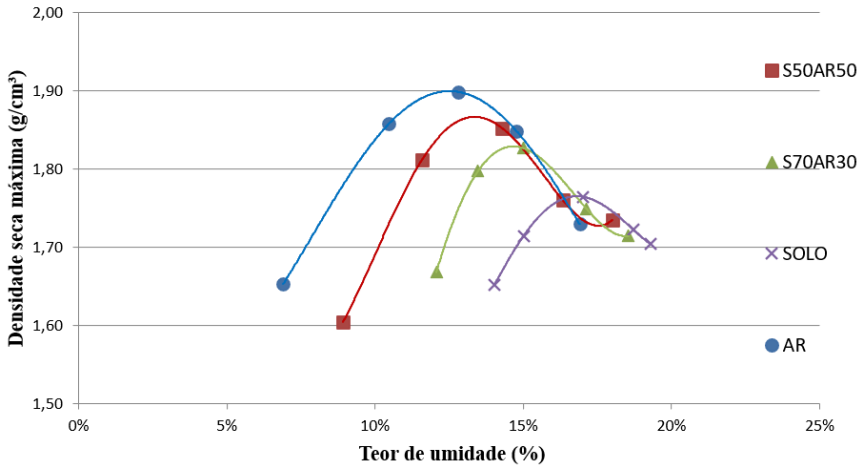
Figura 39 – Curvas do ensaio de compactação



Fonte: Elaborado pela autora.

As misturas envolvendo solo e RCD apresentaram resultados com valores intermediários aos obtidos para esses materiais de forma isolada (Figura 40). Assim, a mistura de solo com 30% de resíduo e solo com 50% de resíduo obtiveram umidade ótima de 15,39 % e 14,08%, respectivamente. Enquanto que a densidade seca máxima passou de 1,821 para 1,845 g/cm³ à medida que ocorreu o acréscimo de resíduo.

Figura 40 – Comportamento da adição de RCD à matriz do solo nas curvas de compactação

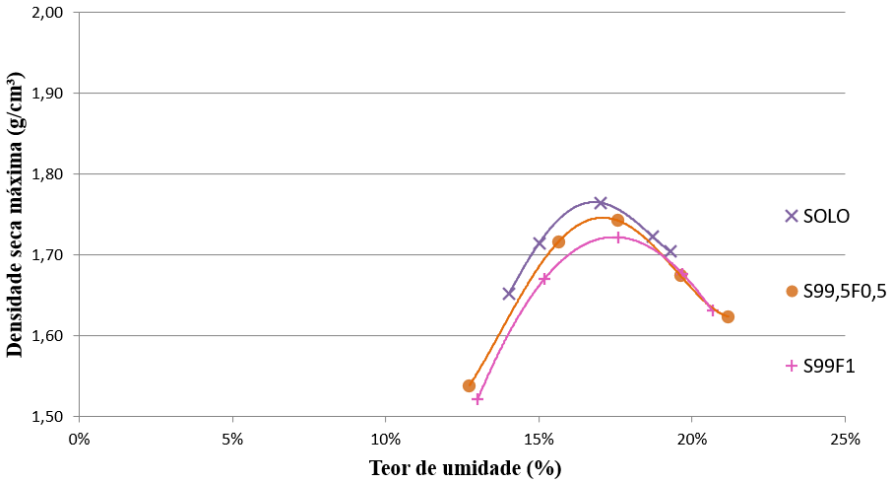


Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar a Figura 40, é possível observar que a adição de RCD promove o aumento da densidade seca máxima e uma redução da umidade ótima. Esse comportamento também foi relatado por Souza, Rudnick e Lukiantchuki (2020). Tal cenário ocorre devido à incorporação de um material mais granular, associado ao processo de compactação, que juntos fornecem uma melhor acomodação das partículas dos materiais (SILVA, 2018).

Ao observar especificamente o efeito das fibras nas misturas (Figura 41), foi verificado que a adição desse material provoca o aumento da umidade ótima, bem como a diminuição da densidade seca máxima. Resultado análogo foi obtido por Lucarelli (2018), que justifica esse comportamento em razão da ocupação por elemento mais leve (menos densos), as fibras, dos vazios que seriam preenchidos por grãos do solo.

Figura 41 –Comportamento da adição de fibras à matriz do solo nas curvas de compactação



Fonte: Elaborado pela autora.

Com o intuito de identificar isoladamente os valores referentes às umidades ótima e às densidades seca máxima das amostras estudadas, foi elaborada a Tabela 9. Resultado semelhante foi identificado nas pesquisas de Souza, Rudnick e Lukiantchuki (2020) e Artuso e Lukiantchuki (2019), identificando que a adição de RCD promove o aumento da densidade seca máxima e uma redução da umidade ótima, enquanto que com a incorporação de fibras o comportamento é inverso.

Tabela 9 – Úmidade ótima e densidades seca máxima

Amostras	**Wot (%)**	**γs (g/cm³)**
Solo (100%)	17,02	1,763
Solo + 0,5 FIBRA	17,43	1,737
Solo + 1% FIBRA	17,55	1,723
Solo + AR 30%+ 0,5 FIBRA	15,60	1,811
Solo + AR 30%	15,39	1,821
Solo + AR 50%+ 1% FIBRA	14,20	1,832
Solo + AR 50%	14,08	1,845
AR (100%)	12, 39	1,894

Fonte: Elaborado pela autora.

5.4.2 Resistência à compressão simples (RCS)

As curvas de tensão x deformação são apresentadas como resultado do ensaio de compressão simples após submissão de carga aos corpos de prova. Na Figura 42 é apresentado o corpo de prova após o rompimento realizado mediante a aplicação de carga.

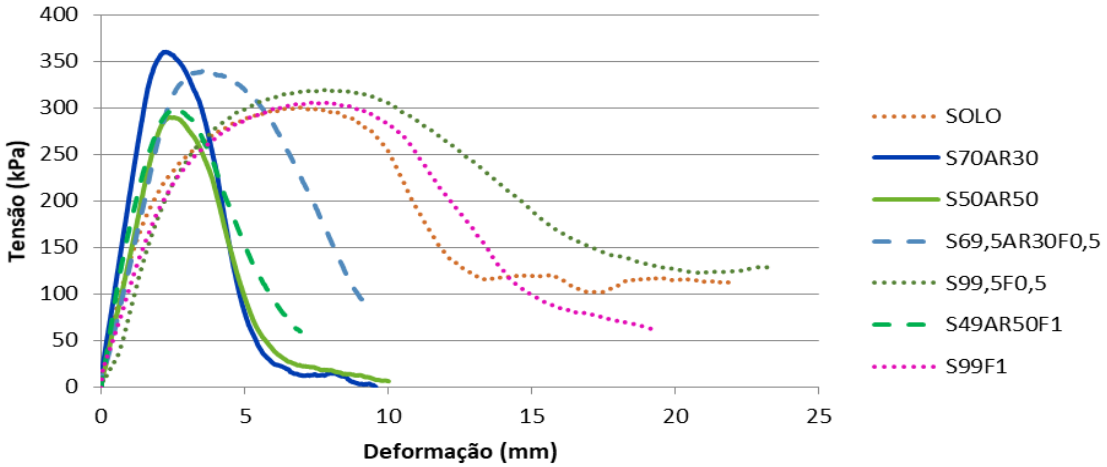
Figura 42 – Corpo de prova rompido com plano de ruptura de 60º

Fonte: Arquivo pessoal.

O plano de ruptura observado apresenta ângulo na ordem dos 60º, demonstrando uma ruptura clássica e característica de comportamento frágil. Esse tipo de ruptura também foi encontrado por Santos M. (2020), com argila inorgânica, em Portela (2019) com solo de areia siltosa e em Marçal (2019), em seu estudo com solo de argila.

