



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

**IGOR SILVA SANTOS**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE  
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E FIBRAS DE  
POLIPROPILENO**

Recife, PE  
2023



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

**IGOR SILVA SANTOS**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE  
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E FIBRAS DE  
POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa 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: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Patrícia Nunes Bandeira.

Recife, PE  
2023

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

S237a Santos, Igor Silva  
Análise das propriedades de um solo com adição de  
resíduos da construção civil e fibras de polipropileno. / Igor  
Silva Santos. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2023.

178 f. il.

Orientadora: Profa. Dra. Kalinny P. Vaz Lafayette  
Coorientadora: Profa. Dra. Ana P. Nunes Bandeira

Dissertação (Mestrado – Construção Civil). Universidade de  
Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Erosão. 2. Reforço de Solo. 3. Talude. I. Construção  
Civil - Dissertação. II. Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz  
(orient.). III. Bandeira, Ana Patrícia Nunes (coorient.). IV.  
Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado  
em Construção Civil. V. Título.

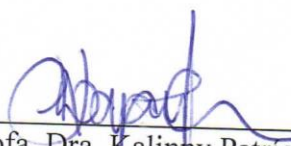
CDD: 690.028

**IGOR SILVA SANTOS**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE  
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E FIBRAS DE  
POLIPROPILENO**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador(a)**



Prof. Dra. Kaliny Patricia Vaz Lafayette  
Universidade de Pernambuco

**Coorientador(a)**

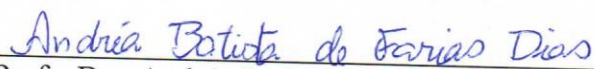


Prof. Dra. Ana Patricia Nunes Bandeira  
Universidade Federal do Cariri

**Examinadores(as)**



Prof. Dra. Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani  
Universidade de Pernambuco



Prof. Dra. Andréa Batista de Farias Dias  
Universidade de Pernambuco

## DEDICATÓRIA

A Deus, pelo seu infinito amor, bondade e misericórdia.  
Aos meus pais, Gildaci Gomes, Antônio Leal, Nazilton dos Santos e Amanda dos Santos. A minha esposa, Gabriela Linhares, por todo amor, sustento e apoio nas horas difíceis. E, aos meus irmãos, Ítalo Santos, Ana Luisa Leal e Clara dos Santos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, com saúde, paz e alegria. Por trilhar os meus caminhos, colocando as pessoas certas que contribuem para o meu futuro e me tornam uma pessoa melhor a cada dia que passa. A certeza que tenho é que Ele está sempre comigo.

Aos meus pais, Gildaci Gomes (mãe), Antônio Leal (pai/padrasto), Nazilton Alves (pai) e Amanda (madrasta), por serem a minha base, pelo apoio, amor e paciência. Sou o que sou por conta de vocês, que me incentivaram a nunca desistir, reconheço o sacrifício que fizeram para me proporcionar esta alegria. Aos meus irmãos, Ítalo Santos, Ana Luísa, Maria Clara, que, apesar de eu, muitas vezes, não conseguir estar presente, pelos conselhos, paciência e espera.

A minha esposa, Gabriela Linhares, por todo amor, paciência, dedicação e por estar comigo em todos os momentos e correrias da nossa vida, sempre com o objetivo de alcançarmos os nossos sonhos. Sempre me apoiando e aconselhando, sem estresse, toda a minha caminhada.

A minha sogra e sogro, Maria das Graças e Osvaldo Landim, e cunhados, Isaac Linhares e Osvaldo Júnior, pela atenção, apoio e carinho neste período.

A minha orientadora, professora Kalinny Lafayette, pela dedicação/disposição, confiança no meu trabalho, ensinamentos, paciência, compreensão, incentivo, sempre buscando ajudar onde fosse preciso.

A minha coorientadora, professora Ana Patrícia, pelas suas contribuições, apoio, ensinamentos, paciência, incentivo e disposição em sempre melhorar o desenvolvimento da pesquisa.

À coordenação, aos docentes e demais funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco (Poli-UPE).

À Universidade Federal do Cariri - Juazeiro do Norte, em especial, ao coordenador do Centro de Ciência e Tecnologia (CCT), Ary Ferreira e, ao coordenador do Laboratório de Estruturas, Erwin Palechor, pela liberação dos serviços e pelo incentivo ao desenvolvimento do mestrado.

Ao professor Erwin Palechor, do Laboratório de Estruturas; Aos professores João Barbosa e Ana Patrícia, do Laboratório de Mecânica dos Solos; À professora Lilian Gondim e seu esposo Boris, do Laboratório de Pavimentação; Às professoras Maria Isabel, Ana Cândida e Maria das Dores, do Laboratório de Caracterização; Ao professor Marcelo Santiago, do Laboratório de Química; Ao professor Francisco José, da Central Analítica; e Ao professor Sebastião, da Agronomia, por cederem os laboratórios para realização dos ensaios e pela dedicação, contribuição e ajuda nas análises dos resultados.

Aos técnicos e amigos Samuel Celestino, Diana Rodrigues, Jorge Marcell, Leandro Marques, Lucimara Bandeira, Ivna Salmito, Edênia Barros e Daniel Bernardes (UFCA-Juazeiro do Norte e Crato), Henrique Lira (UFPE-Caruaru) e Gutemberg (UFPE-Recife), que foram excelentes profissionais na ajuda em todos os ensaios realizados, fazendo muito mais que o exigido pela sua função.

Agradeço meus amigos que Deus me deu a graça de ter, Acácio Emerson, Maynara Marciel, Caroliny Ribeiro, Cícera Iara, Samuel Celestino, Francisco Jean, Romana Sousa, Fernando

Silva, Adriano Siqueira, Evelyn Linhares, Cícero (Empresa SIGEO), Lucas Benício e Luciano Alves, pela amizade, parceria e ajuda na pesquisa e por compreender a minha ausência em muitos momentos.

Aos amigos do mestrado, em especial, José Moura, Maria Conceição, Lucas Amorim, Henrique Mendes, Flaviana Gomes, Augusto César, Sanderson Damascena e Rayane Gabriella pelo companheirismo, pelo apoio nos estudos e trabalho realizados nas disciplinas e por todos os momentos de alegria e ansiedade que passamos neste ciclo de vida.

À empresa Ciclo Ambiental, por, gentilmente, fornecer o resíduo de construção civil utilizado nesta pesquisa e por disponibilizar informações sempre que necessário.

À empresa Polimix Concreto LTDA, localizada no município de Barbalha-CE, em especial, ao Eng. Hugo Oliveira; e à empresa ETRURIA Indústria e Comércio LTDA., pelo fornecimento da fibra de polipropileno, juntamente com as especificações técnicas.

À Defesa Civil do estado de Pernambuco, em especial, a Ana Paula, por acompanhar em todas as visitas realizadas na área de estudo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada e que tornaram mais leve a jornada ocorrida até a finalização deste trabalho.

## RESUMO

O crescimento populacional e o elevado custo das terras fazem com que a população menos favorecida acabe ocupando áreas impróprias para morar, como as encostas e as margens de rios, o que torna um risco eminente e que pode gerar prejuízos socioeconômicos. Os diversos deslizamentos de encostas motivaram a realização de pesquisas sobre estudo das propriedades dos solos melhorados mecanicamente para estabilização de encostas. Estudos mostram que é possível melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos com a utilização de diferentes tipos de fibras, uma vez que estas possuem uma maior resistência à tração, resultando em maiores resistências ao cisalhamento e à compressão nos compósitos. A utilização de Resíduos da Construção Civil (RCC) tem sido empregada nos estudos, pois, além de melhorar as propriedades do solo, reduz a quantidade de resíduos no meio ambiente, sendo uma ação importante para o desenvolvimento sustentável. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo analisar as propriedades químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas dos materiais e compósitos (solo, RCC e fibra de polipropileno), para fins de utilização em obras de contenção de encostas em áreas de riscos. Para a realização desta pesquisa, foram coletadas amostras de solo em uma encosta, localizada em área de risco de deslizamento, na Região Política Administrativa III (RPA III), na rua Alto do olho d'água, no bairro da Macaxeira, na cidade do Recife/PE. Foram gerados compósitos com o solo, RCC e a fibra de polipropileno. Inicialmente, as porcentagens de RCC em substituição ao solo foram de 30% e 50%; e, nos compósitos, as porcentagens de substituição de RCC por fibra de polipropileno foram de 0,5% e 0,75%. A área de estudo vem sofrendo grande degradação ambiental devido às ações antrópicas inadequadas. O recorte espaço-temporal, realizado para o período de 47 anos, apontou que essas ações aumentaram a instabilidade da encosta, por meio da supressão vegetal, estimada em 20,96%. Com relação ao estudo dos materiais e compósitos, o solo, o RCC e as misturas apresentaram textura predominantemente arenosa. O solo se enquadra como areia argilosa (SC); o compósito S70R30, como areia argilosa-areia siltosa (SC-SM); e o RCC e o S50R50, como areia siltosa (SM). O solo e os compósitos apresentam comportamento laterítico e o RCC não apresentou este comportamento. As análises químicas indicaram, pelo pH, que o solo apresentou leve acidez; o solo-RCC foi classificado com alcalinidade leve à moderada. Todos os materiais e compósitos se apresentam quimicamente não dispersivos. Na fluorescência de Raios X, detectou-se que os materiais e compósitos são constituídos por 50% de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), elemento predominantemente presente em solos arenosos. Os parâmetros de compactação obtidos mostraram que a substituição do resíduo obteve um aumento de 2% na densidade seca máxima, contudo, diminuiu a umidade ótima em 12%, quando comparado ao solo. Já com a substituição da fibra de polipropileno, a densidade seca máxima dos compósitos se manteve, contudo, elevou a umidade ótima em 9%. Quanto à resistência à compressão simples (RCS), o compósito S70R29,25F0,75, comprovado pela estatística, mostrou-se mais resistente em todas as idades de ruptura, destaque para a média das amostras aos 120 dias, elevando a RCS do solo em 103%. Com o compósito S70R29,25F0,75, através de uma análise computacional, foi possível estabilizar um talude que apresentava instabilidade, executando um muro de contenção com o compósito compactado, visto que este apresentou a mesma eficiência do solo puro quanto à análise de erodibilidade direta. Dessa maneira, tais materiais melhoram os diversos comportamentos do solo e contribui com a destinação correta de resíduos e a sustentabilidade.

**Palavras-chave:** Erosão; Reforço de solo; Talude.



## ABSTRACT

Population growth and the high land cost mean that the underprivileged population occupies areas unsuitable for living, such as slopes and riverbanks, which becomes an imminent risk and can generate socioeconomic losses. The various landslides on slopes led to research on the properties of mechanically improved soils for slope stabilization. Studies show that it is possible to improve the physical and mechanical properties of soils using different types of fibers since these have greater tensile strength, resulting in more significant shear and compressive forces in composites. Civil Construction Waste (CCW) has been used in studies because, in addition to improving soil properties, it reduces the amount of waste in the environment, an important action for sustainable development. The present research aims to analyze the chemical, mineralogical, physical, and mechanical properties of materials and composites (soil, CCW, and polypropylene fiber) for use in slope containment works in risk areas. To carry out this research, soil samples were collected on a slope located in an area at risk of landslides, in Political Administrative Region III (PAR III), on street Alto do Olho d'Água, in the neighborhood of Macaxeira, in the city of Recife/PE. Composites were generated with soil, CCW, and polypropylene fiber. Initially, the percentages of CCW replacing the soil were 30% and 50%, and in the composites, the percentages of replacement of CCW by polypropylene fiber were 0.5% and 0.75%. The study area has suffered significant environmental degradation due to inappropriate anthropic actions. The space-time cut carried out over 47 years pointed out that these actions increased the instability of the slope through vegetation suppression, estimated at 20.96%. Regarding the study of materials and composites, the soil, the CCW, and the mixtures had a predominantly sandy texture. The soil fits as clayey sand (SC), composite S70R30 as clayey sand-silty sand (SC-SM), and CCW and S50R50 as silty sand (SM). The soil and the composites present a lateritic behavior, and the CCW did not present this behavior. Chemical analyses indicated, based on pH, that the soil was slightly acidic; soil-CCW was classified as having mild to moderate alkalinity. All materials and composites are chemically non-dispersive. The X-ray fluorescence detected that the materials and composites are constituted by 50% of silicon oxide (SiO<sub>2</sub>), an element predominantly in sandy soils. The compaction parameters showed that the residue replacement obtained a 2% increase in the maximum dry density. However, it decreased the optimal moisture by 12% compared to the soil. With the replacement of the polypropylene fiber, the maximum dry density of the composites was maintained. However, it increased the optimum moisture content by 9%. As for the simple compressive strength (UCS), the composite S70R29,25F0,75, proven by statistics, proved to be more resistant at all rupture ages, highlighting the average of the samples at 120 days, raising the soil RCS by 103%. With the composite S70R29,25F0,75, through computational analysis, it was possible to stabilize a slope that presented instability, executing a retaining wall with the compacted composite, since this demonstrated the same efficiency of the pure soil regarding the direct erodibility analysis. In this way, such materials improve the various soil behaviors and contribute to the correct disposal of waste and sustainability.

**Keywords:** Erosion; Soil reinforcement; Slope.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocupação irregular de encosta: Rua Alto do Olho d'água-Macaxeira-Recife-PE ...	28
Figura 2 - Avanço da população nas capitais do Nordeste (1970-2021).....	29
Figura 3 - Ações antrópicas em encosta: Rua Alto do Olho d'água-Macaxeira-Recife-PE .....	30
Figura 4 - Deslizamento em Recife/PE (maio/2022).....	36
Figura 5 - Muro de contenção de solo-cimento ensacado .....	39
Figura 6 - Fibra de polipropileno.....	43
Figura 7 - Fibra de polipropileno (A); e Fibra no solo (B).....	44
Figura 8 - Mapa da localização da área de estudo .....	47
Figura 9 - Visão geral da área em estudo (maio/2022).....	48
Figura 10 - Mapa da vegetação da cidade do Recife-PE.....	51
Figura 11 - Precipitações médias anuais do Recife de 2009 a 2023 (Posto da Várzea) .....	52
Figura 12 - Precipitações mensais de 2022 e 2023 do Recife (Alto da Brasileira) .....	53
Figura 13 - Mapa de solos da cidade do Recife-PE.....	55
Figura 14 - Mapa geológico da cidade do Recife-PE.....	56
Figura 15 - Vista aérea de um trecho do Rio Capibaribe .....	57
Figura 16 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	59
Figura 17 - Amostra deformada: Coleta (A); e Armazenamento (B).....	63
Figura 18 - Amostra indeformada - Coleta (A); e Proteção do bloco (B).....	63
Figura 19 - RCC coletado para desenvolvimento da pesquisa .....	64
Figura 20 - Fibra de polipropileno.....	65
Figura 21 - Ensaio de análise granulométrica: Sedimentação (A); e Peneiramento (B) .....	67
Figura 22 - Ensaio de densidade real dos grãos.....	67
Figura 23 - Ensaio de limite de liquidez (A) e Limite de plasticidade (B).....	68
Figura 24 - Ensaio de compactação MCV.....	69
Figura 25 - Perda por imersão - Extração parcial (A); Imersão em água (B); e Material desprendido (C) .....	70
Figura 26 - Classificação MCT .....	71
Figura 27 - Amostra sendo analisada na lupa binocular.....	72
Figura 28 - Ensaio de Difratometria: Equipamento (A) e Preparação da Amostra (B).....	73
Figura 29 - Ensaio de pH.....	74
Figura 30 - Ensaio químicos: Substrato extraído (A) e Conditivímetro (B).....	75
Figura 31 - Determinação dos Teores de Sais: Na e K (A); Ca (B); e Mg (C) .....	76

Figura 32 - Ábaco de dispersividade .....	77
Figura 33 - Preparação da Amostra: Prensa (A); e Amostra em Pastilha (B) .....	78
Figura 34 - Análise de Fluorescência: Pastilha no porta amostra (A); e Equipamento (B) .....	78
Figura 35 - Ensaio de compactação: Execução (A); e Extração (B) .....	79
Figura 36 - Ensaio de cisalhamento direto .....	79
Figura 37 - Moldagem dos corpos de prova e determinação da umidade .....	80
Figura 38 - Ensaio de Cisalhamento: Início (A) e término (B) .....	81
Figura 39 - Produção das amostras: Preparação (A); Desmoldagem (B); Pesagem (C); e Medida (D).....	82
Figura 40 - Câmara úmida - Aberta (A); e Fechada (B).....	82
Figura 41 - Rompimento das amostras .....	83
Figura 42 - Equipamento utilizado para análise de erodibilidade .....	85
Figura 43 - Preparação da amostra: Compactação e Extração (A e B); Moldagem (C); e Amostra (D).....	86
Figura 44 - Execução do ensaio (A); e Coleta do material erodido (B e C).....	87
Figura 45 - Encosta: Partes integrantes (A) Seção heterogênea utilizadas na análise do SLOPE/W (B).....	89
Figura 46 - Fatores de segurança (condição inundado) - Topo da encosta (A); e Meio da encosta (B).....	90
Figura 47 - Amostra compactada (A); e Moldagem do corpo de prova (B) .....	91
Figura 48 - Corpos de prova submetidos ao cisalhamento direto .....	92
Figura 49 - Reconhecimento da poligonal da área de estudo .....	93
Figura 50 - a) construções irregulares; b) disposição de resíduos sólidos; .....	94
Figura 51 - Mapa de uso e ocupação - 1974.....	96
Figura 52 - Mapa de uso e ocupação - 1984.....	97
Figura 53 - Mapa de uso e ocupação - 1997.....	98
Figura 54 - Mapa de uso e ocupação - 2004.....	99
Figura 55 - Mapa de uso e ocupação - 2014.....	100
Figura 56 - Mapa de uso e ocupação - 2021 .....	101
Figura 57 - Percentual do uso e ocupação do solo (1974-2021). .....	104
Figura 58 - Mapa de declividade .....	105
Figura 59 - Modelo digital da área de estudo .....	106
Figura 60 - Medidas não estruturais para evitar deslizamentos: set. 2021 (A); e jun. 2022 (B) .....	109

Figura 61 - Casas interditadas pela Defesa Civil (jun.2022).....	109
Figura 62 - Deslizamento (jun.2022): área deslizada (A); e imóvel afetado (B) .....	110
Figura 63 - Deslizamento (jun.2022): área deslizada (A); e rua interditada (B) .....	110
Figura 64 - Curvas granulométricas dos materiais e compósitos .....	111
Figura 65 - Ábaco com a classificação MCT dos materiais e compósitos .....	115
Figura 66 - Mineralogia do Solo (Fração granular).....	116
Figura 67 - Mineralogia do Solo (Fração de argila) .....	116
Figura 68 - Mineralogia do RCC (Fração granular) .....	117
Figura 69 - Mineralogia do RCC (Fração de argila) .....	118
Figura 70 - Relação entre o PST e o TSD dos materiais e compósitos .....	120
Figura 71 - Curvas de Compactação (S100; R100; S70R30; e S50R50) .....	122
Figura 72 - Curvas de Compactação (S100; S99,5F0,5; e S99,25F0,75).....	123
Figura 73 - Curvas de Compactação (S50R50; S50R49,5F0,5; e S50R49,25F0,75).....	123
Figura 74 - Curvas de Compactação (S70R30; S70R29,5F0,5; e S70R29,25F0,75).....	124
Figura 75 - Curvas Tensão Cisalhante x Deformação horizontal do solo indeformado.....	125
Figura 76 - Curvas Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal do solo indeformado .....	126
Figura 77 - Envoltórias de resistência do solo indeformado: Natural (A); e Inundado (B) ...	127
Figura 78 - Rompimento das Amostras: Sem Fibra (A); e Com Fibra (B) .....	129
Figura 79 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (07 dias) .....	130
Figura 80 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (28 dias) .....	131
Figura 81 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (60 dias) .....	132
Figura 82 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (120 dias) .....	133
Figura 83 - Resultados da resistência à compressão simples .....	134
Figura 84 - Redução das RCS das amostras com substituição por RCC.....	135
Figura 85 - Crescimento das RCS das amostras com Fibra .....	136
Figura 86 - Superfície de Resposta: RCSxFBxTC .....	140
Figura 87 - Superfície de Resposta: RCSxFBxRCC .....	141
Figura 88 - Perda do solo x tensão cisalhante hidráulica .....	142
Figura 89 - Curvas Tensão Cisalhante x Deformação horizontal do compósito compactado	143
Figura 90 - Curvas Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal do compósito compactado.....	144
Figura 91 - Envoltórias de resistência do compósito compactado: Umidade ótima (A); e Inundado (B).....	144

Figura 92 - Retaludamento - Topo da encosta.....	146
Figura 93 - Retaludamento - Meio da encosta.....	146
Figura 94 - Fator de segurança do topo da encosta .....	147
Figura 95 - Fator de segurança do meio da encosta .....	147
Figura 96 - Fator de segurança do muro de contenção.....	148
Figura 97 - Fator de segurança da base da encosta.....	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de pontos de deposição irregular de RCC da RMR .....	33
Tabela 2 - Metodologia adotada para caracterização das amostras .....	58
Tabela 3 - Fragilidade das faixas de declividade.....	61
Tabela 4 - Equação dos parâmetros dos teores de sais.....	76
Tabela 5 - Resumo dos fatores de segurança do talude - análise do SLOPE/W .....	89
Tabela 6 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento das amostras do talude (condição inundada) .....	90
Tabela 7 - Quantificação da taxas de ocupação das tipologias por ano .....	95
Tabela 8 - Taxa de variação das tipologias por período .....	95
Tabela 9 - Áreas das declividades .....	105
Tabela 10 - Precipitações real e esperada da RMR (maio/2022) .....	108
Tabela 11 - Percentual do tamanho dos grãos dos materiais e compósitos.....	111
Tabela 12 - Classificação dos materiais e compósitos segundo o SUCS .....	112
Tabela 13 - Densidade real dos materiais e compósitos.....	113
Tabela 14 - Limites de Atterberg dos materiais e compósitos .....	113
Tabela 15 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios.....	114
Tabela 16 - Parâmetros obtidos nos ensaios.....	115
Tabela 17 - Valores de pH em água e em KCl dos materiais e compósitos.....	118
Tabela 18 - Parâmetros químicos dos materiais e compósitos .....	119
Tabela 19 - Percentuais de óxidos presentes nos materiais e compósitos .....	120
Tabela 20 - Umidades ótimas e massa específica seca dos materiais e compósitos .....	125
Tabela 21 - Resultados do ensaio de cisalhamento. ....	127
Tabela 22 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos provenientes da Formação Barreiras da RMR.....	128
Tabela 23 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (07 dias) .....	130
Tabela 24 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (28 dias) .....	131
Tabela 25 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (60 dias) .....	132
Tabela 26 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (120 dias) .....	133
Tabela 27 - Teste ANOVA dos resultados da RCS.....	136
Tabela 28 - Teste de Tukey dos resultados da RCS .....	137
Tabela 29 - Valor-P do cruzamento dos resultados da RCS dos compósitos.....	138
Tabela 30 - Variáveis independentes utilizadas na estatística.....	138