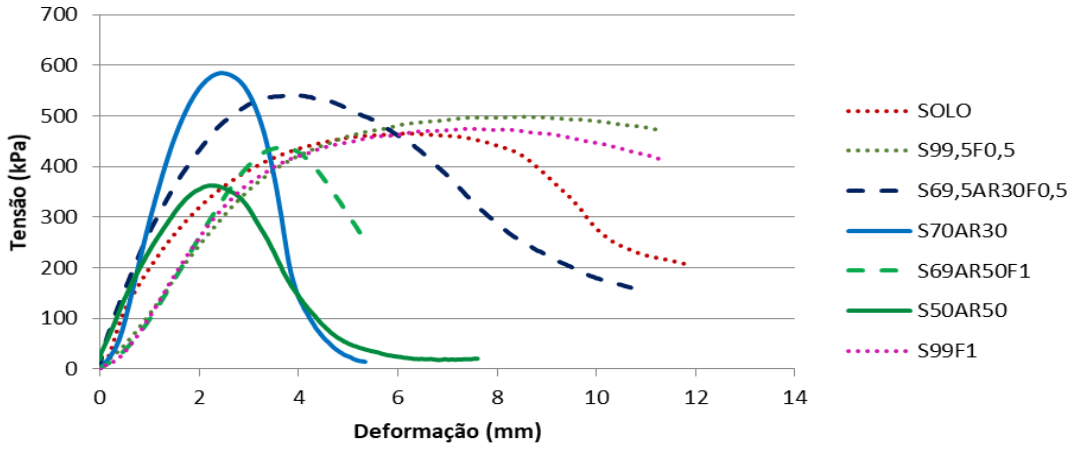
As curvas de resistência à compressão das amostras estudadas para os períodos de 7, 28 e 60 dias de cura úmida são apresentadas na Figura 43, Figura 44 e Figura 45. Nesses períodos, foram observados que os comportamentos das curvas, assim como os resultados das resistências, seguiram basicamente um padrão, onde amostras compostas por fibras demonstram pontos de rupturas mais suaves, com maiores deformações e as amostras compostas por 30% de AR e/ou 0,5 % de fibra apresentam os melhores valores de resistência.

Figura 43 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos para 7 dias de cura úmida.



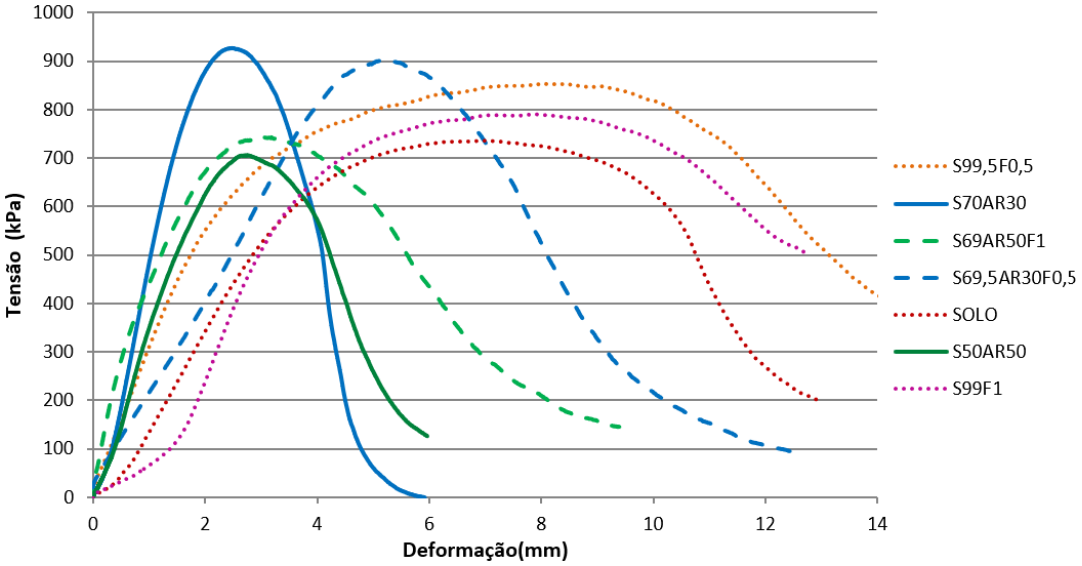
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos para 28 dias de cura úmida.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 45– Curvas de tensão x deformação dos compósitos para 60 dias de cura úmida.



Fonte: Elaborado pela autora.

As curvas obtidas demonstram que tanto a adição de agregado reciclado como incorporação de fibras ao solo provocam acréscimo na resistência até uma porcentagem ideal, onde a resistência tende a estabilizar ou diminuir. Lucarelli (2018) e Costas, Tzetzis e Berketis (2013) afirmam que o incremento de materiais ao solo acima do valor ideal resulta em misturas com menor contato entre as partículas do solo, reduzindo a disponibilidade de matriz desse para conter o material inserido, desenvolvendo uma ligação insatisfatória.

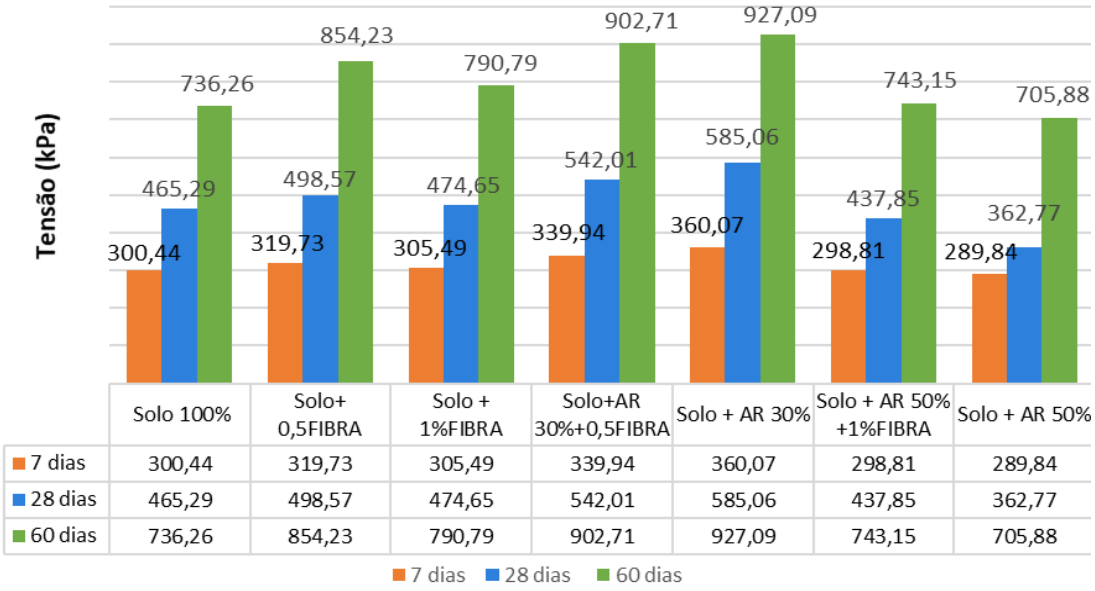
Ao analisar as curvas de resistência, é observado que, apesar do valor da tensão de ruptura suportada pelo compósito com 30% de agregado ser maior que os valores das tensões dos compósitos com fibra, a deformação desses apresentam valores mais elevados. Assim, é possível inferir que os compósitos com agregado manifestam rupturas mais bruscas, ao contrário daqueles compostos por fibras.

Tal comportamento também foi observado em outras pesquisas, como em Silva (2020) e Nascimento (2019), de modo que Silva (2020) atribuiu à presença do AR a causa dos elevados aumentos na resistência, das baixas deformabilidades e da frágil ruptura. A justificativa desse desempenho em função da acomodação das partículas do solo após a adição do AR, proveniente da maior compacidade na matriz estrutural (ARTUSO; LUKIANTCHUKI, 2019).

Do ponto de vista geotécnico, uma deformação mais longa, bem como um nível de deformação maior na ruptura, são aspectos considerados mais interessantes, como é o cenário apresentado pelas misturas incorporados por fibra de PET, as quais tendem a conferir maior ductilidade ao compósito (CASTILHO; RODRIGUES e LODI, 2021). Em uma deformação gradativa é possível prever a ocorrência de deslizamentos a tempo de impedir, por meio de uma intervenção técnica, acidentes iminentes.

Nesse contexto, a Figura 46 apresenta os resultados obtidos com o ensaio de compressão simples de todas as amostras para todos os períodos de cura estudados. No período de cura de 7 dias, a resistência à compressão atingiu valores de 360,07 kPa para os compósitos de solo com 30% de AR e 289,84 kPa para os de solo com 50% de AR.

Figura 46– Valores de resistência à compressão simples dos compósitos para os períodos de cura estudados.



	Solo 100%	Solo+ 0,5FIBRA	Solo + 1%FIBRA	Solo+AR 30%+0,5FIBRA	Solo + AR 30%	Solo + AR 50% +1%FIBRA	Solo + AR 50%
7 dias	300,44	319,73	305,49	339,94	360,07	298,81	289,84
28 dias	465,29	498,57	474,65	542,01	585,06	437,85	362,77
60 dias	736,26	854,23	790,79	902,71	927,09	743,15	705,88

Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda para o período de cura de 7 dias, com a inserção das fibras, a resistência apresentou valores de 319,73 kPa para as amostras de solo com 0,5% de fibra de pet e 305,49 kPa para as de solo com 1% de fibra. Nas misturas envolvendo AR e fibra, o resultado foi de 339,94 kPa para as amostras contendo solo, 30% de AR e 0,5% de fibra e 298,81 para aquelas compostas por solo, 50% de AR e 1% de fibra.