Tabela 31 - ANOVA das variáveis independentes .....	139
Tabela 32 - Modelo Sintetizado.....	139
Tabela 33 - Variáveis de otimização do valor da RCS.....	141
Tabela 34 - Resultados dos ensaios de Inderbitzen .....	142
Tabela 35 - Índices iniciais e finais das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento.....	145
Tabela 36 - Parâmetros dos resultados do ensaio de cisalhamento .....	145
Tabela 37 - Fatores de segurança da estabilização do talude - Condição Inundado .....	149
Tabela 38 - Composição analítica - Muro de contenção solo-cimento .....	149
Tabela 39 - Composição analítica - Muro de contenção com o compósito.....	150

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos RCC – Resolução nº 307/2002 CONAMA .....	31
Quadro 2 - Técnicas para estabilização de encostas.....	38
Quadro 3 - Tipologia do uso e ocupação do solo .....	61
Quadro 4 - Especificações técnicas da fibra de polipropileno.....	65
Quadro 5 - Identificação dos compósitos .....	66
Quadro 6 - Parâmetros do pH.....	74
Quadro 7 - Parâmetros para aceitação dos corpos de prova .....	81
Quadro 8 - Classes de erodibilidade do material .....	88



## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais  
ACI – American Concrete Institute  
ANOVA – Análise de Variância  
APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima  
Cc – Coeficiente de curvatura  
CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção  
CBR – California Bearing Ratio  
CE – Condutividade Elétrica  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CONDEPE/FIDEM – Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco  
CP – Corpo de Prova  
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
Cu – Coeficiente de uniformidade  
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DRX – Difractometria de Raios X  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana  
ETM+ – Enhanced Thematic Mapper Plus  
FP – Fibra de Polipropileno  
FRX – Fluorescência de Raios X  
GC – Grau de Compactação  
GPS – Global Positioning System  
IAEG – International Association of Engineering Geology  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IP – Índice de Plasticidade  
K – Fator de erodibilidade  
LABGEO – Laboratório de Geotecnia  
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  
LSI – Laboratório de Solo e Instrumentação  
LTDA – Limitada ou Sociedade Limitada  
MCT – Miniatura-Compactado-Tropical  
MCV – Minicompactação  
MDT – Modelo Digital do Terreno  
MEAS – Massa Específica Aparente Seca  
NBR – Norma Brasileira  
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PET – Polietileno Tereftalato  
PIB – Produto Interno Bruto  
PST – Porcentagem de Sódio Trocável  
UPE/POLI – Universidade de Pernambuco/Escola Politécnica de Pernambuco  
RAS – Relação de Adsorção de Sódio  
RCC – Resíduo da Construção Civil  
RCS – Resistência à Compressão Simples  
RMR – Região Metropolitana do Recife  
PCR – Prefeitura da Cidade do Recife  
PMRR – Plano Municipal de Redução de Risco  
RPA – Região Político Administrativa  
RSL – Revisão Sistemática de Literatura  
RSM – Response Surface Methodology  
SEDUC – Secretaria de Educação do Ceará  
SIG – Sistema de Informação Geográfica  
SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil  
SUCS – Sistema Unificado de Classificação Dos Solos  
UFCA – Universidade Federal do Cariri  
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco  
UPE – Universidade de Pernambuco  
UNEP – United Nations Environment Programme  
UTM – Universal Transversa de Mercator  
TRB – Transportation Research Board

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>25</b>
<i>1.2.1 Objetivo geral</i> .....	<b>25</b>
<i>1.2.2 Objetivos específicos</i> .....	<b>25</b>
<b>1.3 Premissa</b> .....	<b>25</b>
<b>1.4 Hipótese</b> .....	<b>26</b>
<b>1.5 Delimitação</b> .....	<b>26</b>
<b>1.6 Limitação</b> .....	<b>26</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Expansão populacional nos espaços urbanos</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2 Resíduo da construção Civil – RCC</b> .....	<b>31</b>
<i>2.2.1 Conceito e contextualização do RCC</i> .....	<b>31</b>
<i>2.2.2 Reutilização do RCC</i> .....	<b>33</b>
<b>2.3 Estabilização de encostas.</b> .....	<b>35</b>
<i>2.3.1 Obras de estabilização de encostas</i> .....	<b>37</b>
<b>2.4 Reforço de solos</b> .....	<b>39</b>
<i>2.4.1 Reforço do solo - Fibra sintética X Fibra natural</i> .....	<b>41</b>
<i>2.4.2 Fibra de polipropileno</i> .....	<b>42</b>
<b>2.5 Caracterização dos materiais</b> .....	<b>45</b>
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1 Localização da área de estudo</b> .....	<b>47</b>
<b>3.2 Aspectos socioeconômicos do município</b> .....	<b>49</b>
<b>3.3 Aspectos fisiográficos do município</b> .....	<b>49</b>
<i>3.3.1 Vegetação</i> .....	<b>50</b>
<i>3.3.2 Clima</i> .....	<b>52</b>
<i>3.3.3 Relevo</i> .....	<b>53</b>
<i>3.3.4 Solo</i> .....	<b>54</b>
<i>3.3.5 Geologia</i> .....	<b>56</b>
<i>3.3.6 Hidrografia</i> .....	<b>57</b>
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>
<b>4.1 Análise espaço-temporal</b> .....	<b>60</b>

4.1.1	Obtenção de dados .....	60
4.1.2	Elaboração dos mapas e classificação de áreas por tipo de uso e ocupação .....	60
4.1.3	Análise quantitativa dos dados obtidos .....	61
4.2	Coleta dos materiais e definição dos compósitos .....	62
4.2.1	Coleta do solo .....	62
4.2.2	Coleta do RCC .....	64
4.2.3	Fibra de polipropileno .....	64
4.2.4	Definição dos percentuais dos compósitos .....	65
4.3	Ensaio de caracterização física .....	66
4.3.1	Ensaio de granulometria .....	66
4.3.2	Ensaio de densidade real dos grãos .....	67
4.3.3	Ensaio dos limites de Atterberg .....	68
4.3.4	Ensaio pela metodologia MCT .....	68
4.4	Ensaio de caracterização mineralógica .....	71
4.5	Ensaio de caracterização química .....	73
4.5.1	Determinação do pH .....	73
4.5.2	Teores de sais .....	74
4.5.3	Ensaio de fluorescência de Raios X .....	77
4.6	Ensaio de caracterização mecânica .....	78
4.6.1	Compactação .....	78
4.6.2	Resistência ao Cisalhamento .....	79
4.6.3	Resistência à compressão simples .....	81
4.7	Análise estatística .....	83
4.7.1	Diferença entre as médias da RCS .....	83
4.7.2	Análise da metodologia da superfície de resposta (RSM) .....	84
4.8	Análise de erodibilidade .....	85
4.9	Análise de estabilidade .....	88
4.10	Análise econômica .....	92
5	RESULTADOS .....	93
5.1	Ações antrópicas na área de estudo .....	93
5.2	Análise multitemporal .....	94
5.3	Análise da declividade da área de estudo .....	104
5.4	Deslizamentos na área de estudo .....	107
5.5	Caracterização física .....	110

<b>5.5.1</b>	<b>Análise granulométrica .....</b>	<b>110</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Análise da densidade real dos grãos .....</b>	<b>113</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Análise dos limites de Atterberg .....</b>	<b>113</b>
<b>5.4.4</b>	<b>Análise do MCT .....</b>	<b>114</b>
<b>5.5</b>	<b>Caracterização mineralógica .....</b>	<b>116</b>
<b>5.6</b>	<b>Caracterização química .....</b>	<b>118</b>
<b>5.7</b>	<b>Caracterização mecânica .....</b>	<b>121</b>
<b>5.7.1</b>	<b>Compactação .....</b>	<b>121</b>
<b>5.7.2</b>	<b>Análise da resistência ao cisalhamento do solo .....</b>	<b>125</b>
<b>5.7.3</b>	<b>Análise da resistência à compressão simples (RCS) .....</b>	<b>128</b>
<b>5.8</b>	<b>Resultado da Análise de Estatística .....</b>	<b>136</b>
<b>5.8.1</b>	<b>Diferença entre as médias da RCS dos compósitos .....</b>	<b>136</b>
<b>5.8.2</b>	<b>Análise de Estatística da RCS - Superfície de Resposta.....</b>	<b>138</b>
<b>5.9</b>	<b>Análise de erodibilidade.....</b>	<b>142</b>
<b>5.10</b>	<b>Análise da estabilidade de um talude instável .....</b>	<b>143</b>
<b>5.11</b>	<b>Análise econômica .....</b>	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>152</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>155</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>156</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente expansão dos espaços urbanos provoca uma série de mudanças no ambiente em que se dá a ocupação, intensificando a transformação do espaço e dos ambientes naturais, a partir das atividades humanas (SANTOS et al., 2023; SANTOS; SILVA; VITAL, 2022; PEREIRA; NUNES; ARAÚJO, 2021).

Os impactos ambientais, econômicos e sociais causados pela urbanização podem afetar o desenvolvimento sustentável (SONG et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2020). Quando se tem um crescimento urbano desordenado, sem planejamento e com infraestrutura precária, geram-se riscos geológicos que comprometem a saúde e bem-estar da população (MIRANDA; LIMA, 2021). Segundo Dinotte, Silva e Rossoni (2020), a urbanização é um dos principais fatores para a alteração da paisagem, gerando impactos ambientais significativos.

Para Pereira, Nunes e Araújo (2021), o aumento da população proporciona a diminuição da vegetação nativa, degradando o solo e alterando o relevo, indicando ser fundamental fiscalizar as consequências das ocupações (GONÇALVES; SILVA; LAFAYETTE, 2021). Importante mencionar que a expansão urbana desordenada agrava as consequências dos desastres naturais, como os causados pelos deslizamentos, erosões e inundações (MOURA-BUENO et al., 2018; ROCCATI et al., 2021).

Os acidentes provocados por movimentações de massa em encostas ocupadas têm se intensificado ao longo dos anos (BISPO; MELO; TOUJAGUEZ, 2019). Os desastres naturais ocorridos em 2022 em várias cidades brasileiras, tais como na Região Metropolitana de Recife/PE, Petrópolis/RJ, Franco da Rocha/SP e Salvador/BA, que resultaram em um total de 405 mortes e colapso na economia, comprovam o aumento no número dessas ocorrências (GLOBO, 2022). Além da perda de vidas e do prejuízo financeiro direto, problemas relacionados à saúde pública acabam sendo consequências de alguns desastres naturais (BANDEIRA; NUNES; LIMA, 2016).

No processo de ocupação urbana, várias ações antrópicas contribuem para o agravamento das áreas de riscos, como os cortes inadequados dos taludes e a retirada da cobertura vegetal, deixando o solo desprotegido. A cobertura vegetal, em geral, contribui positivamente na

estabilidade da encosta, devido às raízes e à proteção do solo contra o impacto direto da chuva, dificultando as ocorrências de processos erosivos, combatendo a instabilidade do talude (ROCCATI et al., 2021).

Para aumentar a estabilidade de solos potencialmente erodíveis, estudos têm mostrado que a utilização de fibras naturais ou sintéticas pode ser uma boa alternativa, pois melhora o desempenho das propriedades físicas e mecânicas dos solos (WEI et al., 2018; TANKO, IJIMDIYA, OSINUBI, 2018; SANTOS, 2020). Os resíduos da construção civil (RCC) também têm sido estudados para reforço de solo, buscando avaliar o melhoramento das características físicas e mecânicas e viabilizando a reciclagem. Estudos apontam que o agregado reciclado tem sido cada vez mais pesquisado para utilização nas mais diversas finalidades (NASCIMENTO, 2019; SANTOS, 2020; ALMEIDA, 2021).

Segundo a Agenda 2030 da ONU (Organização das Nações Unidas, 2015), a adoção de ações para redução de desastres naturais é um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), assim como a reutilização dos resíduos (ODS-11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, e ODS-12 – Consumo e Produção Sustentáveis). O uso eficiente dos recursos naturais e a redução da geração de resíduos, por meio da prevenção, reciclagem e reuso, estão descritos nesse documento, com meta de até 2030, com o intuito de reduzir o impacto ambiental negativo das cidades, melhorando a gestão de resíduos sólidos (ONU, 2015).

No setor da construção civil, os volumes de resíduos gerados são elevados, devido ao exagerado consumo de matérias-primas e falta de planejamento. Nos últimos anos, o setor foi responsável por 50% dos investimentos no Brasil, impulsionando diretamente o PIB nacional, que em 2022 apresentou um crescimento de 2,9% (CBIC, 2019; ABRAIN, 2023), trata-se de um setor que provoca grandes danos ambientais e descartes irregulares de resíduos, sendo importante a realização de pesquisas sobre o reaproveitamento desses resíduos (MAGAGNIN FILHO, 2015). Na cidade do Recife/PE, em 2022, foram coletadas 143.936 toneladas de RCC (Resíduos da Construção Civil), que corresponde a 19% do resíduos sólidos urbanos (EMLURB, 2023).

Diante do exposto, a presente pesquisa tem por finalidade realizar um estudo das propriedades físicas, mineralógicas, químicas e mecânicas de um solo, com adição de RCC e de fibras, para melhoramento do solo em obras de estabilização de encostas, trazendo uma contribuição para o desenvolvimento sustentável das cidades.

## 1.1 Justificativa

O crescimento das cidades tem gerado diversas áreas de risco, devido ao mal uso e ocupação do solo urbano. A degradação ambiental tem sido cada vez maior, devido às diversas consequências do crescimento acelerado, como os problemas gerados pelos descartes inadequados de resíduos de construção civil e pelo excessivo volume desse tipo de resíduo. O município do Recife-PE é um exemplo de uma cidade que apresenta vários desses problemas.

Segundo o Plano diretor do Recife (2021), a área territorial da cidade é composta por muitas encostas e, atualmente, identificam-se cerca de 10.000 pontos de risco nas áreas de morros da cidade do Recife, com maior incidência nos bairros de Casa Amarela e Ibura, localizados nas zonas norte e sul, respectivamente.

O crescimento populacional do Recife, entre os anos de 1991 a 2021, apresentou média geométrica de crescimento anual equivalente a 0,89%, saindo de uma população de 1.310.259 para 1.661.017 habitantes (PCR, 2021b; IBGE, 2021). Com isso, as pessoas com menor poder aquisitivo foram ocupando áreas impróprias, como as áreas de risco sujeitas a deslizamentos. Neste sentido, é necessário adotar medidas que reduzam o grau de riscos dessas áreas, evitando maiores prejuízos para as famílias e para os cofres públicos no futuro (SOUZA et al., 2014).

Nos diversos estudos sobre tipos de materiais que contribuem com a estabilidade das encostas, algumas pesquisas têm sido realizadas com o uso de RCC – resíduos da construção civil. Essas pesquisas têm mostrado que o RCC pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo (ZHOU et al., 2021; MEHRJARDI et al., 2020; SULUGURU, 2020; SILVA; FUCALE; FERREIRA, 2019). O RCC é caracterizado por grande volume e peso, que causam impacto sobre o meio ambiente natural devido à logística de destinação e à ocupação do solo urbano (KAMINO; GOMES; BRAGANÇA, 2019).

Além do RCC, estudos também apontam a utilização de fibras sintéticas de polipropileno para tal finalidade. A aplicação desses materiais em solos erodíveis tem melhorado as propriedades físicas e mecânicas (YANG et al., 2019; LIU et al., 2020; YUAN et al., 2021). Estes tipos de fibras apresentam grande durabilidade, visto que têm uma boa resistência à degradação e decomposição (ORASUTTHIKUL; UNNO; YOKOTA, 2017).



Diante do exposto, a presente pesquisa busca estudar as propriedades físicas, mineralógicas, químicas e mecânicas de um compósito (solo, RCC e fibra de polipropileno), para fins de utilização em obras de estabilização de taludes, visando reduzir as consequências dos desastres naturais e contribuir com o desenvolvimento sustentável da cidade, tendo relação direta com os ODS-11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, e ODS-12 – Consumo e Produção Sustentáveis.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo geral***

Analisar as propriedades de um solo com adição de resíduos da construção civil e de fibras de polipropileno em uma área de risco situada no bairro da Macaxeira, Recife-PE.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Com o desenvolver da pesquisa, pretendeu-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar, de forma temporal, as consequências das ações antrópicas gerando aumento dos processos erosivos;
- Analisar as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas do solo, RCC e dos compósitos;
- Identificar, por meio de uma análise estatística, a proporção ideal de solo, RCC e fibra de polipropileno para o melhoramento da resistência à compressão do solo;
- Avaliar o potencial de erodibilidade do compósito, constituído com a melhor proporção dos materiais; e
- Verificar a estabilidade de um talude contido pelo compósito estudado.

## **1.3 Premissa**

Baseado nos resultados de estudos, nacionais e internacionais que utilizaram resíduo da construção civil (ZHOU et al., 2021; SULUGURU, 2020; SILVA, 2018), fibra (YUAN et al., 2021; ZHAO et al., 2020; LIU et al., 2020) e ambos (ALMEIDA, 2021; SANTOS, 2020;

NASCIMENTO, 2019; MACEDO, 2013), esta pesquisa tem como premissa que o resíduo de construção e as fibras são materiais que ajudam a melhorar a estabilidade de um solo para diversos fins.

#### **1.4 Hipótese**

A hipótese desta pesquisa é que o material desenvolvido com o solo, resíduo de construção civil e a fibra de polipropileno seja uma alternativa para melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo da encosta em estudo, com a finalidade de empregá-lo em ações estruturais de redução de risco aos deslizamentos de encostas.

#### **1.5 Delimitação**

Com o intuito de obter um material que melhore as condições de estabilidade do talude, foram produzidos compósitos formados pelo solo, RCC e fibra de polipropileno, que foram submetidos a ensaios físicos, químicos, mineralógicos e mecânicos. Com os resultados obtidos, foi feita uma análise estatística que indicou o compósito que melhor apresenta resultados das propriedades analisadas.

#### **1.6 Limitação**

Algumas restrições foram verificadas no desenvolvimento desta pesquisa:

- A amostra indeformada do solo foi coletada em uma dimensão inferior, conforme os critérios estabelecidos na NBR 9604 (ABNT, 2016), pois poderia agravar a situação de risco da encosta.
- Dificuldade na obtenção da imagem para o ano de 2004, não foi possível encontrar uma imagem clara para este período.
- Como não houve a possibilidade de obtenção das informações necessárias para a análise de estabilidade da área em estudo, optou-se por analisar o compósito estudado para estabilizar uma encosta de outra área de risco.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Um dos desafios na construção civil nos últimos anos é a busca por materiais sustentáveis que apresentem qualidade e custo reduzido e que sejam de grande valia para o meio ambiente e para a engenharia civil. Com este foco, muitas pesquisas vêm trazendo possíveis soluções para que isso aconteça, investigando novos materiais aplicáveis e que favoreçam um desenvolvimento sustentável.

Desta forma, este capítulo apresenta aspectos sobre o crescimento urbano, definições, aplicações e impactos ambientais ocasionados pelos Resíduos da Construção Civil (RCC), como também o uso e características de fibras de polipropileno para melhoramento de solo.

### **2.1 Expansão populacional nos espaços urbanos**

No passado, a população rural migrou para as cidades buscando obter os benefícios da aproximação do desenvolvimento socioeconômico, do progresso científico e tecnológico (SONG et al., 2021). Desta forma, o movimento de urbanização da população se tornou uma tendência mundial com impactos ambientais consideráveis (BULTI; ABEBE, 2020).

O crescimento dos espaços urbanos provoca uma série de mudanças no ambiente, intensificando a transformação das áreas e dos ambientes naturais, a partir das atividades humanas, resultando em inúmeros problemas a serem enfrentados (SANTOS; SILVA; VITAL, 2022; PEREIRA; NUNES; ARAÚJO, 2021; LIU; MA, 2020; NASCIMENTO et al., 2020), como a deficiência dos serviços de infraestruturas (saúde, educação, mobilidade e habitação) e o crescimento das ocupações em áreas impróprias, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Ocupação irregular de encosta: Rua Alto do Olho d'água-Macaxeira-Recife-PE



Fonte: Autor.

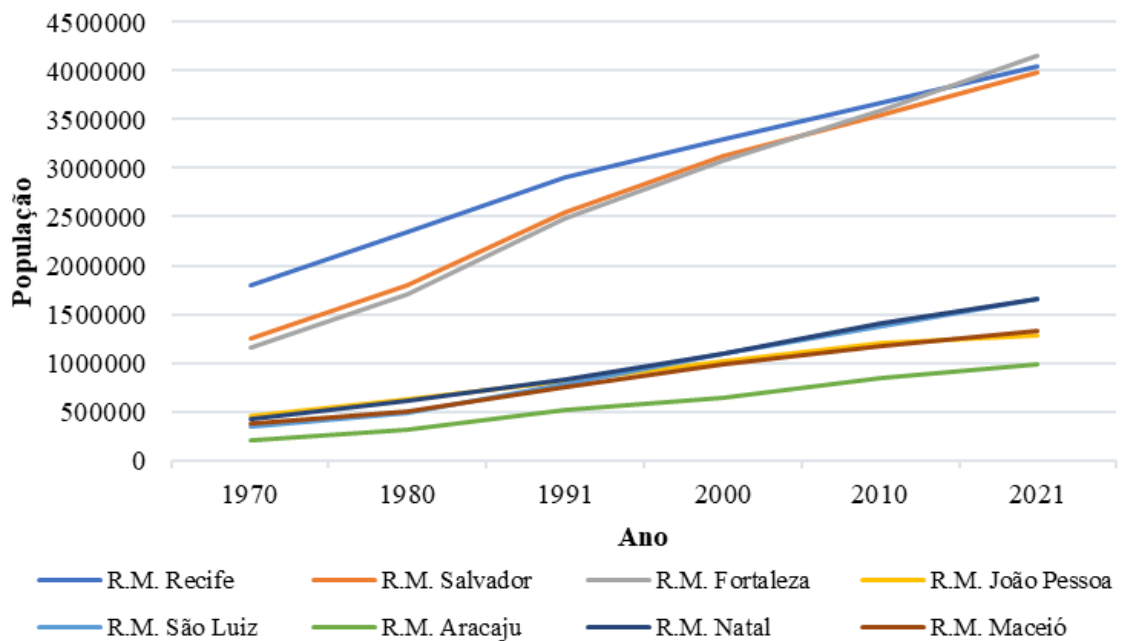
No Brasil, paralelamente ao processo de industrialização, entre os anos de 1930 e 1980, intensificou-se o movimento migratório para as cidades, seguindo o direcionamento de organização centro-periferia (GOMES-RIBEIRO; QUEIROZ-RIBEIRO, 2020). A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2017) declara que a área considerada urbana no Brasil é equivalente a 0,63% do território nacional, mas abriga 84,3% da população brasileira, com concentração de, aproximadamente, 160 milhões de habitantes (FARIAS et al., 2017).