No período de 28 dias, as resistências obtidas para as amostras compostas por agregado apresentaram valores de 585,06 kPa para as misturas de solo com 30% de AR e 362,77 kPa

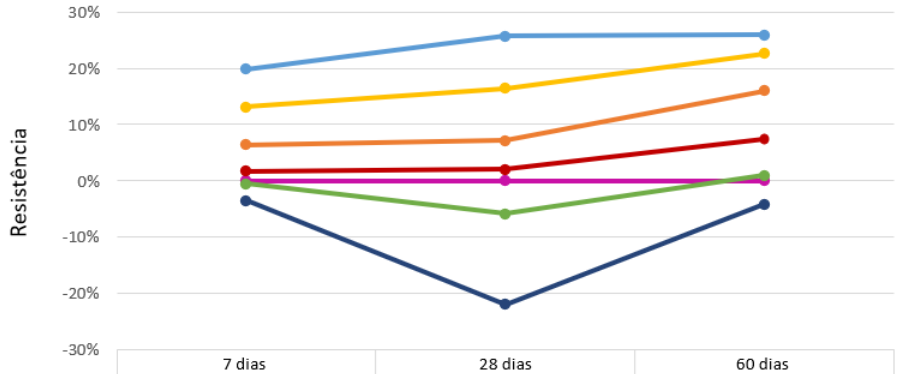
para as de solo com 50% de AR. Ao analisar os compósitos com adição de fibras, foi identificado resultados de 498,57 kPa para as amostras de solo com 0,5% de fibra de PET e 474,65 kPa para as de solo com 1% de fibra. Já as misturas com solo, 0,5% de fibra e 30% de AR assumiram a resistência de 542,01 kPa e aquelas contendo solo 1% de fibra e 50% de AR obtiveram 437,85 kPa.

Por fim, ao final dos 60 dias de cura, os compósitos de solo com 30% de AR e 50% de AR apresentaram valores de resistência de 927,09 kPa e 705,88 kPa, respectivamente. Com a adição de fibras, as amostras com solo e 0,5 % de fibra obtiveram resultado de 854,23 kPa e as de solo com 1% de fibra obtiveram 790, 79 kPa. As misturas envolvendo solo, 30% AR e 0,5% de fibra apresentaram resistência de 902,71 kPa, já as com solo, 50% de AR e 1% de fibra a resistência foi de 743,15kPa.

O aumento da resistência do solo natural após a adição de 1% de fibra de PET também é verificado por Freitas *et al.* (2021). De acordo com Freitas *et al.* (2021), a adição de PET ao solo natural promove além do aumento da capacidade de carga, a melhoria da rigidez, com a diminuição dos deslocamentos para as cargas de serviço, uma vez que a superfície de ruptura mobiliza uma região maior.

Diante desse cenário, é interessante analisar as taxas de crescimento das resistências dos compósitos para as diferentes idades estudadas, as quais são apresentadas na Figura 47. No primeiro período de cura estudado, 7 dias, a resistência do solo natural aumentou na ordem de 20%, após a incorporação de 30% de AR e diminuiu em 3,5% para a amostra com 50% de AR. A adição de 0,5% de fibras promoveu um incremento 6,4% da resistência, enquanto que as amostras com 1% de fibra aumentaram a resistência em 1,7%. Os resultados obtidos são análogos ao do estudo de Polastri (2017), o qual atingiu um aumento de resistência em torno de 4,5% na incorporação de mesma porcentagem de PET à amostra de solo.

Figura 47 – Taxa de crescimento das RCS dos compósitos para as diferentes idades.



	7 dias	28 dias	60 dias
Solo (100%)	0%	0%	0%
Solo + 0,5 FIBRA	6,42%	7,15%	16,02%
Solo + 1% FIBRA	1,68%	2,01%	7,41%
Solo + AR 30% + 0,5 FIBRA	13,15%	16,49%	22,61%
Solo + AR 30%	19,85%	25,74%	25,92%
Solo + AR 50% + 1% FIBRA	-0,54%	-5,90%	0,94%
Solo + AR 50%	-3,53%	-22,03%	-4,13%

Fonte: Elaborado pela autora.

Aos 28 dias de cura, as amostras que demonstraram resistências superiores, obtiveram aumentos percentuais em relação ao solo natural daquela idade na ordem de 7,1%, 25,7% e 16,5%, referente as misturas de solo com 0,5% de fibra, de solo com 30% de AR e solo com 30% de AR juntamente com 0,5% de fibra, respectivamente. Já no período de cura de 60 dias, esses percentuais aumentam e alcançam porcentagens de 16%, 25,9% e 22,6%, para a mesma sequência de compósitos.

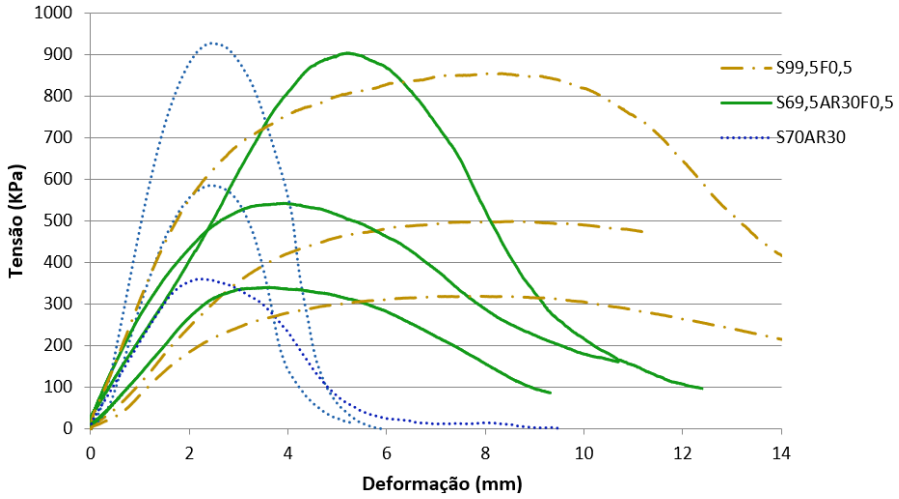
O estudo de Mesavilla (2020) correlaciona esse crescimento percentual da RCS ao processo de aumento das reações pozolânicas do RCD com o solo, que ocasionam a cimentação do material, bem como, de acordo com Nascimento (2019), ocorre com a interação do solo com as interfaces da fibra, promovendo maior força de união.

O comportamento de acréscimo de resistência que acompanha o aumento do período de cura, com obtenção do melhor resultado para o último período estudado, também foi observado por Yarbaşi e Kalkan (2020), ao analisar o desempenho mecânico de solos argilosos reforçados com resíduos de fibras PET.

Nesse contexto, identificando as amostras com maiores valores de resistência e também com as mais elevadas taxas de crescimento, torna-se importante analisar o comportamento dessas misturas ao longo das idades de cura (7, 28 e 60 dias) sob uma mesma perspectiva (Figura

48). Assim, é possível perceber como as misturas envolvendo simultaneamente fibra e AR, demonstram-se interessantes pela ótica do aprimoramento geotécnico, uma vez que conseguem alinhar dois aspectos importantes, o aumento da resistência com uma deformação mais prolongada.

Figura 48– Comportamento das amostras envolvendo fibra e agregado sob uma mesma perspectiva.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.5 Análise estatística dos resultados da RCS

A análise estatística foi realizada mediante a aplicação de um modelo estatísco que permitiu descrever o comportamento da resistência à compressão simples em função de determinados fatores, a fim de definir o teor ideal para otimizar o desempenho do projeto. De acordo com o estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2021) e Güllü e Fedakar (2017), os parâmetros de maior influência para técnicas de estabilização de solo foram tempo de cura (TC) dos corpos de prova e os teores dos materiais, como fibra e AR, adicionados aos compósitos (Tabela 10).

Tabela 10 – Parâmetros e intervalos das variáveis

Parâmetro	Intervalo
Teor de RCD	0% a 50%
Teor de fibra de PET	0% a 1%
Tempo de Cura (TC)	7 a 60 dias

Fonte: Elaborado pela autora.

As interações das variáveis independentes (TC, teor de fibra e de AR) e da variável resposta (RCS) estão apresentadas na Tabela 11, uma vez que sua confiança foi estabelecida através do controle tecnológico efetuado na produção dos corpos de prova.

Tabela 11 – Interações entre as variáveis

Fibra de PET (%)	**TC** / **AR (%)**	**7 dias**	**28 dias**	**60 dias**
		Resistência à compressão simples (kPa)		
0	**0**	300,44	465,29	736,26
0,5	**0**	319,73	498,57	854,23
1	**0**	305,49	474,65	790,79
0,5	**30**	339,94	542,01	902,71
0	**30**	360,07	585,06	927,09
1	**50**	298,81	437,85	743,15
0	**50**	289,84	362,77	705,88

Fonte: Elaborado pela autora.

Com o intuito de que o modelo correspondesse com máxima precisão a realidade, foi necessário suprimir cinco interações de variáveis, as de TC com TC, AR com AR, fibra com fibra, AR com TC e Fibra com TC. Assim, a Tabela 12 exibe os resultados fornecidos pelo software, diante dos critérios de aceitação estabelecidos.

Tabela 12– Variância das variáveis independentes

Fonte de Variação (*Source*)	**Graus de Liberdade** (*DF*)	**Soma dos quadrados ajustada** (*Adj SS*)	**Quadrados médios ajustados** (*Adj MS*)	**Valor-F** (*F-Value*)	**Valor-P (Nível de significância)** *(P-Value)*
Modelo *(Model)*	6	937876	156313	101,81	0
Linear *(Linear)*	3	857344	285781	186,14	0
AR	1	8412	8412	5,48	0,035
FIBRA	1	1242	1242	0,81	0,027
TC	1	848105	848105	552,41	0
Quadrados *(Square)*	3	59471	19824	12,91	0
AR*AR	1	42730	42730	27,83	0
FIBRA*FIBRA	1	282	282	0,18	0,050
TC*TC	1	4277	4277	2,79	0,031
Erro *(Error)*	14	21494	1452		
Total	20	959370			

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 12 também mostra alguns novos fatores, como *DF*, *Adj SS*, *Adj MS e Valor-F*,os quais representam medidas da amplitude de variação e exprimem a interferência em que as variáveis dispõem sobre a RCS, fundamentação necessária para determinação do nível de significância. O resultado das interações indicam para um comportamento positivo e uma boa aderência ao modelo.

O resultado das interações indicam para um comportamento positivo e uma boa aderência ao modelo, principalmente para o TC e AR*AR, que apresentaram valores muito próximos de 0 para o Valor-P. Segundo Shirazi, Khademalrasoul e Ardebili (2020), tais resultados estão abaixo do valor limite de 0,05, para estudos dessa natureza, indicando que as variaveis independentes TC e AR influem fortemente no comportamento do modelo.

A Tabela 13 representa a sintetização do modelo, onde o valor do R^2 encontrado (97,76%) representa um grau excelente de sua representatividade para prever o comportamento da RCS, em conformidade com outras pesquisas desenvolvidas nessa área, como as de Güllü e Fedakar (2017), Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) e Wang, Cheng e Tan (2018). Outro aspecto que confere qualidade à adequação do modelo é a diferença entre os valores do R^2 Ajustado (96,80%)e do R^2 Previsto (94,94%) obter resultadomenor que 20% (1,86%), como defende o estudo de DeLoach e Ulbrich (2007).

Tabela 13– Modelo sintetizado

S	**R^2 (Modelo)** *R-sq*	**R^2 Ajustado (Modelo)** *R-sq(adj)*	**R^2 Previsto (Modelo)** *R-sq(pred)*
38,1015	97,76%	96,80%	94,94%

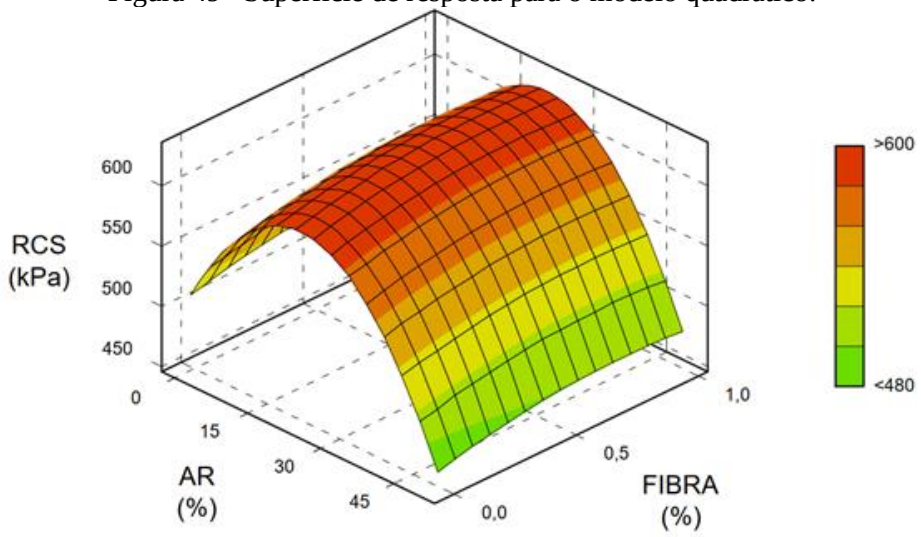
Fonte: Elaborado pela autora.

Diante de indicadores de adequação positivos, foi realizada a otimização da resistência do solo, com base nos valores dos parâmetros eficazes (Fibra, AR e TC), tendo como base o polinômio quadrático sugerido através da metodologia RSM, conforme apresentado na Equação 1.

RCS = 249,5 + 8,67 AR + 56,4 FIBRA + 6,25 TC - 0,1938 AR*AR + 36,8 FIBRA*FIBRA + 0,0454 TC*TC eq. 1

Desta maneira, foi possivel definir e traçar a superficie de resposta do modelo, que é uma peça chave para a correta otimização do sistema, e assim descrever mais precisamente a forma que as interações entre as variáveis influem no comportamento da RCS (Figura 49).

Figura 49– Superfície de resposta para o modelo quadrático.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a análise da superficie foi possível minimizar o dominio de soluções possíveis para a resposta otimizada, que visou maximizar o valor da RCS. Logo, o teor de incorporação de materiais no solo e o tempo de cura em câmara úmida, com maior tendência de estar na área mais proxima do topo da superfície (Figura 49).

Para tanto foram aplicados vários condicionantes ao modelo, de maneira a restringir ao máximo os resultados com a maior média, no intervalo de possíveis soluções para a RCS, e a maior probabilidade de coincidir com a realidade, conforme críterios definidos pelo software (Tabela 14).

Tabela 14– Previsão de teores das variáveis responsáveis por promover resposta otimizada

Variáveis *(Variable)*	**Definições** *(Setting)*
AR (%)	22,2222
FIBRA (%)	0,767
TC (%)	60
RCS (kPa)	906,2

Fonte: Elaborado pela autora.

Os teores obtidos optimizam positivamente a resposta da RCS e mostram que a variável de TC coincide com o limite superior para os intervalos utilizados. Esse resultado indica que a variação positiva (crescente) de ambas tende a maximizar o valor da RCS quando incrementadas, quase que assumindo uma relação linear postiva.

Todavia, a quantidade de AR ficou próxima do mínimo de seu intervalo, enquanto a parcela de fibra próxima do limite máximo, sugerindo que sua incorporação nos compósitos tende a aumentar a resistência, porém somente em uma determinada faixa de valores. Esse resultado preconiza que a relação da variável AR e de fibra com a RCS se aproxima do formato de uma parábola com concavidade para baixo, ou seja, com ponto de máximo definido.

Por fim, o intervalo de confiança obtido varia de 855,8 kPa até 956,7 kPa, o que significa que há uma probabilidade de 95% do valor da resistência, após a ótimização do modelo, assumir um resultado dentro desse intervalo.

6 CONCLUSÕES

Na análise da dinâmica de ocupação da encosta localizada no município de Olinda-PE, com a utilização da técnica de detecção remota, foi identificado o aumento da mancha urbana em 123% ao longo do tempo, alcançando o valor de 63% da área de estudo no ano de 2018, bem como o aumento da área de solo exposto em 42%, durante o mesmo período, ao passo que a região composta por vegetação sofreu uma supressão na ordem de 55%.

Ao retirar a vegetação, a qual fornece proteção e resistência natural ao solo, além de aumentar a exposição às intempéries, com o acréscimo de solo exposto e aumentar a sobrecarga com construções irregulares, favoreceu a perda de resistência do solo local, potencializando a fragilidade da encosta.

Na análise do nível de risco, utilizando a matriz probabilidade/consequência, houve a identificação e avaliação dos indicadores que potencializam a ocorrência de acidentes na encosta, verificando como a combinação das classificações qualitativas de consequências e probabilidades afetariam a área. Ao correlacionar a ação antrópica e os seus impactos gerados, foi obtido uma matriz de magnitude com 261 pontos, 58,0% do total provável, verificando uma área medianamente afetada, sendo destacada as ações de uso e ocupação do solo e o lançamento de esgoto precário, com pontuações de magnitude 35 e 32, respectivamente.

Na sequência, as ações de supressão da cobertura e cortes no terreno para construções também apresentaram pontuações elevadas, com magnitudes próximas das mais altas, com 29 pontos. Esses fatores influenciaram com grau variando de alto a altíssimo no processo de erosão e instabilidade do solo.

Para os impactos gerados, foi observado que a instabilidade do solo, a redução da biodiversidade e a erosão, são os desastres que possuem probabilidade mais significativa de atingir a área em estudo, possuindo magnitudes na ordem de 35, 34 e 33 pontos, respectivamente.