Pelas dificuldades de aquisição de terrenos em áreas dotadas de infraestrutura urbana, devido à especulação imobiliária, restam os terrenos com menor valor de mercado para a classe social de baixa renda, contribuindo para o crescimento do número de moradias em áreas de risco socioambiental. É nesse contexto histórico que surge o desenvolvimento das grandes cidades brasileiras (CARVALHO; GALVÃO, 2016).

A população de menor poder aquisitivo ocupou áreas de encostas e periferias (MONTEIRO et al., 2020; LEITE; GIAVAROTTI, 2020). A expansão da urbanização para a periferia, por sua vez, aconteceu, em grande parte, através da autoconstrução (LEITE; GIAVAROTTI, 2020). A urbanização do Recife e Região Metropolitana é marcada pela desigualdade social, com ocupações irregulares em áreas ambientalmente frágeis, como áreas de morros (CARDOSO; DENALDI, 2018).

A Figura 2 ilustra o crescimento da população urbana no Nordeste entre os anos de 1970 e 2021, onde se percebe que a população da Região Metropolitana do Recife (RMR) foi a que mais cresceu até o ano de 2010 (IBGE, 2010). Um terço da população do Recife vive em áreas impróprias para a ocupação, como margens de rios e locais com pouca infraestrutura, herança do processo de exclusão social decorrente da história do Brasil (SANTANA, 2019; SOUZA et al., 2014).

Figura 2 - Avanço da população nas capitais do Nordeste (1970-2021)



Fonte: Adaptado pelo autor – com dados do Censo IBGE (2010) e estimativa do IBGE (2021).

O assentamento irregular da população em áreas de nascentes e encostas ocorre com frequência e o acesso a serviços urbanos básicos, como saneamento, energia, educação e saúde, está ficando cada vez mais difícil (MONTEIRO et al., 2020). Como resultado, a topografia e as paisagens são constantemente alteradas pelo comportamento humano para atender às necessidades habitacionais, devido às restrições socioeconômicas (SANTOS; FALCÃO; LIMA, 2020).

Para Pereira, Nunes e Araújo (2021), o aumento da população proporciona a diminuição da vegetação nativa, degradando o solo e alterando o relevo, indicando ser fundamental fiscalizar as consequências das ocupações (GONÇALVES; SILVA; LAFAYETTE, 2021). Em várias

idades do Brasil, o desmatamento e o lançamento de resíduos e esgotos nas encostas podem levar a desastres (NASCIMENTO et al., 2020).

Importante mencionar que um dos danos causados com a expansão urbana desordenada e diminuição da vegetação é a erosão, que gera a instabilidade do solo (MOURA-BUENO et al., 2018; ROCCATI et al., 2021). A intensificação dos processos erosivos estão relacionados às chuvas, consolidação de materiais geológicos, topografia e características da ocupação da área (BASILIO et al., 2019). A erosão do solo, que afeta a segurança, a paisagem e a economia, é um fenômeno global (POLOVINA et al., 2021).

Além disso, corte e aterro, disposição irregular de resíduos, mudanças nos sistemas de drenagem e construção de moradias sem acompanhamento técnico (Figura 3) elevam o grau de risco das encostas. Estas práticas interferem de forma direta no comportamento do solo, pois os efeitos resultantes provocam alterações significativas em áreas sensíveis e vulneráveis, bem como alterações em sua topografia, atingindo formas ainda mais instáveis (GOMES et al., 2021).

Figura 3 - Ações antrópicas em encosta: Rua Alto do Olho d'água-Macaxeira-Recife-PE



Fonte: Autor.

Em consequência disso, os acidentes provocados por movimentações de massa de encostas ocupadas têm se intensificado ao longo dos anos (BISPO; MELO; TOUJAGUEZ, 2019), por ocorrerem em solos suscetíveis aos processos erodíveis e sofrerem efeitos das inadequadas ações humanas.

## 2.2 Resíduo da construção Civil – RCC

O descarte de Resíduo da Construção Civil (RCC) é um problema mundial devido aos diversos impactos negativos. Esses resíduos levam à escassez de áreas valiosas e perdas econômicas, sendo necessário realizar pesquisas para viabilizar a reutilização e/ou recuperação dos RCC (HIDALGO et al., 2023; KHANDANI et al., 2023; SANTA ROSA et al., 2022; ZHOU et al., 2021).

### 2.2.1 Conceito e contextualização do RCC

A resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, órgão federal responsável pela gestão de resíduos, define resíduo da construção civil como:

Art. 2º inc. I – Resíduos da construção civil: são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002, p. 95).

Essa resolução também classifica os resíduos reciclados, conforme o Quadro 1. É possível se utilizar de resíduos da classe A como agregado recicláveis na construção civil (BRASIL, 2002). A NBR 10.004 (ABNT, 2004), norma que trata sobre os resíduos sólidos, classifica tais resíduos como Classe II-B – inertes, pelo fato de serem constituídos por componentes minerais não poluentes e serem, praticamente, inertes quimicamente.

Quadro 1 - Classificação dos RCC – Resolução nº 307/2002 CONAMA

CLASSE	DESCRIÇÃO
A	são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, exemplos: tijolos, telhas, agregados, concreto e solos de escavação etc.
B	são os resíduos recicláveis para outras destinações, exemplos: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso etc.
C	são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, exemplos: os produtos oriundos do isopor, lixas, massa de vidro etc.
D	são os resíduos perigosos, oriundos do processo de construção, exemplos: tintas, solventes, óleos e outros; ou aqueles contaminados, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Fonte: Adaptado de Brasil (2002) e Brasil (2011).

Importante ressaltar, que, na resolução CONAMA nº 431/2011, o gesso foi reclassificado como resíduo da categoria B, porém deve estar separado dos demais resíduos desta e de outras categorias, sendo acondicionado em recipiente próprio para futura reciclagem, caso contrário, estará sujeito a restrições que inviabilizam o processo de reciclagem (CABRAL; MOREIRA, 2011; LUNA, 2018).

No mundo, o uso de agregados reciclados é uma prática fundamental, visando a prevenção de poluição ambiental e redução do impacto da mineração de agregados naturais (PALACIO-LEON; PORRAS; CASTIBLANCO, 2017). Na União Européia, Mália et al. (2013) constatam que a demolição de edifícios de concreto armado gera resíduos equivalentes a mais de 60% do total de resíduos, chegando a representar 80% do total de resíduos gerados de prédios de estrutura de concreto e alvenaria.

No Brasil, os materiais que compõem um RCC, normalmente, são provenientes da execução de serviços, como fundações, terraplenagem e demolição. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022) estima que, em 2021, foram coletadas cerca de 48 milhões de toneladas de RCC em todo território nacional, equivalente a, aproximadamente, 63% de todos os resíduos sólidos urbanos. Segundo Oliveira et al. (2016), um dos principais problemas associados à produção em massa de RCC é que esses materiais são depositados em locais irregulares, na maioria das vezes, trazendo sérios problemas ao ambiente natural e à qualidade de vida da população.

Segundo a EMLURB (2023), somente em Recife, no ano de 2022, foram coletadas 143.936 toneladas de RCC, que corresponde a 19% dos resíduos sólidos urbanos. Holanda (2018) desenvolveu um módulo em um software para apoiar a gestão municipal de RCC na Região Metropolitana do Recife (RMR), mapeando pontos de descarte irregular, conforme apresentado na Tabela 1.



Tabela 1 - Quantidade de pontos de deposição irregular de RCC da RMR

<b>Município</b>	<b>Área urbanizada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Pontos de deposição inadequada</b>
Recife	142,7	565
Olinda	31,5	100
Jaboatão dos Guararapes	85,1	153
Camaragibe	50,1	124
Cabo de Santo Agostinho	26,7	85
São Lourenço da Mata	10,8	68

Fonte: Adaptado de Holanda (2018).

O Decreto nº 27.399, de 27 de setembro de 2013, regulamenta o uso de áreas para recebimento e repasse de resíduos sólidos em Recife/PE. Dependendo da estrutura, pontos de recepção de resíduos ou “eco-estações” podem receber desde resíduos domésticos a RCC (RECIFE, 2013). No entanto, a partir dos resultados de Dias et al. (2022), Holanda (2018) e Paz et al. (2018), verifica-se que o RCC ainda é encontrado de forma irregular nos bairros e na região metropolitana do Recife.

### **2.2.2 Reutilização do RCC**

A reutilização, reaplicação do produto sem transformação do mesmo, e a reciclagem, reaproveitamento do resíduo após ter submetido à transformação, de Resíduos da Construção Civil (RCC) aparecem como alternativas viáveis para a minimização dos impactos ambientais, ocasionados pela alta geração (BRASIL, 2002).

Zhou et al. (2021) verificaram que, ao adicionar 10% de pó de tijolo reciclado no solo, apresentou maiores resistências à compressão simples (RCS), contudo, ao adicionar pó de concreto reciclado e pó de tijolo reciclado ao solo, houve redução da RCS quando comparado ao solo natural. Pedrosa (2021), ao incorporar o RCC no solo, verificou que houve aumento de 22% na resistência à compressão simples, em amostras compostas por 30% de agregado reciclado e 0,5% de adição de fibra de polietileno (PET), comparados com o solo puro.

Yang et al. (2022) adicionaram pó de concreto reciclado ao concreto espumado e observaram que, quando a taxa de substituição do pó de concreto reciclado é inferior a 15%, a resistência à compressão das amostras é relativamente inferior à das amostras sem resíduos. No entanto, devido à adição de 10% de metacaulim, foi possível aumentar a resistência mecânica das amostras com resíduo, elevando em 32,9% a 34,9%.

Quando a areia de rejeitos de ferro é combinada com agregado reciclado, pode-se obter um concreto de melhor resistência a altas temperaturas. Podendo ser utilizado na construção de estruturas de concreto de combate a incêndio (ZHU et al., 2022). Os autores ainda concluíram que a areia de rejeitos de ferro e o agregado reciclado podem substituir, respectivamente, o agregado miúdo e o graúdo para produção de concreto com resistência à compressão maiores que 40 MPa.

Após realizar ensaios de compressão simples em amostras de solo melhorado, Almeida (2021) realizou uma análise estatística que estabeleceu um modelo matemático com  $R^2 = 97,60\%$ . Este modelo considera que o teor de agregado reciclado de 16,16%, um teor de fibra de sisal de 0,50% com um tempo de cura de 60 dias, proporcionando uma resistência à compressão do compósito igual a 863,30 kPa, obtendo resultados melhores que o solo em estado natural.

Nascimento et al. (2021), utilizando uma argila de alta plasticidade, verificaram que a adição de 30% e 50% de teor de agregado reciclado é benéfica para a cobertura final de aterros sanitários. Com o mesmo solo, Silva (2020) analisou a resistência à compressão simples de compósitos de solo com adição de agregado reciclado e resíduos de madeira, corroborando que o compósito que contém, aproximadamente, 30% de RCC, com 7 e 28 dias de cura, apresentou melhor desempenho.

Santos (2020), utilizando o mesmo solo de Nascimento (2019) e Silva (2020), obteve que o compósito formado por 70% de solo, 29,5% de agregado reciclado e 0,5% de fibra de babaçu alcançou uma resistência à compressão simples de 1230 kPa aos 120 dias, aumentando a resistência à compressão do solo puro em 24%.

A adição de RCC provocou alterações nas propriedades físicas e mecânicas do solo, tais como: aumento das proporções de areia; diminuição da porosidade, plasticidade e umidade ótima; e aumento da massa específica seca máxima, tornando, assim, uma melhoria para o uso como subleito de pavimentos, de acordo com os parâmetros TRB (antigo HRB) (SILVA, 2018).

Na resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura, observou-se que o concreto referência não apresentou eficiência mecânica para concreto estrutural, porém todos os compósitos contendo RCC apresentaram eficiência mecânica superior à mistura de referência. Destaque

para a mistura contendo 50% RCC, pois apresentou uma resistência de 26,7 MPa , aumentando a resistência à compressão do concreto convencional em 16%. Com esse resultado, o concreto com substituição de 50% de agregado reciclado se enquadra do concreto estrutural (SILVA, 2020).

Portanto, é necessário desenvolver novas pesquisas e métodos para a recuperação e/ou reaproveitamento desses resíduos, a fim de reduzir os danos ao meio ambiente, aliando viabilidade econômica e fiscalização por órgãos governamentais.

### **2.3 Estabilização de encostas.**

O Brasil é um país naturalmente exposto à ocorrência de movimentos de massa devido às características climáticas, geológicas e geomorfológicas. As zonas costeiras do País, além de concentrar as maiores cidades, conseqüentemente, maior população, possuem uma combinação de alta pluviosidade e declives acentuados, que pioram a instabilidade das encostas (PBMC, 2016; PINTO; PASSOS; CANEPARO, 2012).

A instabilidade de uma encosta (Figura 4), devido ao processo de deslizamento de terra, está associada a chuvas fortes e de alta intensidade (MELO, 2021). As chuvas contribuem diretamente com a instabilidade das encostas, devido ao aumento dos níveis de água e forças de infiltração, preenchendo temporariamente as ranhuras nos solos de saprólito (argila/silte) e rocha, reduzindo a resistência do solo e para o aumento das tensões atuantes (LIMA, 2002; MELO, 2021; ALMEIDA, 2021).

Figura 4 - Deslizamento em Recife/PE (maio/2022)



Fonte: REUTERS (2022)

O crescimento populacional desordenado, em áreas de alta declividade, contribuem para as ocorrências dos desastres e impactos ambientais, pois altera o ambiente natural por meio do corte e aterro, diminuindo a cobertura vegetal, promovendo diferentes processos de instabilidade, com erosão significativa nas camadas arenosas e deslizamentos de terra nas camadas argilosas (MELO, 2021; CARVALHAIS et al., 2019; SILVA et al., 2016).

Desta forma, os processos de urbanização desordenados e irregulares, sem o devido planejamento e controle, são causadores de problemas ambientais e desastres naturais nas grandes cidades (BANDEIRA; NUNES; LIMA, 2016). O acúmulo de resíduos sólidos, os cortes verticais dos taludes e a falta de redes de drenagem são fatores que contribuem para a redução do fator de segurança das encostas, o que pode levar ao movimento de massa (PFALTZGRAFF, 2007; CARVALHAIS et al., 2019)

Brasil (2007) descreve um método qualitativo para avaliação de estabilidade de uma encosta em que o grau de risco é atribuído através da possibilidade de ocorrência de um evento e as consequências socioeconômicas adversas causadas pelo mesmo, podendo ser enquadrado como uma das quatro classes: R1 – Baixo; R2 – Médio; R3 – Alto; e R4 – Muito Alto.

Outro método para avaliar a estabilidade de um talude é por meio do cálculo do fator de segurança. Os métodos mais utilizados dividem o talude em fatias, visto que não apresentam

restrições quanto à homogeneidade do solo e geometria da encosta (GERSCOVICH, 2016). O método de *Bishop* apresenta uma análise de superfície circular, sendo muito utilizado, na prática, em projetos simplificados, através de cálculos manuais, apresentando resultados conservativos, porém, com fatores de segurança imprecisos para análise de solos estratificados.

Os métodos *Morgenstern e Price* e *Spencer* são rigorosos e apresentam uma análise de superfície não circular, indicando valores de fatores de segurança realistas, contudo, precisam de auxílio computacional para realização dos cálculos. A técnica *Morgenstern e Price* é mais utilizada para estudos ou análises detalhadas, contudo, o método *Spencer* é utilizado para análise mais sofisticadas, em áreas com restrições geométricas.

### **2.3.1 Obras de estabilização de encostas**

As obras de contenção têm como finalidade promover a estabilidade contra os empuxos de água, rocha, terra e/ou qualquer outro esforço promovido por estruturas, usando o próprio peso. A saturação do solo, devido à água da chuva infiltrada, altera a estrutura do solo, ocasionando perda de resistência e, conseqüentemente, deslizamentos de solos, gerando-se custos ambientais, humanitários e econômicos à sociedade (BEZERRA, 2022). Para evitar estes acontecimentos, surge a necessidade de obras de contenção.

O Manual de Ocupação de Morros da RMR (2003) apresenta diversas técnicas de obras de contenções com o objetivo de aumentar a segurança da população quanto aos deslizamentos (Quadro 2). Para auxiliar a busca de soluções eficientes para estabilização de um talude, existem *softwares* (ex: GeoSlope, Slide) que utilizam métodos de elementos finitos, que ajudam a fazer simulações nas encostas, verificando se a técnica adotada para evitar um deslizamento é segura ou não.

Quadro 2 - Técnicas para estabilização de encostas

GRUPOS	SUBGRUPOS		TIPOS DE OBRAS	
Obras sem estrutura de contenção	Retaludamento	Corte	Taludes contínuo e escalonado	
		Aterro compactado	Carga de fase de talude (muro de terra)	
	Proteção Superficial	Materiais naturais	Gramíneas	Gramíneas
			Gramma armada com geossintético	Gramma armada com geossintético
			Vegetação arbórea	Vegetação arbórea
			Selagem de fendas com solo argiloso	Selagem de fendas com solo argiloso
		Materiais artificiais	Canaleta de borda, de pé e de descida.	Canaleta de borda, de pé e de descida.
			Cimentação	Cimentação
			Geomanta e gramíneas	Geomanta e gramíneas
			Geocélula e solo compactado	Geocélula e solo compactado
			Tela argamassada	Tela argamassada
			Pano de pedra ou lajota	Pano de pedra ou lajota
Estabilização de blocos	Retenção	Tela metálica e tirante		
	Remoção	Desmonte		
Obras com estrutura de contenção	Muro de arrimo	Solo cimento	Solo cimento ensacado (sacos de fibra têxtil ou geossintético)	
		Pedra rachão	Pedra seca (sem rejunte)	Pedra seca (sem rejunte)
			Alvenaria de pedra (com rejunte)	Alvenaria de pedra (com rejunte)
		Concreto	Concreto armado	Concreto armado
			Concreto ciclópico	Concreto ciclópico
		Gabião	Gabião-caixa	
	Bloco de concreto	Bloco de concreto articulado (pré-moldado encaixado sem rejunte)		
	Solo-pneu	Solo-pneu		
	Outras soluções de contenção	Terra armada	Placa pré-moldada de concreto, ancoragem metálica ou geossintético	
		Micro-ancoragem	Placa e montante de concreto, ancoragem metálica ou geossintético	
Solo compactado e reforçado		Geossintético	Geossintético	
	Paramento de pré-moldado	Paramento de pré-moldado		
Obras de proteção para massa movimentada	Contenção de massas movimentadas	Materiais naturais	Barreira Vegetal	
		Materiais artificiais	Muro de espera	

Fonte: Adaptado do Manual de ocupação de morros da RMR (2003)

Nas encostas urbanas da RMR, tem sido bastante utilizada a técnica do muro de arrimo de solo-cimento ensacado (Figura 5) do grupo “Com estrutura de contenção”. Esta técnica apresenta rápida execução, com mão de obra e equipamentos não especializados, o que a torna uma solução de baixo custo, podendo ser aplicada em estruturas com até cinco metros de altura (OLIVEIRA; CAVALCANTI; RIBEIRO, 2021; FREITAS et al., 2018). O Manual de Ocupação de Morros da RMR (2003) descreve que materiais com 50% a 90% de areia na sua composição fornecem um solo-cimento mais econômico e durável.

Figura 5 - Muro de contenção de solo-cimento ensacado



Fonte: Prefeitura de Volta Redonda (2021)

## 2.4 Reforço de solos

Os solos naturais podem não ter propriedades técnicas suficientes para atender aos requisitos de projeto e das normas para serem utilizados em obras (YARBAŞI; KALKAN, 2020; SANTOS; CRISPIM; PAULO, 2018), no entanto, esses solos podem ser melhorados (QUARIGUASI et al., 2018).

Para Santos (2020), o solo é parte integrante e fundamental na construção civil e pode ser utilizado como insumo na construção. Em geral, os solos apresentam pouca resistência mecânica, por isso, diversas técnicas de melhoramento vêm sendo investigadas. A busca pelo melhoramento do solo está associada a civilizações antigas, como a Babilônia e o Império Chinês, misturando palha, madeira ou bambu com o solo (BRITO, 2002).

A técnica de reforço pode incluir solos flexíveis, expansivos, macios ou solos com suporte mecânico insuficiente, com o intuito de melhorar alguma característica mecânica ou química, adaptando o material a um uso específico (TORIO-KAIMO; DIEGO; ALCANTARA, 2020; MOUSAVI; KARAMVAND, 2017; SAGRILO et al., 2017). O reforço de solos, por inclusões de materiais, tem a capacidade de aumentar a resistência e a estabilidade e reduzir o recalque e a deformação lateral (SINGH; ALI JAWAID; CHAURASI, 2016). Existem vários métodos

para estabilização do solo e a escolha depende da natureza do material, da finalidade esperada e do custo de construção (GARBER; HOEL, 2009; BRITO; PARANHOS, 2017).

Owino e Hossain (2023), Portela et al. (2021), Han e Cheng (2014), DeJong et al. (2010) e Whiffin, Van Paassen e Harkes (2007) descrevem que os métodos tradicionais de melhoramento de solos, incluindo a substituição do solo, o reforço com pilares de pedra, estacas e misturas químicas, são amplamente utilizados com diferentes vantagens, mas a estabilização química, misturando o solo com cimento e cal, é o método mais usado devido às razões econômicas.

No entanto, o problema do método do cimento e cal é o impacto ambiental (CHEN et al., 2021). Embora o cimento Portland seja conhecido como o material de construção mais utilizado no mundo, a indústria do cimento tem sido criticada, nos últimos anos, por emitir muito gás de efeito estufa (ISLAM; CHITTOORI; BURBANK, 2020; UNEP, 2010). O relatório anual do UNEP (2010) aponta que, para produzir uma tonelada de cimento, é liberada uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cujo lançamento representa cerca de 7% a 8% do total anual de emissões de CO<sub>2</sub> no meio ambiente, o que leva pesquisadores a buscar abordagens alternativas a esses métodos convencionais.

Outros métodos comuns de estabilização do solo envolvem o uso de materiais em formato de tiras, malhas, barras e/ou grade. Essas técnicas de reforço são bem aplicáveis, contudo, são onerosas, quando comparadas ao reforço que utiliza fibras (URS; NANJUNDA; THEJA, 2020), e são misturadas ao solo de forma aleatória, como um aditivo, replicando o efeito estabilizador das raízes das plantas (TORIO-KAIMO; DIEGO; ALCANTARA, 2020).