Dessa forma, é observada a ausência no controle efetivo do uso e ocupação do solo, evento que promove aproveitamento inadequado do espaço urbano, causando impactos significativos,

como a majoração do grau de risco de determinadas áreas, contribuindo para a ocorrência de desastres. Assim, o uso de softwares e métodos de análise de risco, com o intuito de investigação e monitoramento de áreas vulneráveis, são instrumentos extremamente indicados para fornecer o diagnóstico ambiental necessário que permita o planejamento e a execução de ações restauradoras, promovendo a mitigação da degradação do meio natural.

O solo foi classificado, pelo SUCS, como uma argila arenosa de baixa plasticidade, o agregado reciclado como uma areia bem graduada e as misturas como areias argilosas. Ao analisar a fração dos elementos presentes nos compósitos estudados, foi encontrado um valor relativamente baixo para a razão silte/argila no solo, indicando uma maior susceptibilidade à erosão e ao intemperismo desse material. Nas misturas incorporadas por RCD é observado comportamento inverso, favorecendo a redução da predisposição do solo de sofrer processos erosivos.

De acordo com a classificação TRB, o solo foi identificado como um material não indicado para uso em subleitos, contrariamente ao resultado obtido para as amostras de agregado reciclado, a qual apresentou comportamento variando de bom a excelente para utilização em subleitos de rodovias. Nessa perspectiva, é evidenciado o melhoramento promovido pela adição de agregado ao solo natural, favorecendo sua aplicabilidade no âmbito da pavimentação.

No ensaio de compactação foi verificado que a adição de RCD provocou o aumento da densidade seca máxima de 1,763 para 1,894 e a redução da umidade ótima em 27, 2%. Esse comportamento expressa a melhor acomodação das partículas após a inclusão de um material mais granular. Nas misturas com presença de fibras, foi observado que o acréscimo desse material resultou na elevação da umidade ótima, bem como na diminuição da densidade seca máxima. Esse efeito é explicado pela substituição dos grãos do solo por um material mais leve.

No ensaio de compressão simples foi identificado que a incorporação de materiais ao solo aumenta a resistência até determinada proporção, onde as amostras compostas por 30% de AR e após a adição de 0,5 % de fibra assumiram os maiores valores de resistência. Assim, ao final do período de cura de 60 dias, os compósitos de solo com 30% de AR apresentaram 927,09

kPa, com aumento percentual na ordem de 25,9%, e após a adição de 0,5% de fibras obtiveram a resistência de 902,7 kPa, registrando 22,6% de aumento.

As curvas de resistência dos compósitos compostos por fibra exibiram valores de deformações mais elevadas, apontando para uma manifestação de rupturas mais sutis, quando comparadas aos compósitos adicionados de agregado, caracterizando a ductilidade do material. Tal aspecto é considerado interessante do ponto de vista geotécnico, pois permite intervenções técnicas eficientes. Dessa forma, é possível perceber que amostras envolvendo fibra e AR demonstram-se mais interessantes, pois alinham o aumento da resistência com uma maior deformação.

A análise estatística produziu um modelo matemático com R^2 igual a 97,76%, com variáveis independentes aprovadas nos testes da análise de variância, o que indicam para um comportamento positivo e uma boa aderência ao modelo. Por fim, a otimização estatística indicou os teores com 22,2% de RCD e 0,77 %de PET aos 60 dias de cura (TC), alcançando 906,2 kPa de resistência à compressão simples (RCS). A validação dessas informações é estimada com a definição da superfície de resposta gerada pelo software, a qual confere maior precisão aos resultados estatísticos obtidos, auxiliando na garantia do intervalo de confiança definido.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesta dissertação, sugerem-se algumas possibilidades para pesquisas futuras:

- Analisar a viabilidade financeira da utilização de fibras de PET e agregado reciclado como reforço de solo em encosta.

- Realizar o estudo do comportamento da encosta após incorporação de fibras de PET e agregado reciclado, buscando a efetiva estabilização da encosta.

- Verificar os ensaios de caracterização mecânica para o compósito resultante da otimização do modelo estatístico.

- Acrescentar à análise experimental dos materiais os ensaios de adensamento, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e tomografia computadorizada de Raio X.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Monitoramento pluviométrico.** Recife, 2021. Disponível em:http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php. Acesso em: 03 nov. 2019.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v.186, p.262-281, 2018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085.

ALBUQUERQUE, R. A.; CARVALHO, F. A.; XIMENES, T. C. F.; LAFAYETTE, K. P. V. Temporal Evolution of Occupation and Land Use in na Area of Risk Slope´s in the City of Jaboatão dos Guararapes – Brazil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, [Stillwater], v. 22, n. 3, p. 809-818, 2017.

AMARAL, C. P.; LOPEZ, D. A. R. Impactos Sociais e Ambientais: A Vulnerabilidade do Sistema de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**. Salvador, v. 6, n. 2, p.13-26, 2018. Doi: https://doi.org/10.9771/gesta.v6i2.23967.

ALTSCHUL, J. S.; OLIVEIRA, I. P. V de.; NÓBREGA, M. de J. R da. Resíduo da construção e demolição - tecnologias e problemas: um estudo de caso. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 13-31, jan./jun. 2020. Disponível em: https://icesp1.websiteseguro.com/index.php/TEC-USU/article/view/1202. Acesso em: 10 jan. 2021.

ARGUETA, L. B dos. S.; KUASSA, P. A. K.; JORGE, P. P.; CUHEMA, S. L. B.; MATEUS, A. P. Engenharia e cidades sustentáveis: estratégias de aproximação construídas na Universidade Federal Fluminense. **Brazilian Journal of Development,** Curitiba, v.7, n.5, p. 48381-48393 mai. 2021. Doi:10.34117/bjdv7n5-306.

ARTUSO, F.; LUKIANTCHUKI, J. A. Evaluation of the self-cemeting effect of Construction and Demotion Waste (CDW)on mechanical performance over time for pavement support layers purpose. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 59-77, abr./jun. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2018/2019. Disponível em: file:///C:/Users/aless/Downloads/Panorama Abrelpe_-2018_2019.pdf. Acesso em: 10 jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: file:///C:/Users/aless/Downloads/PanoramaAbrelpe_-2020.pdf. Acesso em: 10 jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. Censo da Reciclagem de PET no Brasil. **Décimo Censo da Reciclagem de PET no Brasil.** São Paulo, set. 2019. Disponível em: http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3. Acesso em: 10 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2018). **NBR ISO/IEC 31000**. Gestão de Riscos – Princípios e Diretrizes. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2012). **NBR ISO/IEC 31010**. Gestão de Riscos – Técnicas para o Processo de Avaliação de Riscos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**: Solo Coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não Confinada: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulhos retidos na peneira de abertura 4,8mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BARBOZA, E. N.; BEZERRA NETO, F das. C.; CAIANA, C. R. A. Geoprocessamento aplicado na análise dos efeitos da urbanização no campo térmico em Fortaleza, Ceará. **Research, Society and Development**, [Vargem Grande Paulista], v. 9, n. 7, p. e57973731, abr./abr. 2020. Doi: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3731.

BARRETO, A. C.; AMORIM, E. F. Desempenho técnico de misturas de solo com RCD para uso em obras de pavimentação. **HOLOS**, Natal, v.7, ano. 36, p. e9696, 2020. Doi: 10.15628/holos.2020.9696.

BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S. **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**. Maringá: EDUEM, 2018. Disponível em: https://books.scielo.org/id/bv3jx/pdf/brandao-9786586383010-06.pdf. Acesso em: 29 out. 2021.

BEZERRA, M. G. C. de L. **Transformações espaço-temporais da mata de dois irmãos a partir da avaliação dos processos de apropriação do espaço**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**: Poder executivo, Seção 1, Brasília, DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

BORGHI, G.; PANTINI, S.; RIGAMONTI, L. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v.184, p. 815-825, 2018.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 425-438, 2017.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO–CBIC**.PIB Brasil caiu 9,7% no auge da crise provocada pela pandemia**. Rio de Janeiro: Informativo Econômico, set. 2020. Disponível em: https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2020/09/informativo_economico_pib_2_trim_20.pdf. Acesso em: 10 mar. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO–CBIC**. Expectativa da CBIC para o PIB do setor em 2021 subiu de 2,5% para 4%.** Rio de Janeiro: Agência CBIC, jul. 2021. Disponível em: https://cbic.org.br/expectativa-da-cbic-para-o-pib-do-setor-em-2021-subiu-de-25-para-4/. Acesso em: 10 out. 2021.

CARVALHO, R. C de. As migrações e a urbanização no Brasil a partir da década de 1950: um breve histórico e uma reflexão à luz das teorias de migração. **Revista Espinhaço**, [Diamantina], v. 8, n. 1, p. 24-33, 2019.

CASTILHO, T.W.; RODRIGUES, R.A.; LODI, P.C. Use of Recycled Polyethylene Terephthalate Strips in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, [*s.l.*],2021. Doi: http://dx.doi.org/10.1007/s10706-021-01848-2.

CASTRO, C. E. N de.; SILVA, R. R. F da.; SANTOS, L. F.; MENDES, A. S.; LIMA, C. A. P.; FROTA, C. A. Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. e-12356, 2019.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS – CEMADEN. **CEMADEN e IBGE lançam base de dados sobre população exposta em áreas de risco de desastres**. Recife, 2018. Disponível em: http://www.cemaden.gov.br/cemaden-e-ibge-lancam-base-de-dados-sobre-populacao-exposta-em-areas-de-risco-de-desastres/#:~:text=A%20regi%C3%A3o%20Sudeste%20concentrou%20o,de%20risco%20em%20294%20munic%C3%ADpios.Acesso em: 27 fev. 2021.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS – CEMADEN. **Movimento de Massa**. Recife, 2016. Disponível em: https://www.cemaden.gov.br/deslizamentos/. Acesso em: 02 jun. 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS–CPRM.**Geologia Básica do Núcleo Metropolitano**.Recife, 2003. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/publique/ Geologia/Geologia-Basica-26. Acesso em: 10 out. 2019.

COSTAS, A. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behavior of polypropylene fibre reinforced cohesive soil, **Geomechanics and Geoengineering: An International Journal**, v. 9, n. 3, p. 241-251, 2013. Doi: 10.1080/17486025.2013.804213.

DIAS, J. C. **Rotas de destinação dos resíduos plásticos e seus aspectos ambientais: uma análise da potencialidade da biodegradação**. 2016. 88 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DELOACH, R.; ULBRICH, N. A comparison of two balance calibration model building methods. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 1, p. 1-81, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ministério dos transportes, 2006.

EARLE, S. (2019). **Physical Geology**. 2. Ed. Victoria, B.C.: BC campus, 2019. Disponível em: https://opentextbc.ca/physicalgeology2ed/.Acesso em: 01set. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA–EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Recife: EMBRAPA, 2000. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/BP+Solos_000h6nyl9sf02wx7ha0bjxel5nag7exp.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA–EMBRAPA. **Mais de 80% da população brasileira habita 0,63% do território nacional**. Campinas: EMBRAPA, 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/28840923/mais-de-80-da-populacao-brasileira-habita-063-do-territorio-nacional. Acesso em: 10 mar. 2021.

FARIAS, A. R.; MINGOTI, R.; VALLE, L. B.; SPADOTTO, C. A.; LOVISI FILHO, E. **Identificação, mapeamento e quantificação das áreas urbanas do Brasil**. Comunicado Técnico. Campinas: EMBRAPA, mai. 2017. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/176016/1/20170522-COT-4.pdf. Acesso em: 10 mar. 2021.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; PEREIRA, J. E. S.; FONSECA, N. J. M.; NÓBREGA, A. K. C. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 mm) do agregado reciclado de RCD. **Revista Cerâmica.** São Paulo, v. 65, n. 373, p. 139-146, 2019. Doi: https://doi.org/10.1590/0366-69132019653732453.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Revista matéria**, Recife, v. 22, n. 1, p. e-11930, 2017. Doi: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0266.

FORMIGONI, A.; SANTOS, S. da C.; MEDEIROS, B. T. Logística reversa e sustentabilidade para a melhoria da cadeia: uma abordagem no panorama da reciclagem PET no Brasil. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**. São Paulo, v. 4, n. 3, p. 108-125, 2014.

FRANCISCO, M de. O. V. **Estudo da utilização de resíduos em concretos para aplicações não estruturais.** 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2017.

FREITAS, J. H de.; POLASTRI, P.; ANGELIS NETO, G de.; BELINCANTA, A.; REIS, J. H. C dos. Avaliação do comportamento em campo de solo reforçado com fibras de PET para bases de radier. **Paranoá.** Brasília, n. 29, jan./jun. 2021. Doi: https://doi.org/10.18830/issn. 1679-0944.n29.2021.03.

FREITAS, L. **Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil**. Belo Horizonte: Dom total, 2018. Disponível em: https://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/ reaproveitamento-de-residuos-solidos-da-construcao-civil-no-brasil/. Acesso em: 03 jan. 2021.

GARCEZ, L. R.; LEITE, H. E. S. C.; ARAÚJO, J. da S.; FRANÇA, B. de S. M. Desafios no gerenciamento de resíduos em construção de pequeno porte. **Revista Engenharia de Interesse Social.** João Monlevade, v. 5, n. 6, p. 150-172, jul./dez. 2020. Doi: https://doi.org/10.35507/25256041/reis.v5i6.4682

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, [Washington, D. C.], v. 3, n. 7, p. e1700782, jul. 2017. Doi: 10.1126/sciadv.1700782.

GHISELLINI, P.; RIPA, M.; ULGIATI, S. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 178, p. 618-643, 2018.

GOMES, E. D. G.; GOMES, F de. S.; BELLO, M. I. M da. C. V.; MEDEIROS, I da. S.; SANTOS, M. M. B.; FERREIRA, S. R de. M. Dimensionamento de uma estrutura de contenção em muro reforçado com geossintético. **Research, Society and Development**, [Vargem Grande Paulista], v. 10, n. 8, p. e14210817217, 2021. Doi: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17217.

GOMES, N. C. **Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras pet para aplicação em barreiras de contenção de resíduos.**2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

GÜLLÜ, H.; FEDAKAR, H. I. Response surface methodology for optimization of stabilizer dosage rates of marginal sand stabilized with sludge ash and fiber based on UCS performances. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 5, p. 1717-1727, 2017.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ALGÝN, Z.; MERMERDAS, K. Optimization of concrete mixture with hybrid blendsof metakaolin and fly ash using response surface method. **Composites Part B: Engineering**, v. 60, p. 707-715, 2014. Doi: 10.1016/j.compositesb.2014.01.017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.**Conheça cidades e estados do Brasil**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/olinda/panorama. Acesso em: 03 nov. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.**Vegetação**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao.html. Acesso em: 03 nov. 2019

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; WOERDEN, F. V. **What a Waste 2.0**: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington: World Bank Publications, 2018.

KHATRI, V. N.; DUTTA, R. K.; KATRE, S. Shear Strength, Bearing Ratio and Settlement Behavior of Clay Reinforced with Chemically Treated Coir Fibres. **Jordan Journal of Civil Engineering**, [*s.l.*], v. 11, n. 4, p. 659-679, 2017.

LAFAYETTE, K. P. V.; PAZ, D. H. F.; HOLANDA, M. J de. O.; COSTA, L. A. R. C. Analysis of generation and characterizationof construction and demolition waste onconstruction sites in the city of Recife, Brazil. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. e-12169, 2018. Doi: https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0503.

LANNA, A. C.; FERREIRA, C. M.; FILIPPI, M. C. C de. **Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro.** Brasília: EMBRAPA, 2021. Diponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/225425/1/cot-259.pdf. Acesso em: 16 nov. 2021.

LEAL, A. P. Resíduos da construção civil: uma revisão sobre as possiblidades de aplicação. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, São Paulo, v. 7, n. 6, 2021. Doi: https://doi.org/10.51891/rease.v7i6.1385.

LEITE, G. T. D.; PINHEIRO, R. Z. G.; PAMBOUKIAN, S. V. D. Monitoramento de áreas de risco com a utilização de técnicas de geoprocessamento. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 28-47, 2019.

LOUZADA, N. S.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of Clayey Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate. **Journal of Materials in Civil Engineering**,

[Washington, D. C.], v. 31, n. 10, p. 04019218-1, 2019. Doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0002863.

LUCARELLI, D. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de polietileno tereftalato (PET) de distribuição aleatória.** 2018.169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2018.

MACEDO, I. M. E.; SOUZA, M. D. L. C de.; SHINOHARA, N. K. S.; SANTOS, C. S dos.; SILVA, M. K. G da. Reciclagem do Polietileno Tereftalato (PET) no Fomento da Economia Circular. **Brazilian Journal of Development,** Curitiba, v. 6, n. 8, p. 57704-57723 jul./aug. 2020. Doi: https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-252.

MARÇAL, R. **Avaliação de parâmetros de resistência de solos com fibras de polipropileno reciclado**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

MATUTI, B. B.; SANTANA, G. P. Reutilização de resíduos de construção civil e demolição na fabricação de tijolo cerâmico – uma revisão. **Scientia Amazonia**, [*s.l*], v. 8, n. 1, p. E1-E13, 2019. Disponível em: http://scientia-amazonia.org/wp-content/uploads/2018/11/v.-8-n.1-E1-E13-2019.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; BALESTRA, C. E.; LIMA, M. G. Applicability of recycled aggregates inconcrete piles for soft soil improvement. **Waste Management & Research**, [*s.l*], v. 35, n. 1, p. 56-64, 2017. Doi: 10.1177/0734242X16676544.