O reforço do solo com fibras é uma técnica conhecida no campo da engenharia civil e há uma variedade de fibras que podem ser utilizadas para reforço de compósitos (MACEDO, 2013). O objetivo da introdução de fibras no solo é adicionar um material com alta resistência à tração, aumentando a resistência do solo e diminuindo sua compressibilidade (MORANDINI; SCHNEIDER, 2017).

A utilização de fibras para o reforço na pavimentação e em solo de fundação tem se mostrado eficaz e competitiva, principalmente, quando se trata de estabilização de taludes e aumento da resistência de solos sujeitos a grandes esforços (LI et al., 2023; SUN et al., 2023; SILVEIRA,



2019). Entretanto, esta técnica é relativamente nova e o mecanismo de desempenho da fibra no solo precisa ser totalmente investigado em todos os projetos geotécnicos (SONMEZER, 2019).

#### ***2.4.1 Reforço do solo - Fibra sintética X Fibra natural***

O solo reforçado com fibras foi difundido a partir dos anos 1980 por Hoover et al. (1982) e Gray e Ohashi (1983). O uso de fibras para reforço ganhou popularidade devido ao seu baixo custo e acessibilidade (DANSO et al., 2015; LI et al., 2012). Devido às vantagens de boa distribuição, alta inércia e efeito de reforço uniforme, as perspectivas de aplicação prática de solos reforçados com fibras têm atraído cada vez mais atenção (ESTABRAGH; BORDBAR; JAVADI, 2013; SANTOS, 2020)

O solo reforçado com fibra é um tipo de compósito formado pela mistura aleatória de materiais fibrosos no solo, com o intuito de melhorar as propriedades físicas e mecânicas, compensando a fraqueza da estrutura do solo natural (CHOOBBASTI; KUTANAEI; AFRAKOTI, 2019; LIU et al., 2020). A quantidade, o comprimento, a dureza, a finura e a massa específica das fibras, assim como as propriedades físicas do solo, como: teor de água, densidade seca, composição das partículas etc., têm efeitos importantes para o aumento da resistência do solo com fibra (LIU et al., 2020).

A fibra pode ser obtida de fontes naturais ou sintéticas (fabricadas ou provenientes de resíduos) (HEJAZI et al., 2012). Ao se tratar de reforço do solo com fibras naturais, alguns dos fatores mais relevantes são: a geometria, o comprimento e o diâmetro das fibras, uma vez que a fixação das fibras, a resistência à tração e o módulo de elasticidade alcançados pelo solo reforçado são influenciados por tais condições (CARVALHO, 2019).

As fibras naturais de bambu, juta, coco, palma e sisal são, frequentemente, utilizadas para reforço do solo por serem econômicas, acessíveis, abundantes e biodegradáveis (TORIO-KAIMO; DIEGO; ALCANTARA, 2020). No entanto, com o tempo, sua resistência diminui gradualmente e a taxa de perda de resistência varia de acordo com o tipo de material utilizado (SHUKLA, 2017).

Urs, Nanjunda e Thejas (2020) concluíram que a adição de fibra de coco aumentou os valores de CBR (California Bearing Ratio) e a resistência à compressão não confinada, além disso,

com 1,0% de fibra, foi encontrado um valor de CBR 233,5% superior ao solo sem reforço. Santos (2020) verificou que a adição de RCC e fibras de coco babaçu ao solo aumentou cerca de 24% a resistência à compressão simples, aos 120 dias, em relação ao solo puro, tornando a técnica eficaz em termos de propriedades mecânicas do solo.

Fibras sintéticas feitas de polipropileno, poliéster, nylon, vidro também são bem utilizadas, pois apresentam mais a durabilidade e não se degradam, em comparação com as fibras naturais (ORASUTTHIKUL; UNNO; YOKOTA, 2017), contudo, ao contrário das fibras naturais, são mais onerosas e emitem gases de efeito estufa durante sua produção, por serem derivadas de petróleo (HEJAZI et al., 2012; TORIO-KAIMO; DIEGO; ALCANTARA, 2020).

Segundo Valipour, Shourijeh e Mohammadinia (2021), a adição de fibras de vidro na argila resulta em diminuição da densidade seca máxima e aumento do teor de umidade. Os mesmos autores observaram que a maior resistência ao cisalhamento foi associada a um teor de vidro de 1,0% entre as razões de 0,5%, 1,0% e 1,5%. A fibra de poliéster de 4 mm de comprimento mostra o efeito de melhoria do solo na resistência à compressão, com teor ideal equivalente a 0,6% (ZHAO et al., 2020).

A escolha do tipo de fibra deve estar associada às propriedades de cada material, sendo necessário entender o mecanismo de interação da matriz com o reforço, para não comprometer o desempenho. Por exemplo, quando o objetivo é melhorar o desempenho dos compósitos fibra-solo, aspectos como mistura de fibras, comprimento, espessura e quantidade proporcional à vida útil devem ser considerados relevantes (LI et al., 2023; PEDROSA, 2021).

Nesse sentido, vida útil de um material pode ser entendida como o período de tempo durante o qual o seu desempenho é considerado satisfatório, uma vez que este material sofre o processo de degradação no qual acontecerá uma alteração com perda de qualidade do material. Portanto, é importante entender os fatores e mecanismos de degradação das fibras no solo, considerando fatores físicos, químicos, biológicos e ambientais (PORTELA, 2019).

#### ***2.4.2 Fibra de polipropileno***

Desde 1930, o petróleo é a principal fonte de matéria-prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos, a partir dos quais são feitos polímeros (plásticos, fibras, borracha e

adesivos). As fibras sintéticas mais produzidas em têxteis, em ordem de consumo, são poliéster, polipropileno, nylon e acrílico (ROMERO et al., 1995; ILLSTON, 1994). Caracterizados por baixo módulo de elasticidade, ductilidade variável e resistência à tração moderada, os polímeros são materiais menos rígidos e dúcteis (TAYLOR, 1994).

As fibras de polipropileno (Figura 6) são polímeros termoplásticos (microfibras ou macrofibras), fibrilados e alongados, fáceis de manusear, não corrosivos e econômicos, podendo ser aplicadas para diversas finalidades. O uso de diferentes teores de fibras em misturas de concreto pode melhorar a resistência à compressão, resistência à tração (propriedades mecânicas) do concreto (SOHAIB et al., 2018).

Figura 6 - Fibra de polipropileno



Fonte: Autor

As fibras poliméricas, quando utilizadas em piso de concreto, têm a função de minimizar a fissuração que ocorre no estado plástico e nas primeiras horas de endurecimento, não devendo substituir os habituais reforços para o combate da retração hidráulica, pois apresentam pouca influência sobre as propriedades do concreto endurecido (ACI, 1997).

Em estudo adicionando fibra de polipropileno para reforço de concreto, Kuranli et al. (2022) mostraram que ocorreu um melhoramento nas propriedades de resistência e durabilidade, com aumento do fator de tenacidade à flexão em 260%, comparando com os resultados do concreto sem adição de fibra.

Os polímeros têm perspectivas interessantes para a estabilização do solo devido ao seu reforço mecânico e baixo impacto ambiental (LIU et al., 2019). Rezaeimalek, Huang e Bin-Shafique (2017) observaram que os polímeros preenchem os vazios do solo e formam pontes de ligação, melhorando a estrutura interna do solo.

Santos et al. (2022) realizaram uma revisão sistemática da literatura (RSL), com o objetivo de analisar os achados e conclusões, entre os anos de 2016 e 2021 (5 anos), de estudos utilizando a incorporação de fibras para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos erodíveis. Identificaram vários tipos de fibras, tanto sintéticas quanto naturais, para melhoramento de solo, contudo, a fibra de polipropileno (Figura 7) merece destaque, pois aparece em 18 dentre os 50 estudos analisados.

Figura 7 - Fibra de polipropileno (A); e Fibra no solo (B)



Fonte: Gong et al. (2019)

Para solos arenosos, Sonmezer (2019) utilizou a fibra de polipropileno, variando sua porcentagem de 0,25% a 1,0%. O autor concluiu que a resistência ao cisalhamento teve os melhores resultados com 1,0% de fibra e comprimento de 19mm. Ta'negonbadi, Noorzad e Shakery (2021) corroboram com o teor citado, afirmando, ainda, que o teor de 1% de polipropileno aumentou em 7 vezes a resistência ao cisalhamento da areia não reforçada.

Também utilizando solo arenoso, Liu et al. (2018), Abo El-Naga, Elsiragy e Ragab (2020) e Zhao et al. (2020) verificaram que os melhores resultados em relação à resistência à compressão foram encontrados para um teor de 0,6%. A inclusão de fibras no solo aumentou os valores de CBR em 177%, quando comparado ao solo não reforçado. Acima de 0,6%, a taxa de aumento foi pequena (ABO EL-NAGA; ELSIRAGY; RAGAD, 2020).

Para solos com característica de areias argilosas, Pachauri, Indu Priya e Garg (2019) concluíram que o teor de 0,75% de fibras de polipropileno foi mais eficaz para resistência à compressão, tornando-se uma alternativa para melhorar as propriedades destes solos. Akay et al. (2018) apontam que os teores que variam de 0,3 a 1,0% evitaram deslizamento em taludes que não eram reforçados, aumentando, deste modo, o fator de segurança das encostas.

Em solo com característica argilosa, Vakili et al. (2018) analisaram o uso de fibras de polipropileno em argilas dispersivas e concluíram que o teor de 1,4% reduziu o potencial de dispersão em 55%, trazendo as amostras inicialmente dispersivas para a categoria de dispersividade média. Para atingir o objetivo de caracterização como solo não disperso, foi utilizada uma combinação de 2% de lignossulfonato (polímero) e 0,35% de fibras de polipropileno, reduzindo o potencial de dispersividade em 76%.

Gong et al. (2019) verificaram que o teor de fibra de polipropileno no solo em 0,3%, e comprimento de 9 mm foi o que apresentou o melhor efeito no teste de cisalhamento direto e tem potencial para ser utilizado no melhoramento do solo de encostas argilosas.

Para um solo silte argiloso, Kurugodu et al. (2018) analisaram 0,5% a 1,0% de teores de fibras de polipropileno. Os autores concluíram que o teor ótimo foi de 0,7%, acima dessa porcentagem, a resistência começa a diminuir e teores acima de 0,9% começam a enfraquecer a resistência do solo. Yuan et al. (2021) concluem que as fibras de polipropileno podem melhorar a estabilidade e integridade deste tipo de solo.

## **2.5 Caracterização dos materiais**

As propriedades físicas do solo são parâmetros que ajudam a identificar a natureza do solo, sendo fundamentais para compreender melhor as propriedades mecânicas dos materiais que são de grande relevância na engenharia. Geralmente, os ensaios são executados seguindo as recomendações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Com a metodologia MCT, é possível classificar os solos quanto ao comportamento laterítico ou saprolítico, como também fornecer dados para a avaliação das propriedades mecânicas de solos com característica do clima tropical úmido (BURGOS; CONCIANI, 2015). O solo mais

comum no País é o laterítico e, muitas vezes, é estabilizado para formar a base e a sub-base do pavimento (LIMA et al., 2022). Estes solos são constituídos basicamente por quartzo, alumínio e óxidos de ferro (NOGAMI E VILLIBOR, 1995; TEIXEIRA et al., 2000).

A mineralogia impacta nas propriedades físicas, químicas, tamanho e forma dos grãos do solo, ajudando a compreender o comportamento do solo quanto à plasticidade, expansibilidade e resistência do material (MACEDO, 2013). A técnica DRX é aplicada diretamente para determinar e caracterizar a estrutura cristalina presente em uma amostra, onde um feixe de raios X de comprimento de onda conhecido incide sobre a amostra e é difratado pelos átomos existentes (AYLLON; TORRECILHA; SILVA, 2022).

A análise química auxilia a identificar o processo geológico da formação de um material. A análise dos teores de sais presentes no solo classifica quanto à dispersividade deste material, afetando a sua estabilidade estrutural. Para Jesus e Borges (2020), a presença do sódio em um solo afeta a estabilidade estrutural do mesmo.

Outro fator importante é conhecer a formação dos óxidos, pois, através destes, pode-se concluir a geologia do material analisado. A fluorescência de raios X (FRX) é um método qualitativo-quantitativo que utiliza energia dispersiva para determinar a composição química de rochas e a presença estimada de elementos através da intensidade dos raios X emitidos pelos elementos presentes na amostra (PACHECO, 2020). Com esta técnica, é possível quantificar a presença dos óxidos que compõem o material em análise, ajudando a identificar os minerais presentes no solo (NASCIMENTO, 2019).

Para estimar o potencial de erodibilidade, pode-se utilizar métodos diretos ou indiretos. O único método direto de laboratório é por meio do ensaio de Inderbitzen. Este ensaio simula, em laboratório, o efeito do escoamento superficial sobre o solo, quantificando a taxa de desagregação. Diversas pesquisas têm utilizado este aparelho para o estudo da erodibilidade do solo (THOMA et al., 2022; BEZERRA, 2022; BANDEIRA et al., 2021; SOARES et al., 2018; MEIRA, 2008; LAFAYETE, 2006; BASTOS, 1999).

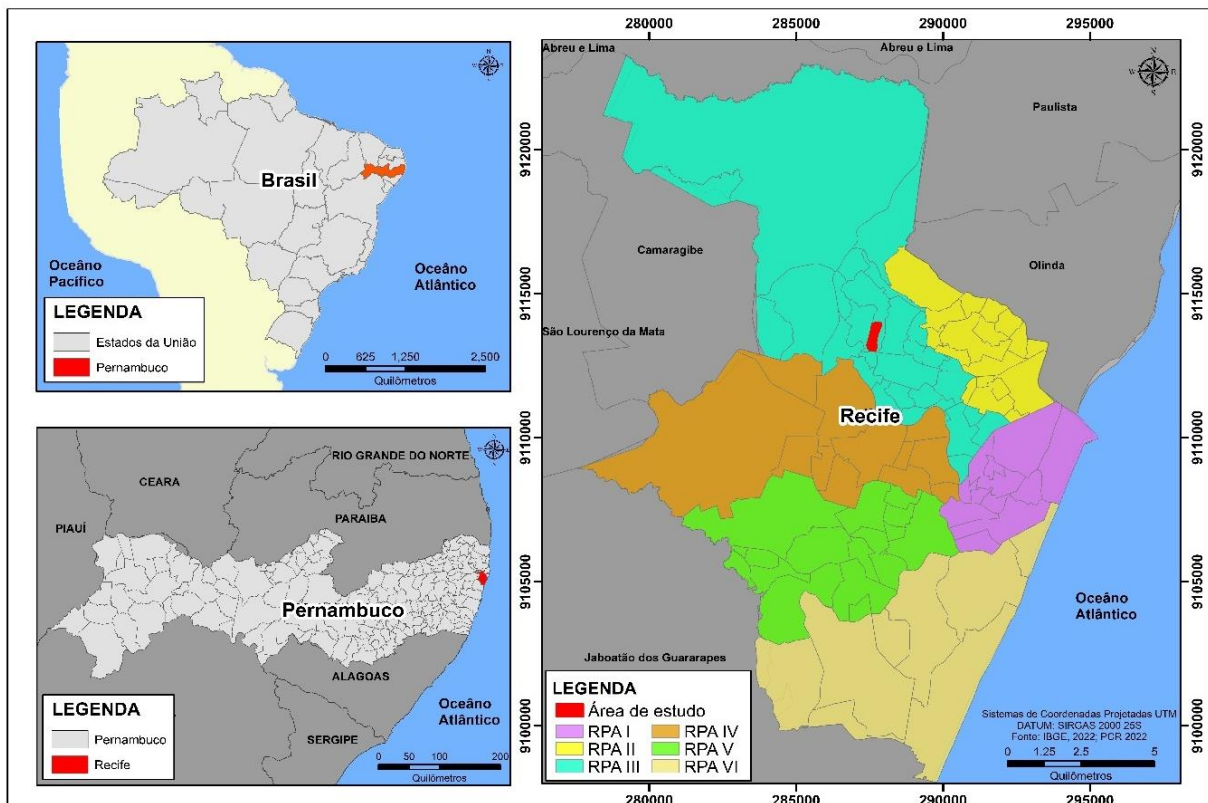
### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo são fornecidas informações da região situada a área de estudo, referente a localização, aspectos socioeconômicos, vegetação, clima, relevo, solo, geologia e hidrologia. Desta maneira, é possível compreender melhor a dinâmica da região e verificar como os taludes afetam o cotidiano dos habitantes.

#### 3.1 Localização da área de estudo

A área de estudo está situada no município do Recife-PE (Figura 8), com área aproximada de 29 ha, localizada na Região Político Administrativa (RPA) III, na rua Alto do olho d'água, no bairro da Macaxeira, divisa com o bairro de Nova Descoberta, com coordenadas de latitude  $8^{\circ}00'58,0''$  S e longitude  $34^{\circ}55'36,9''$  W.

Figura 8 - Mapa da localização da área de estudo



Fonte: Autor.

O município do Recife, capital do estado de Pernambuco, está localizado no Nordeste do Brasil, ocupando uma área territorial de 218.843 km<sup>2</sup> e uma população próxima de 1.661.017 hab

(IBGE, 2021). O ponto zero se encontra a  $8^{\circ}03'47,4''$  de latitude S e  $34^{\circ}52'16,1''$  de longitude W, limitado, a norte, pelo município de Paulista; a sul, pelo município de Jaboatão dos Guararapes; a oeste, pelos municípios de Camaragibe e São Lourenço da Mata; a noroeste, com o município de Abreu e Lima; a nordeste, com o Município de Olinda; e, a leste, com o Oceano Atlântico. Do ponto de vista administrativo, Recife é dividido em seis regiões administrativas (RPA's I, II, III, IV, V e VI), e composto por 94 bairros (PCR, 2021a).

Segundo o Plano diretor da cidade do Recife (2021), a área territorial da cidade é composta de muitas encostas e, atualmente, identifica-se cerca de 10.000 pontos de risco nas áreas de morros da cidade do Recife, com maior incidência nos bairros de Casa Amarela e Ibura, localizados nas zonas norte e sul, respectivamente.

O relatório do Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR) do Recife, elaborado no ano de 2006 (RECIFE, 2006), indicou, na época, que o talude em estudo (Figura 9) é enquadrado como de grau de risco 3, ou seja, a área apresenta alto potencial de desenvolvimento de deslizamentos e erosões. Na Figura 9, também é possível visualizar a declividade acentuada da área em estudo.

Figura 9 - Visão geral da área em estudo (maio/2022)



Fonte: Autor



### **3.2 Aspectos socioeconômicos do município**

Recife é um dos principais centros urbanos do Nordeste e sua economia é dominada por indústrias terciárias, incluindo serviços, comércio e administração pública. A cidade também concentra uma parcela importante do setor da construção civil e da indústria de transformação (PCR, 2021b).

O dado mais atual traz que o salário médio mensal do Recife, em 2020, é de 3,2 salários mínimos (R\$ 4224,00 em valores atuais), com cerca de 38,1% da população com renda de até meio salário mínimo (R\$ 660,00 em valores atuais). Em termos de saúde, a taxa de mortalidade infantil foi de 11,2 por 1.000 nascidos, diminuindo, significativamente, ao longo do tempo. Geograficamente, 69,2% dos domicílios possuem sistema de tratamento de esgoto adequado, 60,5% dos domicílios urbanos possuem vias públicas arborizadas e 49,6% dos domicílios urbanos com vias públicas possuem urbanização adequada (IBGE, 2021).

Outro fator importante é que, entre 2000 e 2010, os índices que mais cresceram na cidade foram da educação, da longevidade e da renda. Neste mesmo período, a proporção de alunos do ensino fundamental que frequentaram a escola aumentou 46,88%, assim como a proporção de jovens que concluíram o ensino médio (PCR, 2021).

O bairro da Macaxeira está localizado no município do Recife, integrado à Região Político Administrativa 3 (RPA 3), na microrregião 3.3, com uma distância do marco zero igual a 8,76 km. Possui uma área equivalente a 125 hectares, com população residente correspondente a 20.313 habitantes, obtendo uma densidade demográfica de 162,25 hab/hec e cerca de 5807 domicílios cadastrados, com uma média de 3,5 habitantes e rendimento nominal médio mensal igual a R\$ 1387,01 por domicílio (PCR, 2022).

### **3.3 Aspectos fisiográficos do município**

Segundo Portela (2019), estes aspectos fisiográficos ajudam a entender o comportamento dos solos, com isso, é necessário caracterizar a região quanto à vegetação, clima, relevo, solo, geologia e hidrologia, entendendo a formação do solo da região.

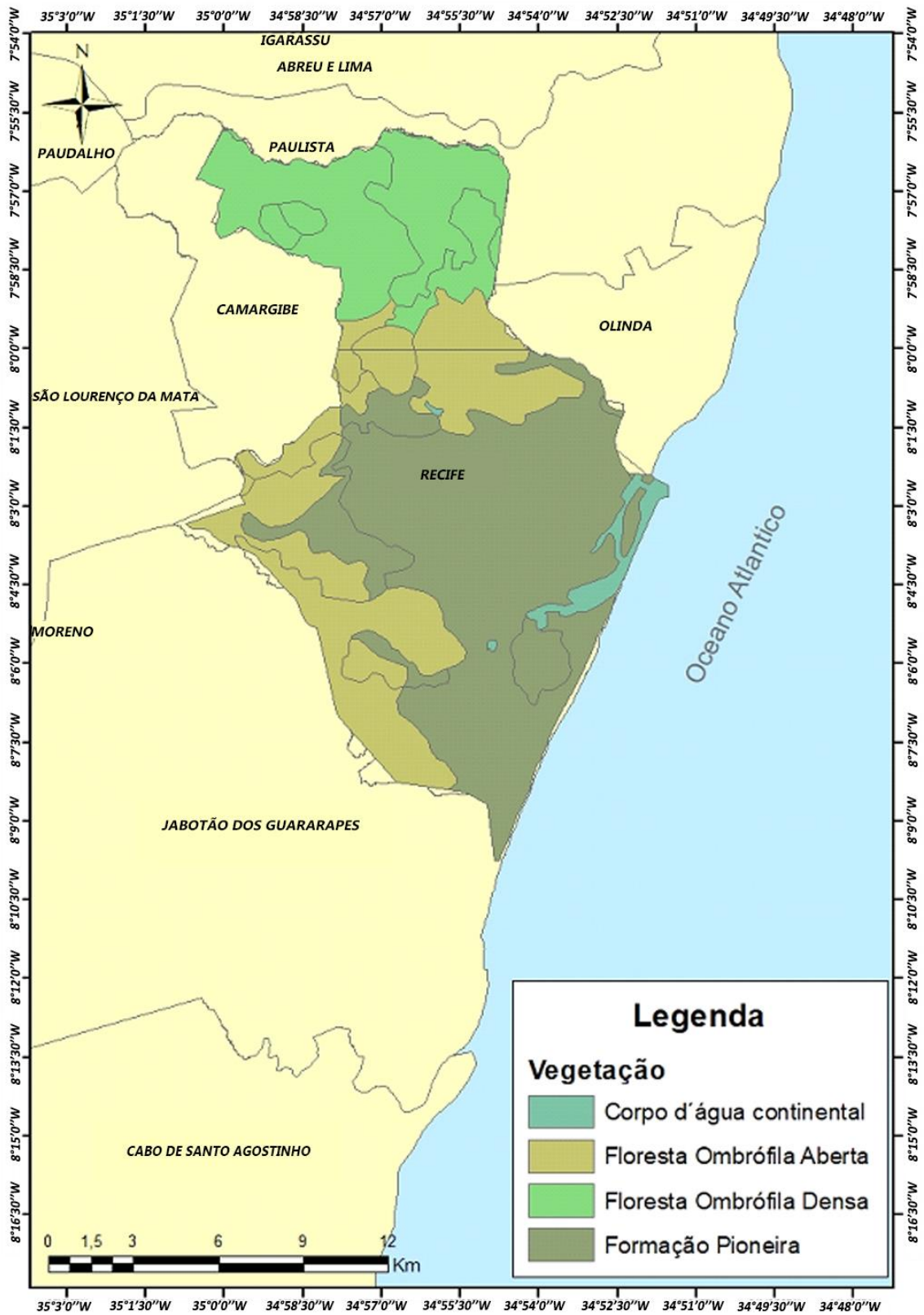
### ***3.3.1 Vegetação***

A vegetação da cidade do Recife é composta, no geral, por Mata Atlântica, Campos de Várzea, Restinga e Mangues, que foram severamente danificadas devido a aterros e extração ilegal de madeira. Os mangues representam um ecossistema de grande importância ecológica e ambiental, é uma das áreas mais produtivas para trazer matéria orgânica para áreas estuarinas, e é fonte de renda para grande parte da população (BARBOSA, 2010).