MELO, K. K. S.; LIMA, A. P. C.; SANTANA, M. C.; ANDRADE, V. C. P.; BRAGA, A. L. C.; CORREIA, K. V. Caracterização química e mineralógica dos resíduos da mineração de gipsita no semiárido pernambucano. **HOLOS**, Natal, v. 6, ano. 33, p. 194-200, 2017. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6456/pdf. Acesso em:10 out. 2021.

MESAVILLA, D. T. **Comportamento de fundações superficiais assentes em camadas de areia estabilizada com cimento álcali-ativado reforçada com fibras**. 2020. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments**. 3 ed. New Jersey, USA: John Wiley&Sons, 2009.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos da construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NASCIMENTO, E. C do. **Avaliação das propriedades do agregado reciclado da construção civil para utilização em sistema de cobertura final de aterros sanitários.** 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

NASCIMENTO, E. C do.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, L. C. L da.; BEZERRA, J da. S.; PORTELA, M. F de. A. Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como

barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, [Vargem Grande Paulista], v. 10, n. 10, p. e547101019158, ago. 2021. Doi: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19158.

NDEPETE, C. P.; SERT, S. Use of Basalt Fibers for Soil Improvement. **Acta Physica Polonica**, [Cracóvia], v. 129, n. 1, p. 355-356, 2016. Doi: 10.12693/APhysPolA.129.355.

OLIVEIRA, R. F de.; BRAGA, R. M. Q. L. Sistema de cobertura final de um aterro sanitário para a RMB de Belém-PA com emprego de resíduos da construção civil. **Revista gestão & sustentabilidade ambiental**, Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 573-596, out./dez. 2017. Doi: http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v6e32017573-596.

OLGUN, M. Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. **Geosynthetics International**, v. 20, n. 4, p. 263-275, 2013. Doi: 10.1680/gein.13.00016.

ORTEGA, J. C. B.; CAMPOS, T. M. P de. **Caracterização geotécnica de um RCD e uma argila visando sua utilização como barreira capilar no ARSU**. *In*: Geologia ambiental: Tecnologias para o desenvolvimento sustentável. Ponta Grossa: Atena Editora, 2017.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; DUARTE, E. B. L.; FARIA, A. C de. Geração e manejo dos resíduos de construção civil nas obras de edifício comercial na cidade de São Paulo**. Revista Espacios**, São Paulo, v. 37, n. 6, p.30-37, 2016.

PEDROSA, A de. A.; ALMEIDA, S. M de.; LAFAYETTE, K. P. V. Análise de encosta em situação de risco no município de Olinda-PE. **Research, Society and Development**, [Vargem Grande Paulista], v. 9, n. 11, p. e3499119817, out./nov. 2020. Doi: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9817.

PEDROSA, F. J.A. **Aspectos da Evolução da Linha de Costa e da Paisagem Litorânea do Município de Olinda entre 1915 e 2004:** Evidências do Tecnógeno em Pernambuco. 2007. 194 f.Tese (Doutorado em Geociências) –Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PEREIRA, A. S.; SHITSUKA, D. M.; PARREIRA, F. J.; SHITSUKA, R. **Metodologia da pesquisa científica.** 1. ed. Santa Maria: UFSM, NTE, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1. Acesso em: 01 set. 2021.

PEREIRA, T. T. C.; OLIVEIRA, F. S.; FREITAS, D. F.; DAMASCENO, B. D; DIAS, A. C.A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. **Revista Geonomos**, v.28, n.1, p.1-14, 2020. Doi: https://doi.org/10.18285/geonomos.v28i1.29650.

POLASTRI, P. **Incorporação de resíduos de polietileno tereftalato (PET) Como reforço em compósitos solo-cimento**. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017.

PORTELA, M. F. A. **Avaliação da dispersividade e resistência à compressão de compósitos de um solo da formação barreiras com RCD e cal**. 2019. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

PORTELA, M. F. A.; LAFAYETTE, K. P. V.; NASCIMENTO, E. C do.; BEZERRA, J da. S.; FERREIRA, S. R de. M.; SANTOS, M. J. P dos. Avaliação da dispersividade e resistência à compressão simples de compósitos de solo, resíduos de construção e demolição e cal hidratada. **Research, Society and Development**, [Vargem Grande Paulista], v. 10, n. 1, p. e42210111959, jan. 2021. Doi: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11959.

PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA. **A cidade**. Olinda, 2019. Disponível em: https://www.olinda.pe.gov.br/a-cidade/olinda-em-dados/. Acesso em: 12 ago. 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA. **Diagnóstico Técnico Rostos, Vozes e Lugares, Olinda, Pernambuco– Brasil**. Olinda: Secretaria Municipal de Saúde, 2008. Disponível em: https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_docman&view=download&alias=249-diagnostico-final-rvl-olinda-pe-9&category_slug=experiencia-olinda-pe-105&Itemid=965. Acesso em: 12 ago. 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE OLINDA. **Manual de apoio para o trade turístico**. Olinda: Secretaria de Turismo, Desenvolvimento Econômico e Tecnologia, 2013. Disponível em: https://www.webcitation.org/6WuMBvoYp?url=http://www.olindaturismo.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Apostila-Olinda-Final-trade.pdf. Acesso em: 12 ago. 2019.

QUARIGUASI, J. B. F.; GONÇALVES, H. B. B.; OLIVEIRA, F. H. L DE.; AGUIAR, F. P DE. Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária. *In*: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2018, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: ABMS, 2018. p. 205 - 213.

RATIÉ, G.; VANTELON, D.; KALAHROODI, E.; BIHANNIC, I.; PIERSON-WICKMANN, A. C.; DAVRANCHE, M. Iron speciation at the riverbank surface in wetland and potential impact on the mobility of trace metals. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 443-455, 2019. Doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.143.

RHODES, C. J. Plastic pollution and potential solutions. **Science progress**, v. 101, n. 3, p. 207-260, 2018. Doi: https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211.

RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G. SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science.**Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 3, p. 245-254, mai./jun. 2017. Doi: http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542017413000117.

ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro:** análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, p. e-11895, 2017. Doi: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0229.

ROCHA, S. A. **Avaliação da influência de fibras de polipropileno na resistência efetiva de um solo argiloso**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

RODRÍGUEZ, J. A. S., ZAMORA, J. J. A.; PÉREZ, S. P. M. Uso de los agregados PET en la elaboración del concreto: Revisión de la literatura. **Avances: Investigación En Ingeniería**, Bogotá, v.18, n.2. p. 1 – 12, 2021. Doi: https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6942.

ROQUE, P. F. B. **Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação.** 2017. 141 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SAGRILO, A. V.; NUMMER, A.; PINHEIRO, R. J. B.; BARONI, M. Estabilizações granulométricas e químicas em solo do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM). *In*:IX SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 2017, Caxias do Sul. **Anais** [...]. Caxias do Sul: ABMS-RS, 2017. p. 185 – 191.

SANTANA, J. K. R.; LISTO, F de. L. R. Alterações morfológicas de encostas e deflagração de escorregamentos em áreas densamente urbanizadas: uma análise evolutiva em uma sub-bacia do município de Recife (PE). **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, n. 3, 2018. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/viewFile/235066/29994. Acesso em: 08 out. 2019.

SANTOS, A. M. S. (2020). Política urbana no Brasil: a difícil regulação de uma urbanização periférica. **Geo UERJ**, [Maracanã], n. 36, p. e48434, 2020. Doi: https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.47269.

SANTOS, E. Idos.; ALENCAR, M. L. S de.; SCHRAMM, V. B.; SANTOS, J. S dos.; NASCIMENTO, M.T. C. C do. Uso de geotecnologias no estudo da degradação das terras da bacia do rio Sucuru, na Paraíba. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 42, n. 57, p. e.57, jun./ago. 2020. Doi: 10.5902/2179460X33089.

SANTOS, G. B. D.; SILVEIRA, M. R.; LODI, P. C.; GARCIA, R. R.; GIACOMETTI, W. de B. Avaliação da influência do teor de fibras de polietileno tereftalato nos parâmetros ótimos de compactação de um solo arenoso. *In*: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 2019, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos: EESC, 2019. p. 405 - 410.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. **Relação silte/argila.** Brasília: EMBRAPA, 2019. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_56_2212200611552.html. Acesso em: 16 dez. 2019.

SANTOS, L. C.; SILVA, G. A. M.; ABRANCHES, M. O.; ROCHA, J. L. A.; SILVA, S. T. A.; RIBEIRO, M. D. S.; GOMES, V. R.; SEVERO, P. J. S.; BRILHANTE, C. L.; SOUSA, F. Q. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, Curitiba, v. 10, n. 7, p. e3810716247, 2021. Doi: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16247.

SANTOS, L. R dos.; CRISPIM, F. A.; PAULO, P. R del. Estabilização de Solos com um aditivo a Base de Enzimas para fins Rodoviários. **Engineering and Science**, Cuiabá, v. 7, n. 3, p. 2-11, 2018. Doi: https://doi.org/10.18607/ES201876930.

SANTOS, M. J. P. **Reforço de um solo erodível com resíduos de construção e fibras de coco babaçu**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2020.

SANTOS, M. J. P.; SILVA, T. A.; LAFAYETTE, K. P. V. Impactos ambientais causados por resíduos sólidos numa encosta no município de Recife– PE. *In*: AGUIAR, A. C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G. (org.). **Resíduos Sólidos:** impactos socioeconômicos e ambientais. 1. ed. Recife: EDURFPE, 2018. E-book.

SARAIVA, S. M.; FRAGA, V da. S.; ARAÚJO FILHO, J. C de.; SANTOS, R. F dos.; FELIX, E dos. S.; CARNEIRO, K. A. A. Mineralogia de Luvissolos formados sob gradiente pluviométrico no semiárido paraibano**. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 3, n. 4, p. 4416-4433, out./dez. 2020. Doi: 10.34188/bjaerv3n4-142.

SCHOEFS, F.; LE, F. T.; LANATA, F. Surface response meta-models for the assessment of embankment frictional angle stochastic properties from monitoring data: an application to harbor structures. **Computer and Geotechnics**, v. 53, p. 122-132, 2013.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma Areia Reforçadacom Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**.2016. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SHIRAZI, M.; KHADEMALRASOUL, A.; ARDEBILI, S. M. S. Multi-objective optimization of soil erosion parameters using response surface method (RSM) in the Emamzadeh watershed. **Acta Geophysica**, v. 68, n. 2, p. 505-517, 2020. Doi: https://doi.org/10.1007/s11600-020-00404-5.

SILVA, A. C. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2018. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, A. C. FUCALE, S. FERREIRA, S. R de. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. e-12355, 2019. Doi: https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0670.

SILVA, L. S. **Mineralogia da fração argila dos solos do planalto ocidental paulista**. 2016. 83 f. Dissertação (Agronomia) – Faculdade de Ciência Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2016.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**.2016. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, R. F da. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, Goiânia, v. 14, n. 27, p. 73-82, jan./jun. 2020. Doi: https://doi.org/10.19142/rpq.v14i27.577.

SILVA, T. A. **Análise do comportamento geomecânico de compósitos de solo, resíduos de madeira e de construção para redução de processos erosivos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVA, T. A.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, L. C. L.; SANTOS, M. J. P.; BEZERRA, J. S. Optimization of the dosage of sustainable materials for the stabilization of an erosive soil. **European Academic Research**, v. 9, n. 6, p. 3766-3788, 2021.

SILVA, V. D. **Conflitos socioambientais da atividade turística em unidades de conservação: a área de proteção ambiental de Guadalupe – Pernambuco**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) –Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SONG, Q.; LI, J.; ZENG, X. Minimizing the Increasing Solid Waste Through Zero Waste Strategy. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 104, p. 199-210, 2015. Doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.027.

SOUZA, J. A.; SILVA, F. P.; SANTOS, D. B.; SILVA, N. S. Resíduos da construção civil: estudo comparativo de duas empresas de Rondonópolis-MT. **Revista Estudos e Pesquisas em Administração**, Rondonópolis, v. 3, n. 2, p. 54-67, maio/ago. 2019.

SOUZA, J. M de.; RUDNICK, R. C.; LUKIANTCHUKI, J. A. Avaliação da incorporação de resíduos de construção civil (RCC) na estabilização de misturas de solo-cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 261-280, out./dez. 2020. Doi: https://doi.org/10.1590/s1678-8621202000040047.

STRAPASSAO, H.; BAUM, C. A.; BECEGATO, V. A.; BECEGATO, V. R.; LAVNITCKI, L.; HENKES, J. A. Reciclagem de resíduos da construção civil no município de Lages, SC. **Revista gestão & sustentabilidade ambiental**, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 713-729, jan./mar. 2019. Doi: 10.19177/rgsa.v8e12019713-729.

SULUGURU, A. K.; SURANA, S. R.; GUHARAY, A.; KAR, A.; MUKTINUTALAPATI, J. Experimental investigations on building derived materialsin chemically aggressive environment as a partial replacement of soil in geotechnical applications. **Geotechnical and Geological Engineering**, [*s.l.*], v. 37, n. 2, p. 947-963, 2019. Doi: https://doi.org/10.1007/s10706-018-0662-0

TANG, Z.; LI, W.; TAM, V. W. Y.; XUE, C. Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes formanufacturing sustainable construction materials. **Recursos, conservação e reciclagem: X**, Michigan, v.6, 100036, 2020. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036.

TARDIN, R. **Deslizamento de barreira atinge e destrói casa em Olinda.** Olinda:G1, 2019. Disponível em: https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2019/04/12/casa-e-atingida-em-deslizamento-de-barreira-em-olinda.ghtml. Acesso em: 17 jun. 2019.

TOMINAGA, L. K. 2007. 240 f. **Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP**. Tese (Doutorado em Ciências – Geografia Física) –Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
TORRES, F. S. M.; PFALTZGRAFF, P. A. S. **Geodiversidade do estado de Pernambuco.** Recife: CPRM, 2014. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16771. Acesso em: 05 nov. 2019.

ULLOA-MAYORGA, V. A.; URIBE-GARCÉS, M. A.; PAZ-GÓMEZ, D. P.; ALVARADO, Y. A.; TORRES, B.; GASCH, I. Performance of pervious concrete containing combinedrecycled aggregates. **Ingeniería e Investigación**, Bogotá, v. 38, n. 2, p. 34-41, ago. 2018. Doi: https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.67491.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME. **Urbanization and Development**: Emerging Futures. Nairobi, 2016. Disponível em: https://unhabitat.org/wp-content/uploads/2014/03/WCR-%20Full-Report-2016.pdf. Acesso em: 10 set. 2019.

VASCONCELOS, Y. **Planeta plástico**. 281. ed. São Paulo: PESQUISA FAPESP, 2019. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/07/08/planeta-plastico/. Acesso em: 16 out. 2019.

VERDE, M. R. V.; SANTANA, L. S. G de.; ALMEIDA, P. N. L de.; REIS, R. B.; MELLO, M. M. C.; CAVALCANTE, M. M. Expansão urbana e redução de áreas verdes em Salvador/BA: o caso do Parque São Bartolomeu. **Research, Society and Development**, [Vargem Grande Paulista], v. 9, n. 10, p. e1199106913, jul./set. 2020. Doi: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.6913.

WANG, W.; CHENG, Y.; TAN, G. Design Optimization of SBS-modified asphalt mixture reinforced with eco-friendly basalt fiber based on response surface methodology. **Materials,** Basel**,** v. 11, n. 8, p.1311, 2018. Doi: https://doi.org/10.3390/ma11081311.

WOUATONG, A. S. L.; DJUKEM, W. D. L.; NGAPGUE, F.; KATTE, V.; BEYALA, V. K. K. Influence of Random Inclusion of Synthetic Wicks Fibersof Hair on the Behavior of Clayey Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, [*s.l.*], v. 35, n. 6, p. 2637-2646, may/jun. 2017. Doi: 10.1007/s10706-017-0267-z.

WU, Z.; YU, A. T. W.; SHEN, L. Investigating the determinants of contractor´s construction and demolition waste management behavior in Mainland China. **Waste Management**, [Amsterdã], v. 60, p. 290-300, 2017. Doi: 10.1016/j.wasman.2016.09.001.

YARBAŞI, N.; KALKAN, E. The Mechanical Performance of Clayey Soils Reinforced with Waste PET Fibers. **International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications,** Erzurum, v. 2, n. 1, p. 19-26, 2020.

YOUSEFPOUR, N.; MEDINA CETINA, Z.; HERNANDEZ-MARTINEZ, F.G.; AL-TABBAA, A. Stiffness and Strengthof Stabilized Organic Soils—Part II/II:Parametric Analysis and Modelingwith Machine Learning. **Geosciences**, Basel, v. 11, n. 5, p. 218, 2021. Doi: https://doi.org/10.3390/geosciences11050218.

YU, Y.; BATHURST, R. J. Probabilistic assessment of reinforced soil wall performance using response surface method. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 5, p. 524-542, 2017. Doi: https://doi.org/10.1680/jgein.17.00019.

ZHANG, Q.; FENG, X.; CHEN, X. LU, K. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**, [Amsterdã], v. 259, p. 119776, 2020. Doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119776.