Áreas pertencentes à Mata Atlântica têm sido, gradativamente, ocupadas, transformadas e, em alguns lugares, protegidas. Portanto, três tipos de áreas apresentam maior dominância nas cidades: áreas de proteção vegetal; áreas com pouca vegetação, resultado de grandes ocupações; e pequenas manchas isoladas de vegetação ocupando espaços urbanos (PCR, 2012).

A Política Ambiental da Cidade do Recife propõe um conjunto de diretrizes e ferramentas voltadas à proteção da paisagem ambiental. O Parque Natural Urbano do Manguezal é uma das unidades de conservação do Recife e fica localizado na zona sul da cidade. A Mata da Várzea e a Reserva Ecológica Dois Unidos são compostas pela vegetação da Mata Atlântica, cobrindo mais de 50 hectares (PCR, 2012). Na Figura 10, é possível verificar o mapa de distribuição das principais vegetações que compõem a cidade do Recife/PE.

Figura 10 - Mapa da vegetação da cidade do Recife-PE



Fonte: Almeida (2021); Adaptado do IBGE (2020).

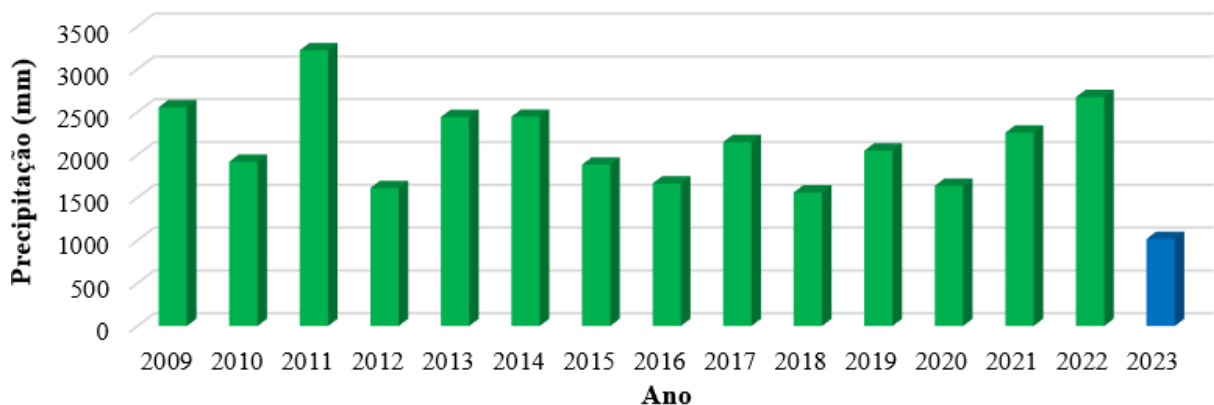
### 3.3.2 Clima

A RMR possui um clima costeiro úmido, influenciado por massas marinhas tropicais, com temperaturas estáveis ao longo do ano, com amplitude térmica máxima anual de 5°C e temperatura média anual de 25,4°C. Esta condição térmica se deve a sua localização nos trópicos, ou seja, na região de maior incidência solar da Terra. O clima é um reflexo da circulação atmosférica, influenciada pela massa tropical atlântica, que é uma massa tropical quente e úmida (GIRÃO; CORRÊA; GUERRA, 2006).

O índice pluviométrico se concentra entre os meses de abril e julho, podendo ter uma precipitação média mensal de 500 mm, como em maio de 2021 (APAC, 2022). No período de setembro-março, embora as chuvas apresentem baixo índice pluviométrico, ocorrem eventos intensos e concentrados, apesar de intermitentes. Portanto, o clima pode ser entendido como um verão tropical chuvoso e seco, em que as chuvas afetam os processos erosivos, promovendo o transporte de materiais (PORTELA, 2019).

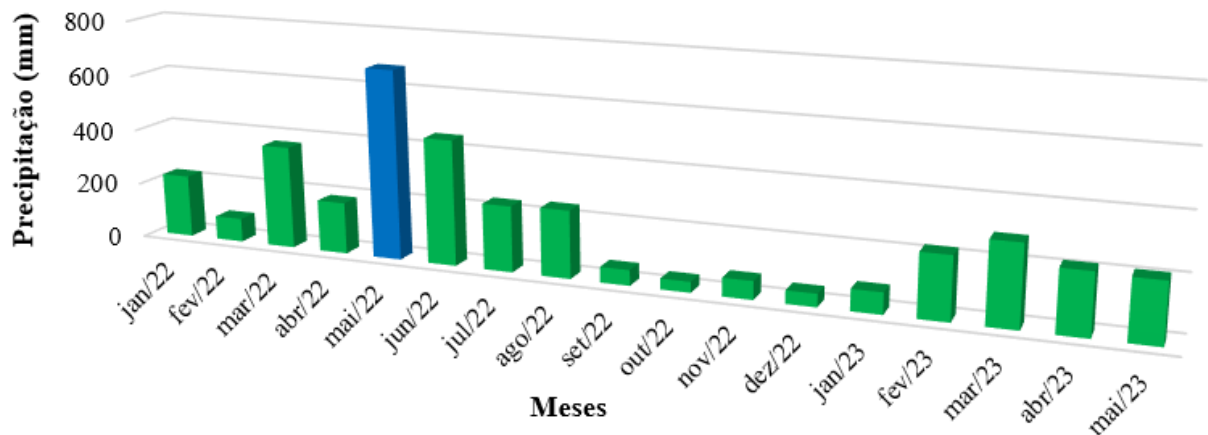
A Figura 11 mostra a precipitação média anual no município do Recife, referente aos anos de 2009 a 2023, destaque para o ano de 2011, que ultrapassa 3200 mm de precipitação no ano. Nota-se que o ano de 2022 apresentou a segunda maior precipitação anual deste período e que, no primeiro quadrimestre de 2023, já captou 1017 mm. A Figura 12 apresenta a precipitação mensal de janeiro a dezembro de 2022 e de janeiro a maio de 2023, onde se percebe que as chuvas ocorridas entre março e agosto de 2022 contribuem para o risco de deslizamentos.

Figura 11 - Precipitações médias anuais do Recife de 2009 a 2023 (Posto da Várzea)



Fonte: Elaborado pelo autor com dados da APAC (2023).

Figura 12 - Precipitações mensais de 2022 e 2023 do Recife (Alto da Brasileira)



Fonte: Elaborado pelo autor com dados dos Relatórios da APAC (2023).

A Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2022) registrou um volume de 679,1 mm em maio de 2022 (destaque em azul) na cidade do Recife. Devido a esses eventos extremos de chuvas, ocorreram diversos deslizamentos de terra e inundações em toda a Região Metropolitana do Recife, resultando em 128 mortes e mais de 9 mil pessoas desabrigadas, além de diversos problemas socioeconômicos, tornando-se o segundo maior desastre já registrado no estado (GLOBO, 2022).

### 3.3.3 Relevô

Recife é formado por uma planície que faz parte da bacia sedimentar costeira dos estados de Pernambuco e Paraíba. Ao norte, a cidade é limitada pelo morros da Formação Barreiras, pelo afloramento da Formação Gramame e pela planície Flúvio-lagunar. Ao sul, a cidade se limita, principalmente, por sedimentos aluviais e, também, pela Formação Barreiras. A leste, está limitada pelo Oceano Atlântico e, a oeste, é constituída pelo planalto Litorâneo Rebaixado e afloramentos da Formação Barreiras (SOUZA, 2013).

A Planície Fluvial é formada por transporte e deposição de sedimentos em ambientes aluvionares, causados por processos erosivos (SOUZA et al., 2017). Nos manguezais, registra-se a ocorrência de sedimentos com textura sílico-argilosa com matéria orgânica e, nas planícies de inundação, sedimentos aluviais de diferentes granulometrias, formados a partir de areias, siltes e argilas (SOUZA, 2013).

A planície costeira engloba grande parte da área do estado de Pernambuco e inclui uma série de ambientes sedimentares fluviomarinheiros, onde o padrão topográfico é marcado por extensas florestas de mangue, praias arenosas e terraços marinhos e recifes de arenito, que caracterizam o litoral pernambucano (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014; SOUZA et al., 2017).

A comunidade da Macaxeira é caracterizada por tabuleiros costeiros dissecados ao norte (ALHEIROS, 1998) e área de planície flúvio-oceânica ao sul, que é vulnerável às inundações ocasionadas pelo Rio Capibaribe (CPRM, 2013). O tabuleiro costeiro se caracteriza por uma altitude média que varia entre 50 e 100 metros. Os Tabuleiros ao longo da costa nordestina incluem planaltos de origem sedimentar, ora com vales estreitos e declives acentuados, ora com declives suaves abertos e fundo com amplas várzeas (EMBRAPA, 2014).

### **3.3.4 Solo**

Conforme mostra a Figura 13, a cidade é marcada pela presença de Gleissolos, Argissolo Amarelo e Latossolo. Os gleissolos são hidromórficos originados dos sedimentos arenosos (BANDEIRA, 2010). Os solos desta classe se encontram permanente ou periodicamente saturados por água, podendo se elevar por ascensão capilar, atingindo a superfície (Santos et al., 2018).

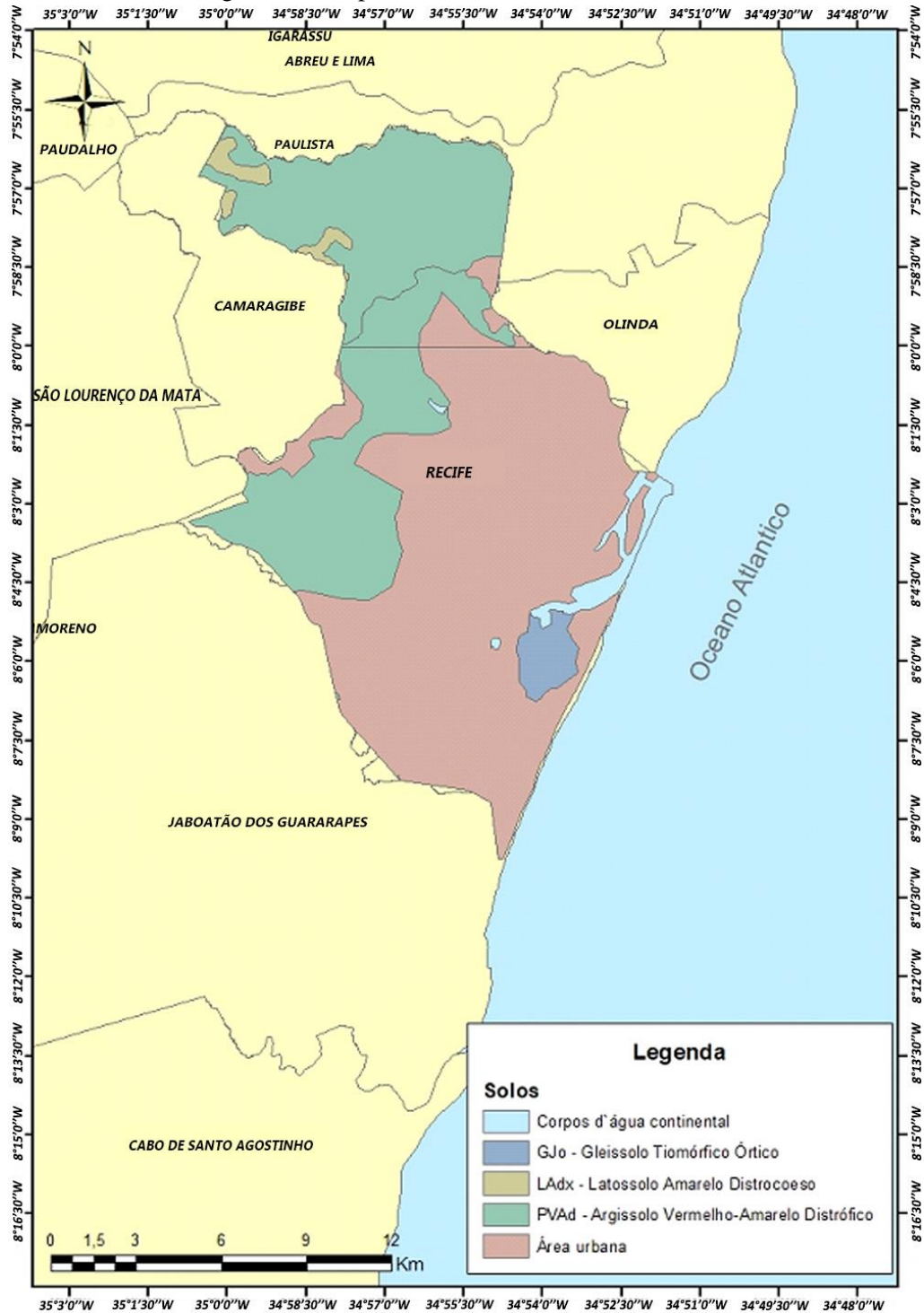
Os Argissolos são uma classe de solos que variam em suas características físicas, químicas e mineralógicas e são formados por argilas de baixa atividade e por minerais não hidromórfico (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014; BANDEIRA, 2010). Em geral, são suscetíveis aos processos erosivos, apresentam elevados teores de alumínio, acidez moderada e baixa fertilidade (SILVA, 2014). São encontrados em paisagens de relevos mais acidentados e dissecados, com superfícies menos suaves (JATOBÁ; SILVA, 2022).

Os Latossolos são solos de baixa fertilidade e formados por óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio (JATOBÁ; SILVA, 2022). Para Silva (2014), estes solos não são tão frágeis a erosões, devido à boa porosidade, permeabilidade e flocculação adequadas. Os latossolo apresentam solos minerais não hidromórficos, porém possuem um elevado teor de intemperismo (BANDEIRA, 2010).

A parte norte da comunidade do bairro da Macaxeira é caracterizada pela presença de sedimentos miocénicos da Formação Barreiras, apresentando, na parte inferior, camadas mais

arenosas e, na parte superior, camadas intercaladas de areia e argila, provenientes de depósitos fluviais (SANTANA, 2019). Ao sul, existem sedimentos fluviais lagunares ricos em argila orgânicas, areia e silte (CPRM, 2013).

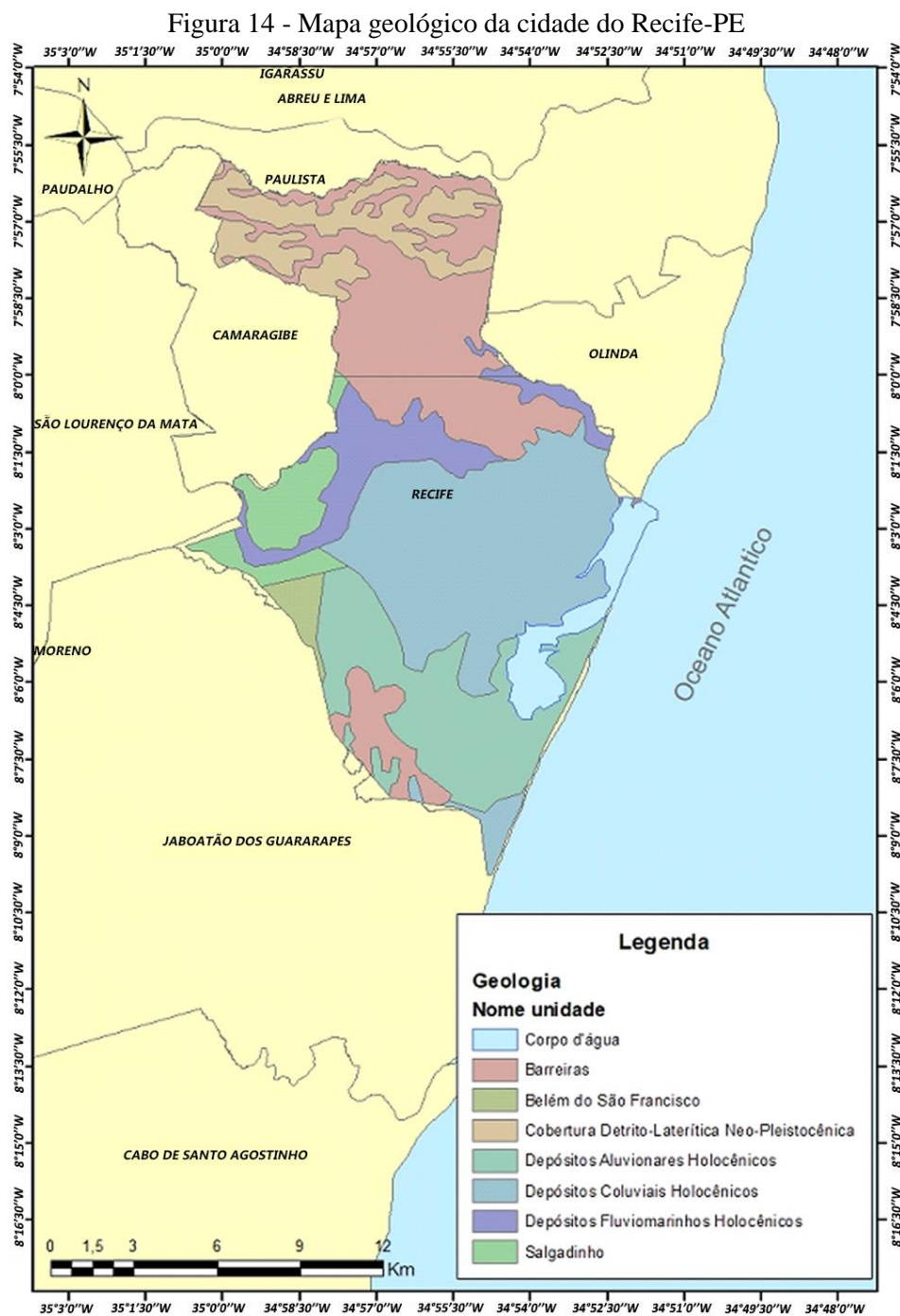
Figura 13 - Mapa de solos da cidade do Recife-PE



Fonte: Almeida (2021); Adaptado do IBGE (2020).

### 3.3.5 Geologia

As feições geológicas da Planície do Recife são, principalmente, o embasamento cristalino pré-cambriano, os sedimentos da bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba, os sedimentos quaternários e os sedimentos terciários da Formação Barreiras. A Bacia Pernambuco-Paraíba localiza-se na zona marginal atlântica e retrata sedimentos mesozóicos (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014). A Figura 14 mostra os aspectos geológicos da cidade do Recife/PE.



Fonte: Almeida (2021); Adaptado do IBGE (2020).



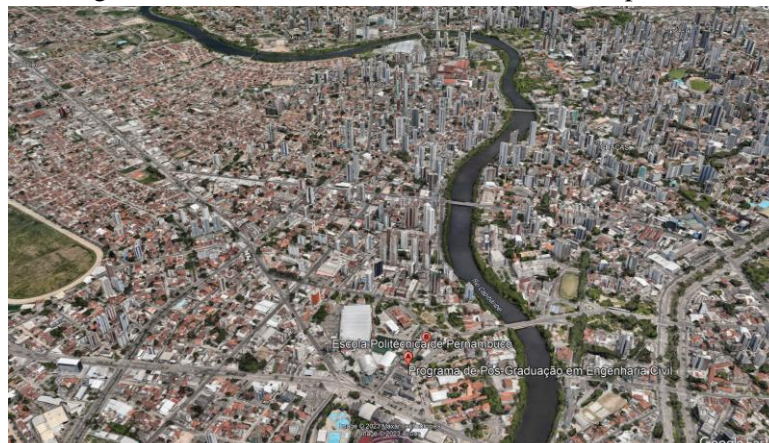
A bacia sedimentar da Paraíba está localizada no norte do estado de Pernambuco, passando pela cidade do Recife, ao norte de João Pessoa/PB, sobre rochas pré-cambrianas, com sedimentos dispostos em camadas sub-horizontais. A Bacia de Pernambuco corresponde às feições geológicas criadas durante o processo tectônico, que levou à fragmentação dos continentes da América do Sul e África, também assentados em rochas pré-cambrianas, contendo dois grandes grupos definidos por rochas sedimentares e sedimentos soltos (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

### 3.3.6 Hidrografia

O cenário hidrológico do Recife é composto por quatro bacias hidrográficas, ao norte, localiza-se o alto e o médio curso da bacia do Rio Beberibe, a nordeste, são encontradas cabeceiras de drenagem pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Morno, afluente do Rio Capibaribe, porém a maior parte da região está inserida na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, em seu baixo curso (SANTANA, 2020).

O Rio Capibaribe (Figura 15) possui as nascentes no Planalto da Borborema, entre os municípios de Poção e Jataúba. Atualmente, a drenagem da área é composta de alguns canais urbanos, que substituíram pequenos córregos naturais de drenagem. Próximo à Região Metropolitana do Recife, o rio passa por vários centros urbanos, serve como recipiente de resíduos industriais e domésticos e se apresenta padrão de canal meandrante, por alcançar cotas altimétricas menores. O canal também pode se apresentar de forma retilínea quando está sob o controle estrutural de falhas e fraturas (GONÇALVES, 2018).

Figura 15 - Vista aérea de um trecho do Rio Capibaribe



Fonte: Google Earth (2023).

#### 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, foram abordadas as técnicas utilizadas para o desenvolvimento dessa pesquisa. De início, foi feita uma análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo na área em estudo. Em seguida, foram descritos os procedimentos para coleta dos materiais e as etapas do programa experimental, análise de estatística, análise de erodibilidade e análise de estabilidade de um talude.

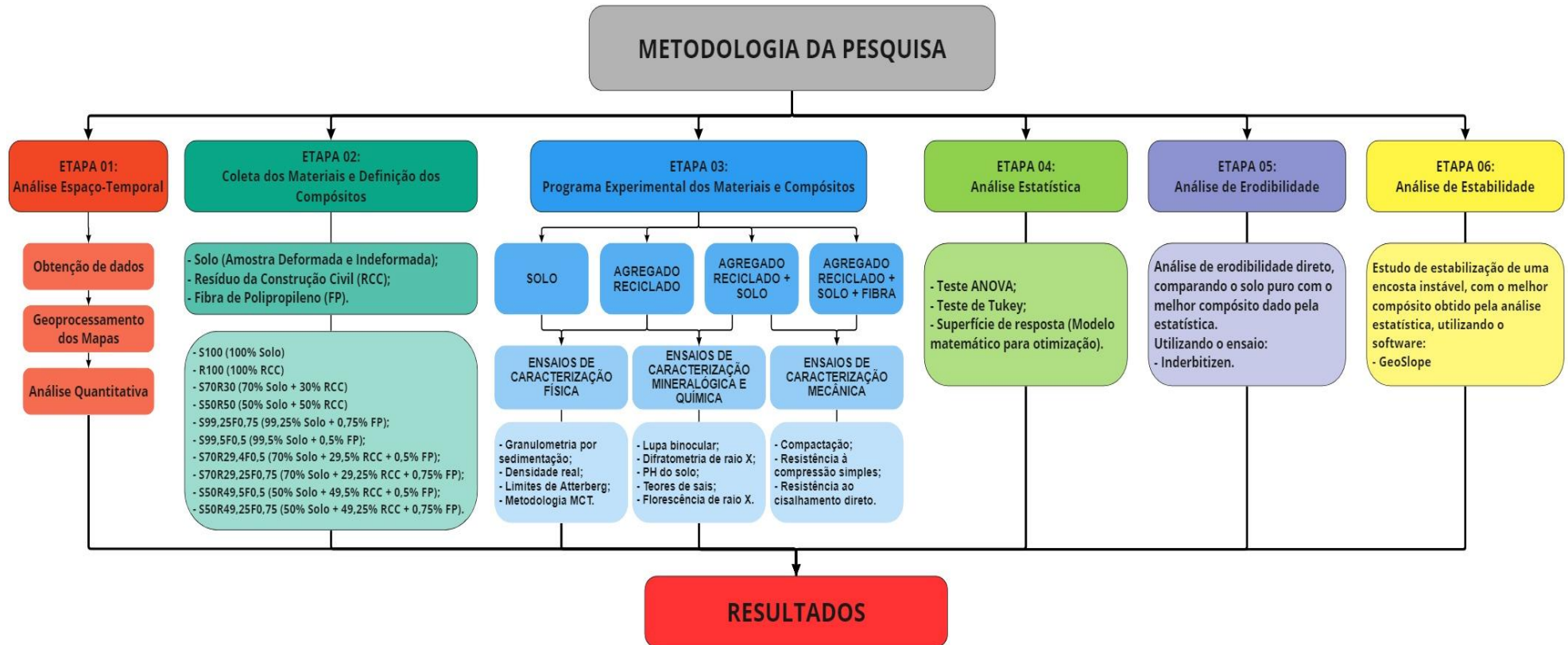
Para o programa experimental, foram realizados diversos ensaios para a análise física, química, mineralógica e mecânica dos materiais e compósitos. A Tabela 2 apresenta a metodologia adotada e a quantificação dos ensaios. Esta etapa foi desenvolvida com apoio dos laboratórios de: Mecânica dos Solos, Pavimentação, Estruturas, Química, Central Analítica, Microscopia (Universidade Federal do Cariri – Juazeiro do Norte e Crato) e Química (Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru). As demais etapas são apresentadas no fluxograma (Figura 16).

Tabela 2 - Metodologia adotada para caracterização das amostras

CARACTERIZAÇÃO	ENSAIOS	QUANT. (UN)	MATERIAL ANALISADO
Física	Análise Granulométrica	4	Solo; RCC; e Solo+RCC.
	Densidade Real	4	
	Limites de Atersberg	4	
	Metodologia MCT	20	
Química	pH	4	
	Teor de Sais	4	
	Fluorescência de Raios X (ERX)	4	
Mineralógica	Lupa Binocular	2	
	Difratometria de Raios X (DRX)	2	
Mecânica	Cisalhamento Direto (Amostra Indeformada)	8	
	Cisalhamento Direto (Amostra Compactada)	8	Solo+RCC+Fibra
	Compactação Proctor Normal	50	Solo; RCC; Solo+RCC; e Solo+RCC+Fibra.
	Compressão Simples	200	Solo+RCC+Fibra.
Erodibilidade	Inderbitzen - Amostra Compactada (Umidade ótima e inundada)	12	Solo; e Solo+RCC+Fibra.
<b>TOTAL DE ENSAIOS</b>		<b>326</b>	

Fonte: Autor.

Figura 16 - Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: Autor

## **4.1 Análise espaço-temporal**

A análise espaço-temporal é uma ferramenta viável para orientar a tomada de decisões na esfera pública, que se destacou por priorizar soluções eficazes para reverter a degradação ambiental em áreas propensas a deslizamentos (SANTOS et al., 2023; SANTOS et al., 2021). A geografia ambiental contribui para a compreensão do espaço, uso e cobertura do solo e as consequentes mudanças nas paisagens, resultantes dos homens, na natureza (FRANCH-PARDO et al., 2017). Portanto, a análise de uso e ocupação de uma área se configura como um estudo aplicado, com objetivos descritivos e uma abordagem quali-quantitativa dos impactos ambientais originados pela ação humana sobre a paisagem.

### ***4.1.1 Obtenção de dados***

Inicialmente, foi realizada uma visita na área de estudo, efetuando registros fotográficos para verificar alguns fatores, como a localização das obras, impermeabilização de áreas, níveis de eficiência dos sistemas de drenagens e das políticas públicas.

O polígono da área de estudo foi determinado após trabalho de campo e análise de imagens de satélite, agregando toda a área da encosta, perfazendo um total de, aproximadamente, 29 hectares (0,29 km<sup>2</sup>). Desta forma, a quantificação da tipologia da área em cada mapa coletado foi feito através da vetorização da poligonal, realizando um recorte espaço-temporal do crescimento urbano e da perda de vegetação nos últimos 47 anos (1974 a 2021).

### ***4.1.2 Elaboração dos mapas e classificação de áreas por tipo de uso e ocupação***

Foram coletadas as coordenadas geográficas do local e geradas as imagens de satélite georreferenciadas para os anos de 2014 e 2021, através do *software* Google Earth Pro Versão 7.3.2 (2021). Para os anos anteriores, foi realizada a consulta ao Órgão Nacional de Pesquisa e Planejamento de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM), que disponibilizou as ortofotocartas dos anos 1974, 1984 e 1997. Para o ano de 2004, foi utilizada a imagem do satélite Landsat 7, sensor ETM+ (Aquisição: 26/11/2004), possuindo pixel com dimensão 4x4 metros.

Em seguida, utilizando o *software* ArcGis 10.7.1, as imagens de satélite e as ortofotocartas foram georreferenciadas, em uma escala de 1:10.000, e gerados seis mapas. Também, com o

auxílio do *software* ArcGIS 10.7.1, foram identificadas as tipologias de uso e ocupação do solo dos mapas, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Tipologia do uso e ocupação do solo

TIPOLOGIA	DESCRIÇÃO
Mancha Urbana	Área determinada pela impermeabilização do solo através de intervenção antrópica: área construída e trânsito de pedestres.
Vegetação	Áreas com copas de árvores e/ou florestadas, gramados e vegetações rasteiras.
Solo Exposto	Áreas sem vegetação, podendo ser o resultado de queimadas e/ou processos erosivos.
Sistema Viário	Área de trânsito veicular.

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2020).

Utilizando o *software* Surfer 16, foram obtidos o modelo digital do terreno e o modelo digital de elevação. Para análise complementar, utilizando o ArcGIS 10.7.1 foi gerado um mapa de declividade da área de estudo, sendo a área de cada faixa de declividade calculada para verificar a vulnerabilidade potencial do talude, seguindo os parâmetros adotados por Ross (1994), conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Fragilidade das faixas de declividade

FAIXAS DE DECLIVIDADE	CLASSES DE FRAGILIDADE
< 6%	Muito Baixo
6 - 12 %	Baixo
12 - 20 %	Médio
20 - 30 %	Alto
> 30 %	Muito Alto

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

#### 4.1.3 Análise quantitativa dos dados obtidos

A partir dos polinômios gerados no processo de vetorização dos mapas, foi possível quantificar as áreas de ocupação de cada tipologia da análise temporal e, posteriormente, quantificou-se a taxa de ocupação, através da Equação 1.

$$T_{Ac}(\%) = \frac{A_c}{A_t} * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$T_{Ac}$  - Percentual da área de ocupação da tipologia (%);  
 $A_c$  - Área e ocupação da tipologia (ha); e  
 $A_t$  - Área total da região estudada (ha).

Posteriormente, foi realizado o cálculo da taxa de variação, através da Equação 2. Ressalta-se que os resultados com sinal negativo (-) representam redução da área; e, com sinal positivo (+), representam o aumento da área.

$$T_V(\%) = T_{Ac1}(\%) - T_{Ac2}(\%) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$T_V$  - Diferença entre as taxas de ocupação da tipologia entre anos (%);  
 $T_{Ac1}$  - Taxa de ocupação da tipologia do mapa de maior ano (%); e  
 $T_{Ac2}$  - Taxa de ocupação da tipologia do mapa de menor ano (%).

## 4.2 Coleta dos materiais e definição dos compósitos

Para a realização dos ensaios geotécnicos, foram coletadas amostras deformadas do solo e do RCC e amostras indeformadas do solo. As amostras deformadas possibilitam o conhecimento das características básicas (análise granulométrica, densidade real dos grãos, limite de plasticidade, limite de liquidez e compactação). As amostras indeformadas são utilizadas para ensaios de resistência ao cisalhamento direto, importante para o entendimento do mecanismo dos processos atuantes.

### 4.2.1 Coleta do solo

O local escolhido para fazer a coleta de amostras deformadas do solo foi determinado pelo acesso mais fácil, visto que a encosta apresenta locais de difíceis passagens. Em novembro/2021, foram coletados, aproximadamente, 250 kg de material, que apresentava uma característica granulométrica fina e sem torrões, conforme mostrado na Figura 17.

Este material foi armazenado em saco, transportando para o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco - UPE/POLI. Devido às restrições geradas pela pandemia da COVID 19, o LACC não estava em pleno funcionamento para realização de ensaios, sendo necessária a realização dos ensaios no Laboratório de Geotecnia (LABGEO) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) – *Campus Juazeiro do Norte*.

Figura 17 - Amostra deformada: Coleta (A); e Armazenamento (B)



Fonte: Autor.

Em maio/2022, foram coletadas amostras indeformadas, do mesmo local em que foi coletado o solo deformado. A norma NBR 9604 (ABNT, 2016) sugere que as amostras sejam retiradas no formato cúbico, com arestas medindo entre 0,15 m e 0,40 m. Contudo, a Defesa Civil do Estado de Pernambuco não autorizou a retirada de blocos, devido ao agravamento do risco na área.

Desta maneira, foram retirados 11 blocos cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 18). Após moldados, foram revestidos por camadas de plástico filme, e, em seguida, cobertos por camadas de papel alumínio e mantidos em caixa de isopor. As amostras foram enviadas para o Laboratório de Solo e Instrumentação (LSI) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – *Campus Recife*.

Figura 18 - Amostra indeformada - Coleta (A); e Proteção do bloco (B)



Fonte: Autor.

#### **4.2.2 Coleta do RCC**

Foram coletados, aproximadamente, 150 kg de resíduos da construção civil (RCC), em novembro/2021, e que foram cedidos pela empresa Ciclo Ambiental, localizada no município Camaragibe, Região Metropolitana do Recife – PE, que tem, como atividade, a reciclagem destes resíduos (Figura 19). O RCC foi transportado para o LACC- UPE/POLI, em seguida, foi transferido para o LABGEO - UFCA – *Campus Juazeiro do Norte*.

Figura 19 - RCC coletado para desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autor.

#### **4.2.3 Fibra de polipropileno**

A fibra de polipropileno (Figura 20) foi doada em abril/2022 pela empresa Polimix Concreto LTDA., localizada no município de Barbalha-CE. A fibra foi fabricada pela empresa ETRURIA Indústria e Comércio LTDA., que forneceu as especificações técnicas, conforme Quadro 4. As proporções utilizadas para o desenvolvimento do trabalho foram 0,5% e 0,75% da massa seca da mistura.



Figura 20 - Fibra de polipropileno



Fonte: Autor

Quadro 4 - Especificações técnicas da fibra de polipropileno

<b>Composição:</b>	100% Polipropileno
<b>Comprimento (mm):</b>	10 a 12
<b>Denier (g/den):</b>	2 a 3
<b>Tenacidade (g/d):</b>	Maior que 5,00
<b>Alongamento (%):</b>	20 – 40
<b>Umidade (%):</b>	10
<b>Dispersão:</b>	Boa Dispersão

Fonte: ETRURIA (2022).

Este tipo de fibra de polipropileno é considerado um filamento e tem uma densidade real, identificada por Denier, que é o peso da linha com comprimento de 9.000 metros (den). Com isso, o Denier da microfibras de polipropileno é de 2 a 3 g/den, o que significa que possui de 2 a 3 gramas em 9.000 metros linear. Possui um alongamento (deformação máxima até a ruptura) de 20% a 40%, sendo, considerado por Kuasne (2008), uma característica de excelente alongamento e elasticidade.

A tenacidade é definida como a tensão específica, ou seja, corresponde à razão da carga máxima por unidade de densidade linear pela curva tenacidade-alongamento que a fibra pode suportar antes de romper (GUIMARÃES, 2014). Essa resistência à ruptura é medida em g/d (gramas/denier) ou g/tex (gramas/tex) (SEDUC, 2012).

#### **4.2.4 Definição dos percentuais dos compósitos**

Santos et al. (2022) verificaram que, para solos com característica arenosa, os teores ideais de fibra são 0,5% e 0,75%. Para o RCC, Nascimento (2019) concluiu que os melhores resultados

foram alcançados pelas misturas de S50R50 (50% solo + 50% RCC) e S70R30 (70% solo + 30% RCC). Para esta pesquisa, foram analisados corpos de prova com diferentes misturas, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Identificação dos compósitos

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>COMPÓSITO</b>
S100	Solo (100%)
R100	RCC (100%)
S70R30	Solo (70%) + RCC (30%)
S50R50	Solo (50%) + RCC (50%)
S99,5F0,5	Solo (99,5%) + Fibra de Polipropileno (0,5%)
S99,25F0,75	Solo (99,25%) + Fibra de Polipropileno(0,75%)
S70R29,5F0,5	Solo (70%) + RCC (29,5%) + Fibra de Polipropileno (0,5%)
S70R29,25F0,75	Solo (70%) + RCC (29,25%) + Fibra de Polipropileno (0,75%)
S50R49,5F0,5	Solo (50%) + RCC (49,5%) + Fibra de Polipropileno (0,5%)
S50R49,25F0,75	Solo (50%) + RCC (49,25%) + Fibra de Polipropileno (0,75%)

Fonte: Autor.

Os materiais e compósitos foram submetidos a ensaios de caracterização física, mineralógica, química e mecânica, pois, segundo Mascarenha et al. (2015), existem fatores que influenciam a suscetibilidade à erosão e resistência de um material, como a textura, estruturação do solo, estabilidade dos agregados, teor de matéria orgânica, mineralogia, constituição química, permeabilidade, compactação etc.

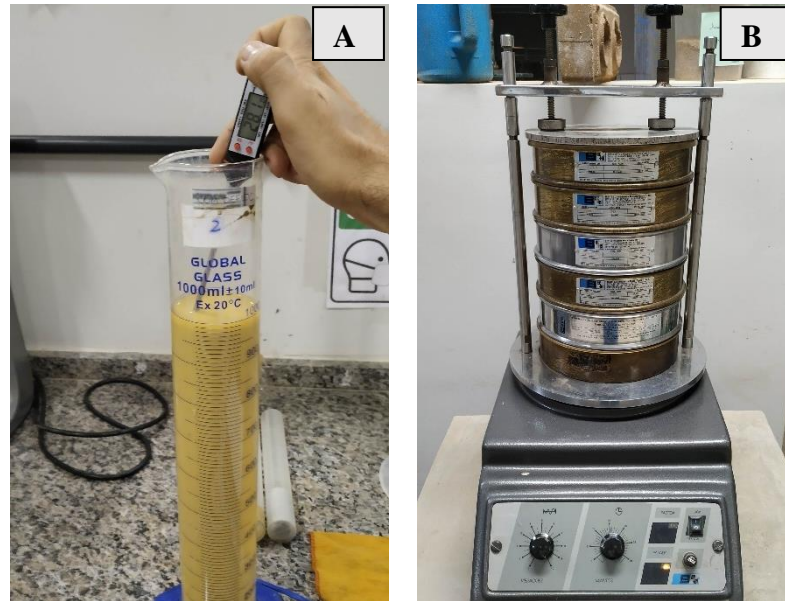
### **4.3 Ensaios de caracterização física**

Os experimentos foram realizados em amostras deformadas, nos laboratórios de Geotecnia (LABGEO) e de Pavimentação da Universidade Federal do Cariri (UFCA) – *Campus Juazeiro do Norte*.

#### **4.3.1 Ensaio de granulometria**

A determinação da granulometria (Figura 21) do solo, do agregado reciclado e dos compósitos foi realizada conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2018). Os resultados obtidos foram classificados de acordo com Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Figura 21 - Ensaio de análise granulométrica: Sedimentação (A); e Peneiramento (B)



Fonte: Autor.

#### 4.3.2 Ensaio de densidade real dos grãos

Os procedimentos adotados para determinação da densidade real do solo, RCC e composições estão de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). O método empregado para a realização deste ensaio foi o do picnômetro e bomba a vácuo (Figura 22).

Figura 22 - Ensaio de densidade real dos grãos

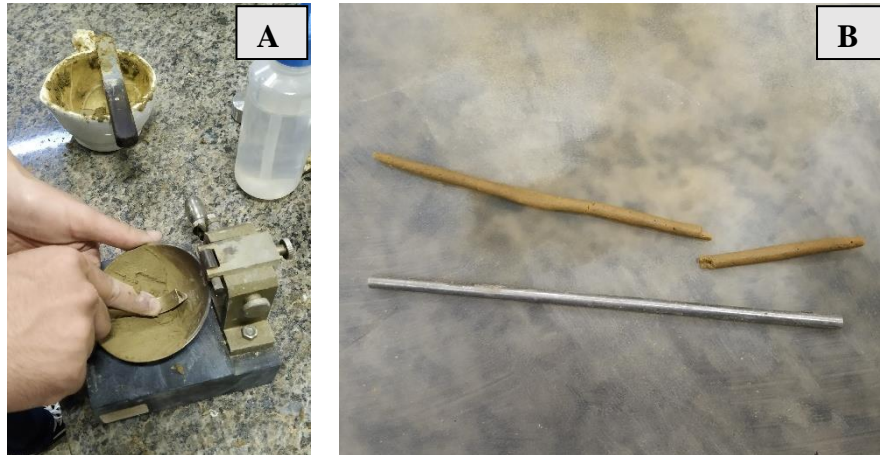


Fonte: Autor.

### 4.3.3 Ensaio dos limites de Atterberg

Os limites de Atterberg (Figura 23) dos materiais e compósitos foram determinados conforme as normas NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Com os resultados, foram calculados os índices de plasticidade e classificados segundo os parâmetros de IAEG (1979).

Figura 23 - Ensaio de limite de liquidez (A) e Limite de plasticidade (B)



Fonte: Autor.

### 4.3.4 Ensaio pela metodologia MCT

Com a metodologia MCT, é possível classificar os solos quanto ao comportamento laterítico ou saprolítico, como também fornecer dados para a avaliação das propriedades mecânicas de solos com característica do clima tropical úmido (BURGOS; CONCIANI, 2015). O solo mais comum no País é o laterítico e, muitas vezes, é estabilizado para formar a base e a sub-base do pavimento (LIMA et al., 2022). Estes solos são constituídos basicamente por quartzo, alumínio e óxidos de ferro (NOGAMI; VILLIBOR, 1995; TEIXEIRA et al., 2000).

Para determinação da caracterização do compósito referente ao comportamento laterítico, através da Metodologia MCT, os ensaios foram executados seguindo as normas do DNER-ME 258 (DNER, 1994) e DNER-ME-256 (DNER, 1994). Estes procedimentos foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Cariri (UFCA) – *campus* Juazeiro do Norte.

De início, do material passante na peneira de 2,0 mm, foram preparadas cinco amostras de solo, cada uma com 500 g. Em uma delas, foi adicionada uma quantidade de água até atingir a

umidade próxima da ótima de compactação, em duas delas, com umidade inferior e, nas outras duas, com umidade superior. Estas amostras foram colocadas em sacos plásticos e deixadas em repouso por 24 horas, com o intuito de homogeneizar e manter a umidade. Posteriormente, foi iniciada a compactação em miniatura (miniMCV).

Com este material, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e, aproximadamente, 5 cm de altura, efetuando-se um número sucessivo de golpes, medindo a compressão da amostra (Figura 24) e calculando a massa específica aparente máxima. Desta forma, obteve-se uma curva de compactação, onde o eixo da abscissa é o valor do teor de umidade e a ordenada é o valor da massa específica aparente seca máxima (MEAS).

Figura 24 - Ensaio de compactação MCV

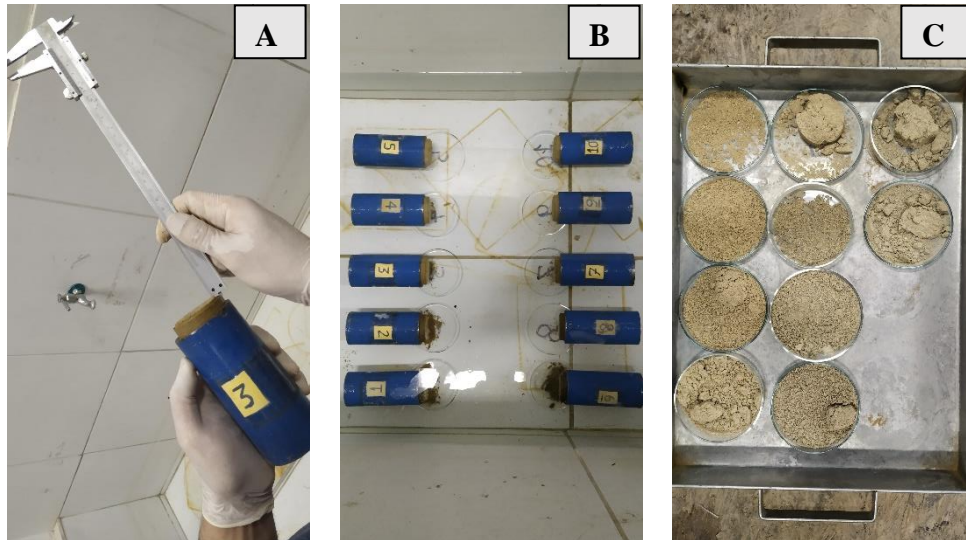


Fonte: Autor.

Segundo Paiva *et al.* (2019), os coeficientes  $d'$  e  $c'$  podem ser determinados a partir da curva de compactação MCV. O coeficiente  $d'$  é a inclinação do ramo seco correspondente a 12 golpes, enquanto o coeficiente  $c'$  é a inclinação correspondente à parte mais inclinada e reta da curva MiniMCV com a condição miniMCV igual a 10.

As amostras obtidas no teste MiniMCV foram parcialmente extraídas do molde até completar 10 mm e, posteriormente, foram imersas, horizontalmente, em água (Figura 25.A e B). A perda por imersão é dada pelo valor PI, que é obtido em porcentagem de massa desprendida para cada corpo de prova analisado (Equação 03). O Fator de Correção ( $F_c$ ) utilizado foi de 1 para desprendimento normal do solo e 0,5 para desprendimento em monobloco (Figura 25.C).

Figura 25 - Perda por imersão - Extração parcial (A); Imersão em água (B); e Material desprendido (C)



Fonte: Autor.

$$Pi = \frac{M_d * 100}{M_u} * F_c \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$Pi$  - perda de massa por imersão (%);

$M_d$  - Massa de solo seco da porção desprendida (g);

$M_u$  - Massa úmida do solo correspondente a 10mm do CP (g); e

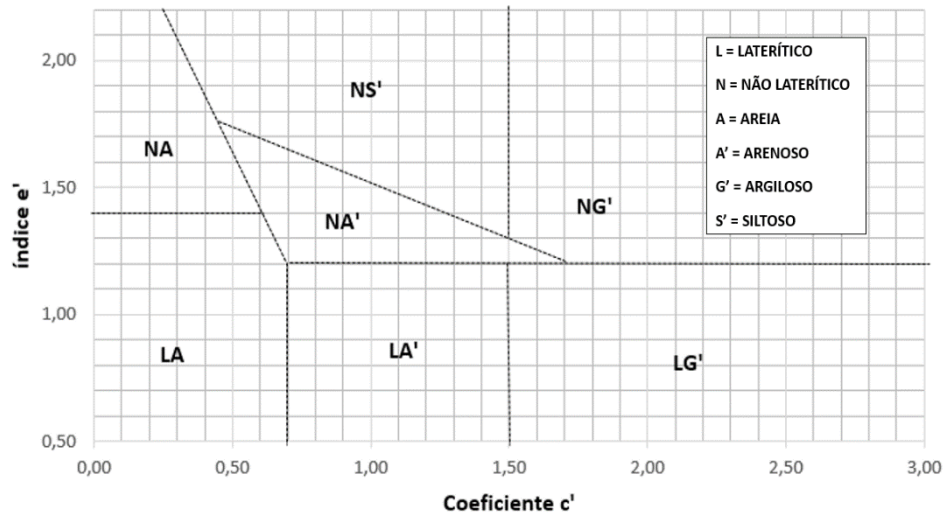
$F_c$  - Fator de correção.

O índice  $e'$  foi determinado a partir dos coeficientes  $d'$  e  $Pi$  (Equação 4), que, segundo Villibor e Nogami (2009), representam o grau de laterização do solo e do compósito.

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}\right)} \quad (\text{Equação 4})$$

Após a execução do ensaio e obtenção dos resultados, o solo foi classificado através da metodologia elaborada por Nogami e Villibor (1995) (Figura 26).

Figura 26 - Classificação MCT



Fonte: Adaptado de Nogami e Villibor (1995)

#### 4.4 Ensaios de caracterização mineralógica

Para os ensaios de mineralogia, foram utilizadas amostras deformadas, na qual a fração granular foi identificada pela lupa binocular e, para a fração de argila, foi analisada pela difração de Raios-X.

A análise mineralógica da fração granular do solo e do RCC foi realizada no Laboratório de Microscopia do departamento de Agronomia da Universidade Federal de Cariri (UFCA) – *campus* Crato. Foram lavadas 200 gramas dos materiais na peneira nº 200 (0,075 mm), em seguida, o material retido foi seco em estufa a 105°C e armazenado em saco plástico. Posteriormente, foi realizada a análise utilizando o equipamento estereoscópio de marca Precision, modelo P11, com aumento 40x (Figura 27). As imagens foram obtidas através de uma câmera acoplada ao equipamento e visualizadas com o *software* FutureWinJoe.

Figura 27 - Amostra sendo analisada na lupa binocular



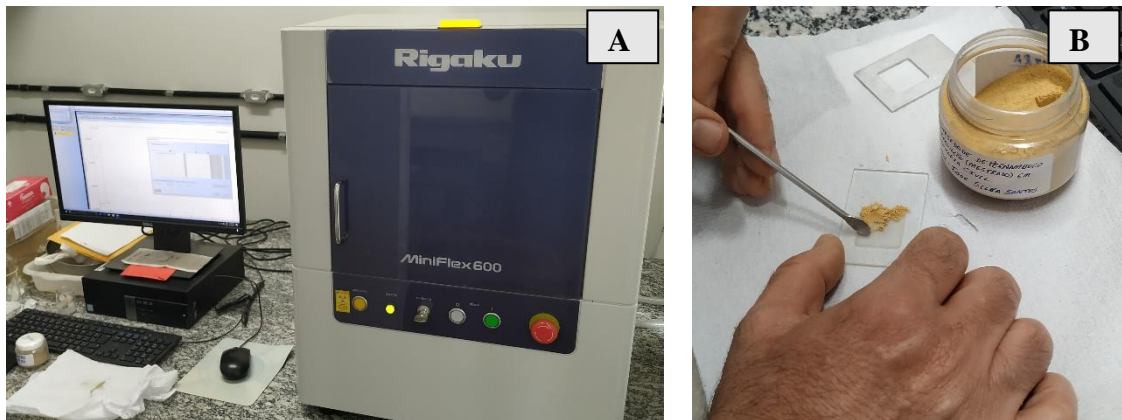
Fonte: Autor.

Outra técnica utilizada foi a difratometria de Raios X (DRX), que é aplicada para determinar e caracterizar a estrutura cristalina presente em uma amostra, onde um feixe de raios X de comprimento de onda conhecido incide sobre a amostra e é difratado pelos átomos existentes (AYLLON; TORRECILHA; SILVA, 2022). O conhecimento da mineralogia do solo pode proporcionar uma melhor compreensão do comportamento do material, em termos de plasticidade, expansividade e resistência (MACEDO, 2013).

Este ensaio foi realizado no Laboratório Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – *campus* Caruaru/PE, com o objetivo de identificar a estrutura da fração de argila (passante pela peneira 0,075mm) do solo, do RCC e dos compósitos. A amostra analisada foi a passante da peneira nº 200 (0,075mm), utilizando o equipamento difratômetro da marca Rigaku, modelo MiniFlex600 (Figura 28), com radiação K-alfa do cobre, executado com voltagem de 40kV e amperagem de 15 mA, operando com velocidade de 2 graus/min e intervalo  $2\theta$  de 5 a 70 graus.



Figura 28 - Ensaio de Difratometria: Equipamento (A) e Preparação da Amostra (B)



Fonte: Autor

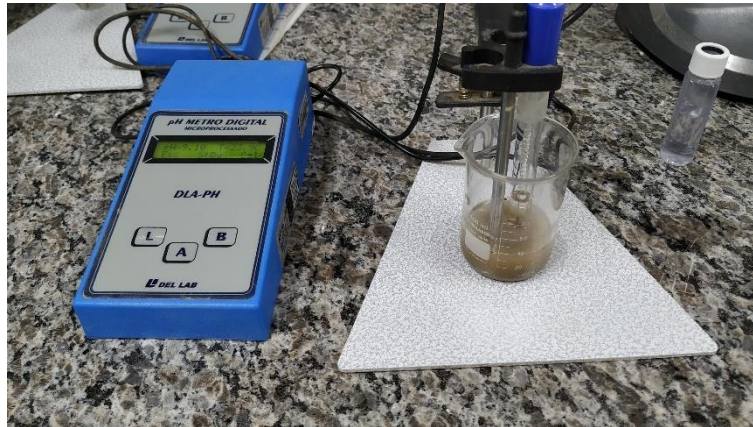
#### 4.5 Ensaios de caracterização química

A análise química ajuda a compreender o processo geológico da formação de um material. A análise dos teores de sais presentes no solo classifica quanto à dispersividade deste material, afetando a sua estabilidade estrutural. Outro fator importante é conhecer a formação dos óxidos para entender a geologia do material analisado. Nesta caracterização, foram utilizadas amostras deformadas para a análise do pH, teores de sais e óxidos (pela fluorescência de raios X) dos materiais e compósitos.

##### 4.5.1 Determinação do pH

Os materiais e compósitos foram submetidos à análise de pH (Figura 29), de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solo da EMBRAPA (2017). As proporções analisadas foram de 10g de material inseridos em um copo de plástico de 50 ml e adicionados 25 ml de água destilada ou da solução de KCl. Existem três condições possíveis associadas à reação do solo ao pH: acidez, neutralidade e alcalinidade. O Quadro 6 mostra os parâmetros utilizados para a classificação. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Cariri (UFCA) – *campus* Juazeiro do Norte.

Figura 29 - Ensaio de pH



Fonte: Autor

Quadro 6 - Parâmetros do pH

VALOR DO pH	CLASSIFICAÇÃO
< 3,5	Ultra ácido
3,5 - 4,4	Extremamente ácido
4,5 - 5,0	Muito fortemente ácido
5,1 - 5,5	Fortemente ácido
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido
6,1 - 6,5	Ligeiramente ácido
6,6 - 7,3	Neutro
7,4 - 7,8	Ligeiramente alcalino
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 - 9,0	Fortemente alcalino
> 9,0	Muito fortemente alcalino

Fonte: Adaptado de Departamento de Agricultura (USDA) (2018)

A diferença dos valores de pH é expressa como  $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCL}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , indicando, principalmente, se o alumínio é trocável ou não trocável. De acordo com Brady (1979), o  $\Delta\text{pH}$  da fonte de cargas negativas dos colóides do solo está relacionado, especialmente, às argilas silicatadas, enquanto, no  $\Delta\text{pH}$  positivo, são, principalmente, a óxidos de ferro e alumínio.

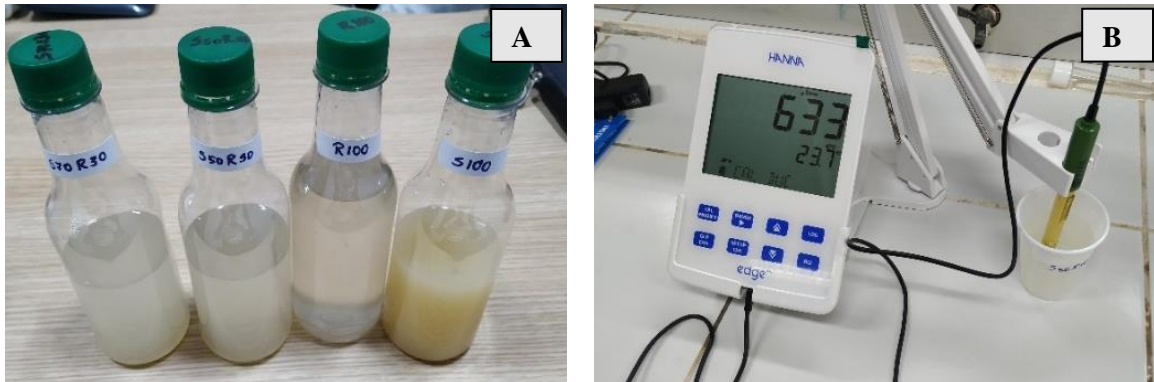
#### 4.5.2 Teores de sais

Para Jesus e Borges (2020), a presença do sódio em um solo afeta a estabilidade estrutural do mesmo. As análises químicas do solo, RCC e compósitos foram realizadas, conforme as diretrizes do Manual de Métodos de Análises de Solo da EMBRAPA (2017), no Laboratório de Química e na Central Analítica da Universidade Federal do Cariri (UFCA) – *campus* Juazeiro do Norte.

Foram separados 150g de cada amostra e adicionada água deionizada, sendo misturada ao solo até o mesmo saturar, ou seja, deslizar suavemente dentro do recipiente no qual houve a mistura. Com isso, foi registrada a quantidade de água necessária para alcançar tal característica.

A pasta foi colocada em um funil de Buckner contendo papel de filtro e sugada através de uma bomba de vácuo, com o intuito de coletar o extrato de saturação. Contudo, a quantidade de água extraída foi bastante pequena e, com isso, foi utilizada a proporção de 1:1 (solo : água), como sugere o manual, para agilizar o processo. Com o substrato extraído, o primeiro passo foi medir a condutividade elétrica das amostras (Figura 30. A e B), através do condutivímetro de marca HANNA, modelo edge<sup>EC</sup>.

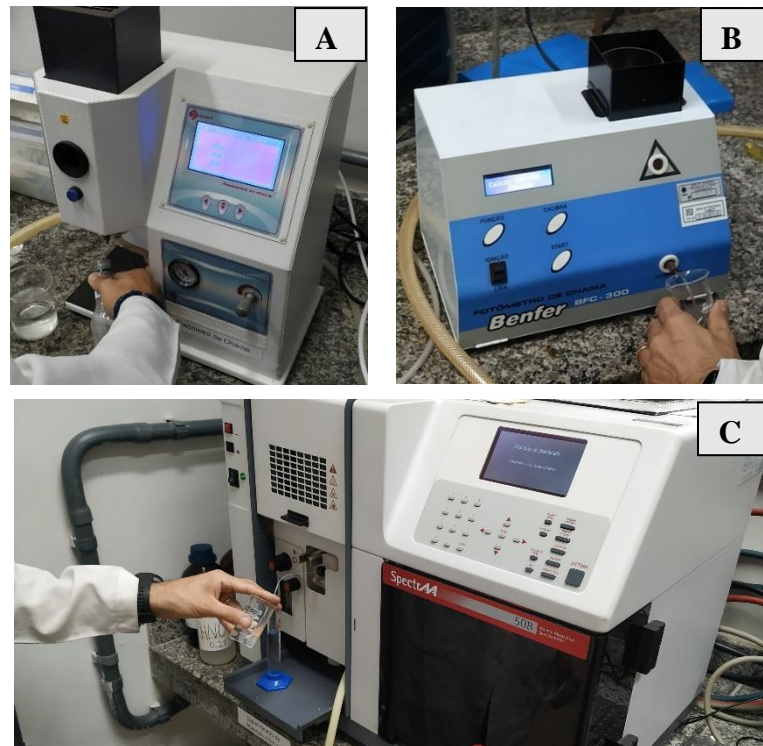
Figura 30 - Ensaio químicos: Substrato extraído (A) e Condutivímetro (B)



Fonte: Autor

Na sequência, foram verificados os teores de sais solúveis presentes no substrato (Figura 31). O Sódio (Na) e o Potássio (K) foram identificados com o uso do fotômetro de chamas da marca Quimis, modelo Q498M2; Para medir o Cálcio (Ca), foi utilizado o equipamento fotômetro de chamas da marca Benfer, modelo BFC-300. Com o uso do equipamento absorção atômica (marca SpectrAA, modelo 50B), foi possível quantificar o elemento Magnésio (Mg).

Figura 31 - Determinação dos Teores de Sais: Na e K (A); Ca (B); e Mg (C)



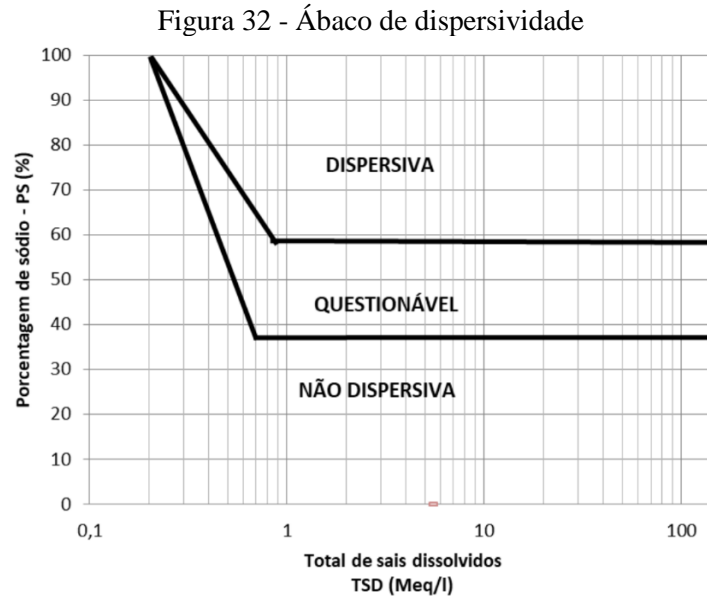
Fonte: Autor

Com os teores de sais encontrados, foram calculados o total de sais dissolvidos (TSD), a porcentagem de sódio trocável (PST) e a razão de absorção de sódio (RAS), através das equações mostradas na Tabela 4. Estes parâmetros foram utilizados para classificar o material quanto à dispersividade, por meio do ábaco (Figura 32) proposto por Sherard, Dunnigan e Decker (1976).

Tabela 4 - Equação dos parâmetros dos teores de sais.

PARÂMETRO	EQUAÇÕES
TSD	$TSD = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{1+} + K^{1+}$
PST (%)	$PST = \left( \frac{Na^{1+}}{TSD} \right) * 100$
RAS	$RAS = \frac{Na^{1+}}{\sqrt{\left( \frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2} \right)}}$

TSD = total de sais dissolvidos; PST = porcentagem de sódio trocáveis; e RAS = razão de absorção de sódio.  
 Fonte: Adaptado de Portela (2019)



Fonte: Sherard, Dunnigan e Decker (1976)

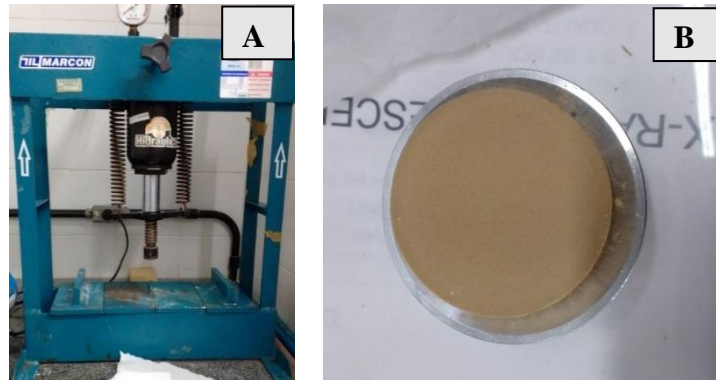
Para Haddad, Javdanian e Ebrhimpour (2017) materiais dispersos são aqueles solos que são facilmente e rapidamente deslocados em água corrente. Esses materiais são propensos à erosão, o que pode afetar negativamente o comportamento geotécnico dos solos utilizados para infra estruturas (taludes, pavimentos e etc) e fundações (RENGASAMY; TAVAKKOLI; MCDONALD, 2016).

#### 4.5.3 Ensaio de fluorescência de Raios X

A fluorescência de Raios X (FRX) é um método qualitativo-quantitativo, que utiliza energia dispersiva para determinar a composição química de rochas e a presença estimada de elementos, através da intensidade dos raios X emitidos pelos elementos presentes na amostra (PACHECO, 2020). Com esta técnica, é possível quantificar a presença de óxidos que compõem o material em análise, ajudando a identificar os minerais presentes no solo (NASCIMENTO, 2019).

Para a realização dos ensaios, o material foi passado na peneira de 0,075 mm e seco em estufa a 105°C. Posteriormente, utilizando uma prensa manual de marca Marcon, a amostra foi prensada a uma força de 8,5 toneladas, confeccionando, assim, “pastilhas” com dimensões de 3,5 cm de diâmetro e 0,4 cm de altura (Figura 33). É importante mencionar que uma porção do material seco em estufa foi levada a uma mufla, a 440°C, por 12 horas, para determinar o teor de material orgânico, por meio da perda por fogo, de acordo com a NBR 13600 (ABNT,2022).

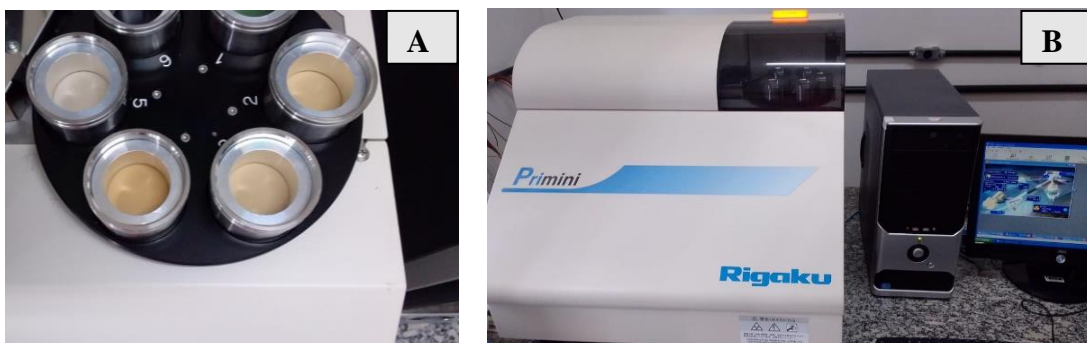
Figura 33 - Preparação da Amostra: Prensa (A); e Amostra em Pastilha (B)



Fonte: Autor

As pastilhas foram colocadas no porta amostra do equipamento e submetidas à análise de fluorescência de raios X (Figura 34). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Química da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – *campus* Caruaru/PE, com o auxílio do equipamento, marca Rigaku, modelo Primini, de espectrômetro de fluorescência de raios X de 40 kV e corrente de 1,25 mA, que analisa elementos do flúor ao urânio.

Figura 34 - Análise de Fluorescência: Pastilha no porta amostra (A); e Equipamento (B)



Fonte: Autor

## 4.6 Ensaios de caracterização mecânica

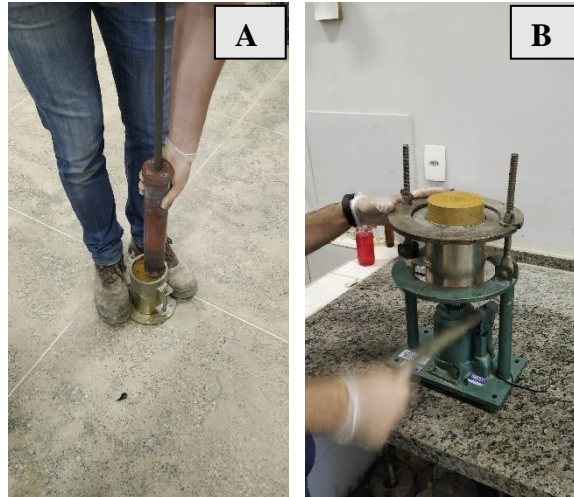
Os ensaios para a caracterização mecânica dos solos foram realizados em conformidade com as normas NBR 7182 (ABNT, 2020) e NBR 12770 (ABNT, 1992). Os testes foram realizados no LABGEO da UFCA – *campus* Juazeiro do Norte.

### 4.6.1 Compactação

Os ensaios foram realizados utilizando a energia de compactação Proctor Normal e sem reuso de material. Como estabelece a NBR 7182 (ABNT, 2020), foram moldados, para cada

compósito, cinco corpos de prova (CP), com dimensões de 10 cm de diâmetro por 12,01 cm de altura (Figura 35), sendo dois no ramo úmido, um próximo à umidade ótima, e dois no ramo seco, variando a umidade em 2%, perfazendo um total de 50 CP's.

Figura 35 - Ensaio de compactação: Execução (A); e Extração (B)



Fonte: Autor.

#### ***4.6.2 Resistência ao Cisalhamento***

Para determinar a resistência ao cisalhamento, foi utilizado o método do cisalhamento direto. Esta análise foi realizada no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) da UFPE – Recife. Foi utilizado o equipamento de marca Testop, como mostra a Figura 36.

Figura 36 - Ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autor.

Os corpos de prova (CPs) submetidos ao ensaio de cisalhamento direto (Figura 37) foram moldados com dimensões de 5 cm x 5 cm x 4 cm (Largura x Comprimento x Altura), a partir das amostras indeformadas.

Figura 37 - Moldagem dos corpos de prova e determinação da umidade



Fonte: Autor.

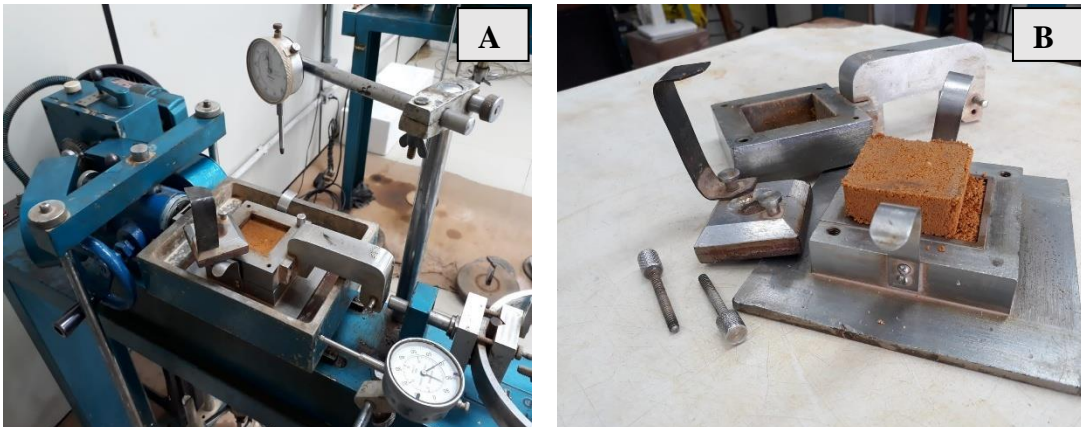
Foram moldados 8 CPs, dos quais quatro foram analisados de forma saturada e quatro de modo não saturado. Antes de iniciar a aplicação da força de cisalhamento, foi realizada a etapa de adensamento (Figura 38). Os corpos de prova foram submetidos às tensões 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa. O término da etapa de adensamento foi determinado a partir da estabilização das deformações verticais.

Ao final da fase de adensamento, os corpos de prova foram submetidos a um ensaio de cisalhamento direto, adotando uma velocidade de 0,483 mm/min do deslocamento da parte superior da caixa de cisalhamento (Figura 38), com o intuito de obter os valores dos parâmetros de cisalhamento do solo.

Bastos (1999) sugere uma classificação de erodibilidade em função da variação no intercepto da coesão ( $\Delta c$ ), quando comparados os resultados dos corpos de prova ensaiados na condição natural e na condição inundada. Quando a variação do intercepto de coesão é superior a 85%, o solo pode ser considerado erodível.



Figura 38 - Ensaio de Cisalhamento: Início (A) e término (B)



Fonte: Autor.

#### 4.6.3 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples foi determinada com a compressão não confinada de corpos de prova, através da aplicação de uma carga e do controle de deformação. A preparação das amostras e a execução dos ensaios foi orientada pelas diretrizes estabelecidas na NBR 12770 (ABNT, 2022). A preparação e o rompimento dos CP's foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFCA – *Campus Juazeiro do Norte*.

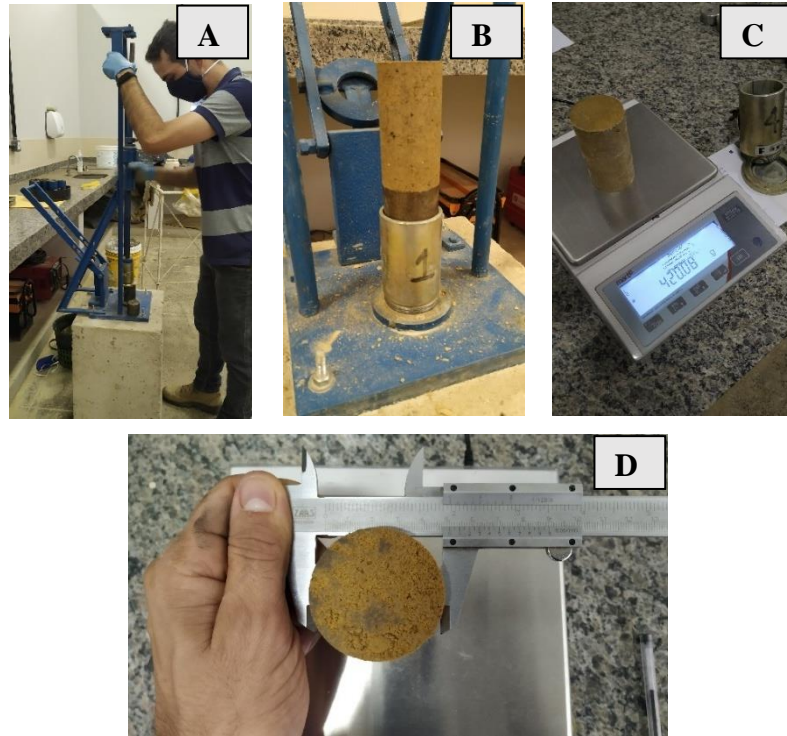
Os corpos de prova (CP) foram moldados em um molde cilíndrico com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, sendo preenchidos em três camadas, realizando-se escarificação entre elas. Os CP's foram submetidos a parâmetros de aceitação (Quadro 7), com o intuito de garantir a efetividade dos resultados das resistências à compressão simples (RCS), como apresenta a Figura 39.

Quadro 7 - Parâmetros para aceitação dos corpos de prova

PARÂMETROS	CRITÉRIOS
Teor de umidade (%)	Valor $\pm 2\%$
Grau de Compactação (GC)	100% $\pm 3\%$
Dimensões (mm)	Diâmetro $50 \pm 0,5$ ; e Altura $100 \pm 1$

Fonte: Adaptado de Portela (2019).

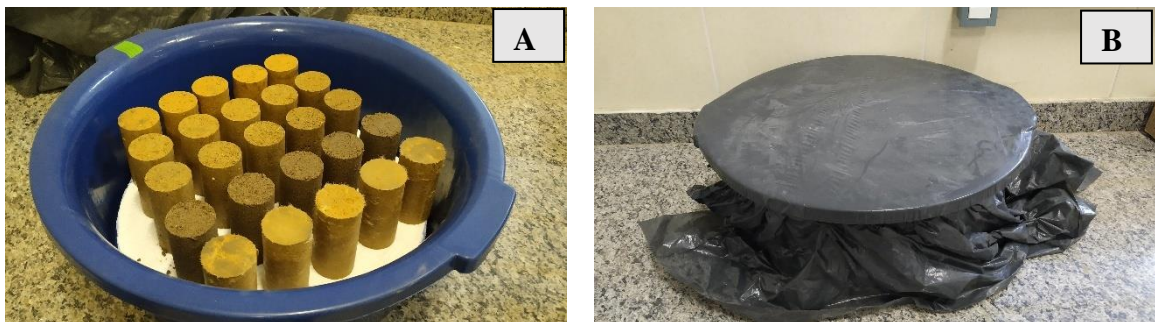
Figura 39 - Produção das amostras: Preparação (A); Desmoldagem (B); Pesagem (C); e Medida (D)



Fonte: Autor.

Para cada compósitos, foram feitos quatro conjuntos com cinco amostras, para serem rompidos à compressão simples com dias de cura diferentes, totalizando 200 CP's em análise. Em seguida, os CP's foram mantidos em câmara úmida (Figura 40) para conservar a umidade de compactação durante o tempo de cura de 7, 28, 60 e 120 dias.

Figura 40 - Câmara úmida - Aberta (A); e Fechada (B)

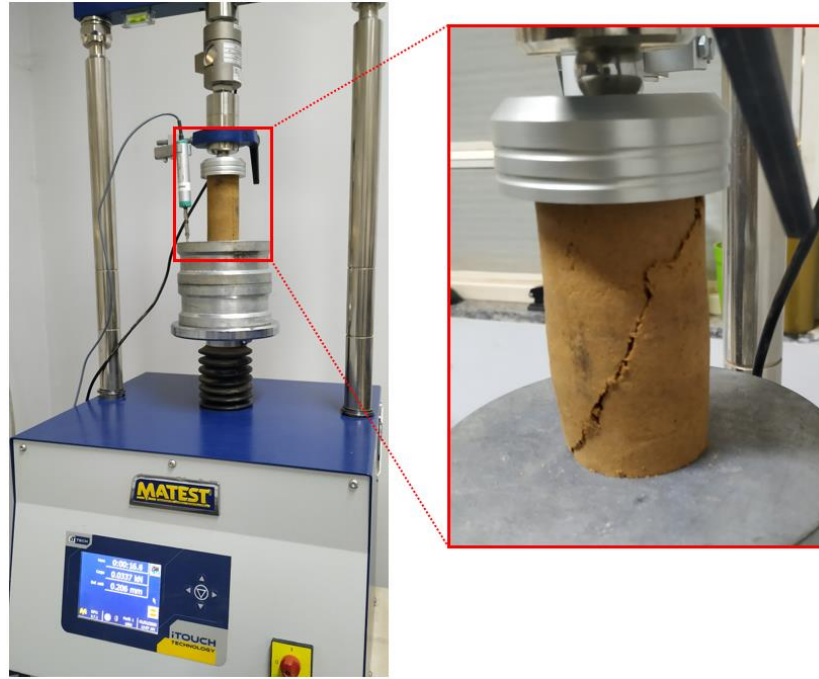


Fonte: Autor

Com o uso da prensa Triaxial de marca MATEST, modelo S301M, com capacidade de 10 kN (Figura 41), as amostras foram rompidas, a uma velocidade de 1,0 mm/min, até a ruptura ou até atingir uma deformação máxima de 15%, como sugere a NBR 12770 (ABNT, 2022). No

entanto, nas amostras que não apresentaram picos até a deformação de 15%, prosseguiu-se o ensaio até o limite do extensômetro do equipamento, de 22%.

Figura 41 - Rompimento das amostras



Fonte: Autor

## 4.7 Análise estatística

Por meio dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, foi realizada uma análise estatística, verificando as variações entre as médias dos resultados encontrados por cada compósito e, posteriormente, foi gerada uma equação com o teor ideal de solo, RCC e fibra de polipropileno.

### 4.7.1 Diferença entre as médias da RCS

Com a utilização do teste análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5%, foi possível verificar as variações encontradas nas médias da RCS em, pelo menos, três amostras. Segundo Oliveira, Ribeiro e Gonzaga (2022), o teste da ANOVA é uma ótima ferramenta estatística para ensaios laboratoriais, pois verifica se as médias amostrais diferem entre si.

Identificando esta diferença apontada pelo teste ANOVA, foi utilizado o teste de Tukey, com nível de significância de 5%, uma vez que é um teste de comparação de médias no qual são separados em grupos de acordo com suas semelhanças estatísticas (THOMA et al., 2022).

#### ***4.7.2 Análise da metodologia da superfície de resposta (RSM)***

Para o desenvolvimento de pesquisas em estabilização de solos, quando são necessárias intervenções efetivas no solo, é fundamental definir corretamente os níveis de inclusão de materiais estabilizantes (SILVA, 2020). Segundo Güllü e Fedakar (2017), uma análise incorreta nesta etapa do estudo pode levar a grandes problemas, do ponto de vista da escala de otimização.

A abordagem da Metodologia de *Response Surface Methodology (RSM)* se destaca por corresponder a uma combinação de técnicas matemáticas e estatísticas voltadas para o aprimoramento de projetos. Com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, como referência, este método fornece valores de otimização do sistema, permitindo previsões de valores que podem ser alcançados (CHEN et al., 2022; YOUSEFPOUR et al., 2021; ZHANG et al., 2020), sendo viável para sua aplicação em estudos de estabilização de solos (CHEN et al., 2022; TURKANE; CHOUKSEY, 2022; PEDROSA, 2021).

Segundo Silva et al. (2021), a identificação do compósito ideal depende dos parâmetros que exerçam maior influência na estabilização de um solo. Assim, na análise estatística desta pesquisa, foi utilizada como variável dependente a resistência à compressão simples (RCS); e, como variável independente, os teores de RCC, fibras de polipropileno e o tempo de cura das amostras.

Os cálculos relacionados às variáveis independentes foram realizados pelo teste da ANOVA, utilizando o valor-P, com um nível de significância de 5%, testando a distribuição de probabilidade dos dados e verificando sua capacidade de afetar os resultados de resistência à compressão simples.

O desenho do modelo matemático também depende de outros aspectos, como analisar a diferença entre o  $R^2$  ajustado e o  $R^2$  previsto, que não deve ultrapassar 20% (SHEIKHMOHAMMADI et al., 2017; DELOACH; ULBRICH, 2007). Dada a modelagem

matemática empírica, podem ser estabelecidas relações entre diferentes variáveis (dependentes e independentes), onde a identificação da qualidade do ajuste indicará a tendência dos resultados (GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017).

Por fim, após a conclusão da modelagem, iniciou-se uma verificação de adequação do modelo. Nesta etapa, verificou-se a adequação do modelo ao comportamento experimental dos estudos de estabilidade do solo, dentro de certos limites, definidos pela taxa média de variação entre os resultados experimentais e os obtidos pelo modelo.

#### **4.8 Análise de erodibilidade**

O estudo de erodibilidade do solo e do melhor teor encontrado pela estatística foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFCA, por meio da metodologia Inderbitzen. Esta metodologia foi introduzida no Brasil entre 1975 e 1978, sendo proposta, por Bastos, Milititsky e Gehling (2000), como ensaio geotécnico direto para investigação do potencial de erodibilidade de um solo. Segundo Soares et al. (2018), este é o método mais utilizado no meio geotécnico para erodibilidade, pois se destaca por sua simplicidade de execução do ensaio.

O equipamento utilizado para a execução do ensaio apresenta as seguintes especificações: rampa hidráulica em chapa metálica com 20 cm de largura e 120 cm de comprimento, com uma abertura circular, onde é posicionada a amostra, com 10 cm de diâmetro e altura variável, ajustando a altura conforme a realização do ensaio (Figura 42). O fluxo d'água foi controlado por um arduíno acoplado a um sensor de fluxo de água, medindo a vazão (l/min).

Figura 42 - Equipamento utilizado para análise de erodibilidade

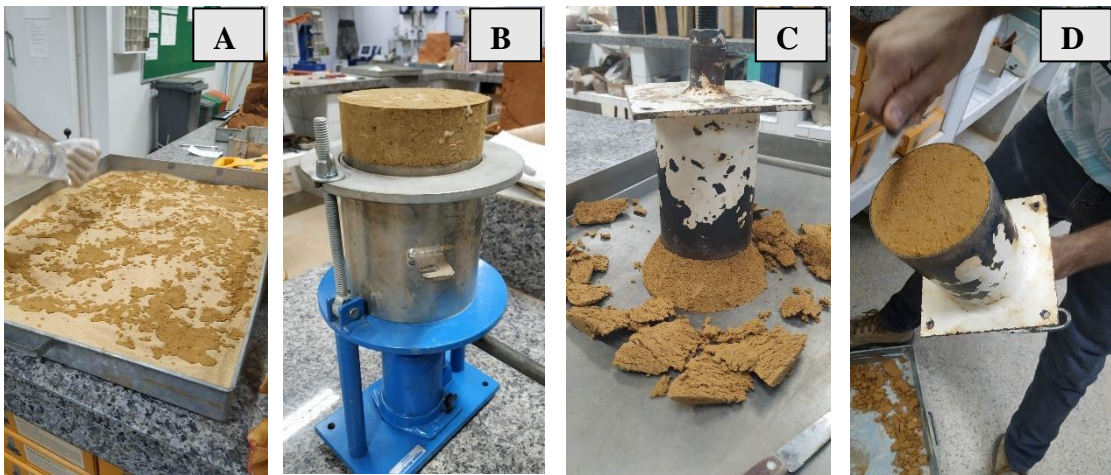


Para a análise de erodibilidade, comumente, utiliza-se amostra indeformada para a realização do ensaio. Contudo, não foi possível coletar tais amostras, então, foi decidido fazer uma análise em amostras compactadas na umidade ótima. A inclinação da rampa adotada no ensaio buscou aproximar as condições naturais da área de estudo. As vazões utilizadas foram baseadas no estudo de Lafayette (2006). Com isso, os parâmetros adotados nesta pesquisa são apresentados a seguir:

- Inclinação da rampa: 60°;
- Vazões: 3 l/min, 4,8 l/min e 10,2 l/min; e
- Condições de umidade da amostra: umidade ótima e inundada.

Para realização do ensaio, as amostras, em umidade ótima, foram compactadas em um cilindro grande, com 15,22 cm de diâmetro, utilizando a energia de compactação proctor normal, conforme estabelece a NBR 7182 (ABNT, 2020). Posteriormente, foi moldada a amostra com 10 cm de diâmetro para a realização do ensaio de inderbitzen, a partir da amostra compactada extraída do cilindro (Figura 43). Vale salientar que, para a realização da análise de erodibilidade na condição inundada, a amostra compactada foi submersa em água por 72 horas.

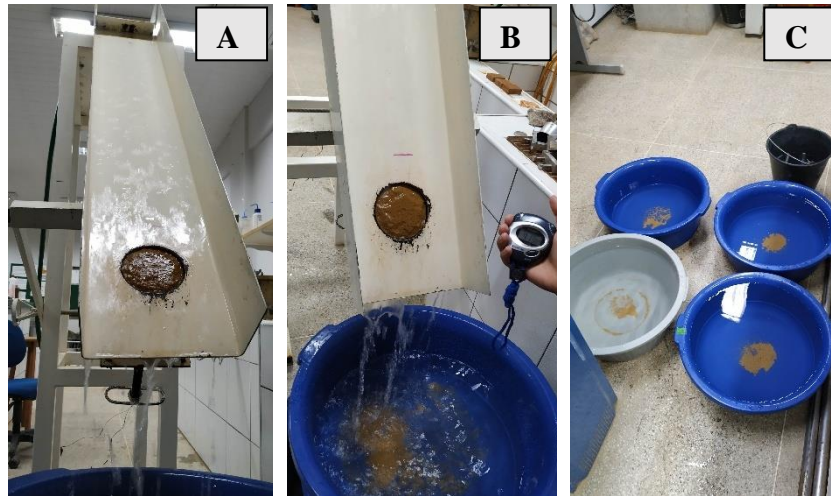
Figura 43 - Preparação da amostra: Compactação e Extração (A e B); Moldagem (C); e Amostra (D)



Fonte: Autor

A amostra de solo foi posicionada no equipamento de tal forma que a sua superfície fique no mesmo nível da rampa. O sistema de coleta do material erodido foi feito por um conjunto de baldes, em intervalos de 1 min, 5 min, 10 min, 15 min e 20 min (Figura 44). Os sedimentos foram recolhidos e colocados em estufa durante 24h, para secagem e determinação do peso seco.

Figura 44 - Execução do ensaio (A); e Coleta do material erodido (B e C)



Fonte: Autor

Os valores da perda do material erodido podem ser obtidos diretamente do ensaio de Inderbitzen e os valores das tensões cisalhantes hidráulicas ( $\tau_h$ ) podem ser obtidos por intermédio da Equação 5 (LAFAYETTE, 2006).

$$\tau_h = \gamma_w * h * d \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$\gamma_w$  - peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);  
 $h$  - altura da lâmina de fluxo (m); e  
 $d$  - declividade da rampa em (m/m).

A partir da Equação 6, foi possível estimar a altura da lâmina do fluxo de água, dada a partir da velocidade de escoamento, utilizando um corante no fluxo hídrico, e o tempo necessário para o mesmo percorrer o canal.

$$Q = (l * h) * v \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$Q$  - vazão (m<sup>3</sup>/s);  
 $l$  - largura do canal (m); e  
 $v$  - velocidade (m/s).

Com a plotagem dos dados de tensão cisalhante hidráulica pela perda de solo (por unidade de área e de tempo), obtêm-se o fator de erodibilidade (K), que representa a perda de solo, e a tensão cisalhante hidráulica crítica, entendida como a menor tensão cisalhante hidráulica capaz de produzir destacamento de partículas (BASTOS; JÚNIOR; KUHN, 2017). Com o fator de

erodibilidade (K), é possível classificar o comportamento do material quanto à erodibilidade. Bastos (1999) propõe três principais classes de erodibilidade levando em conta o valor de K (Quadro 8), no qual foi possível classificar o material desta pesquisa.

Quadro 8 - Classes de erodibilidade do material

CLASSES	PARÂMETROS
Alta erodibilidade	$K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$
Média erodibilidade	$0,1 \geq K \geq 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$
Baixa erodibilidade	$K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$

Fonte: Bastos (1999)

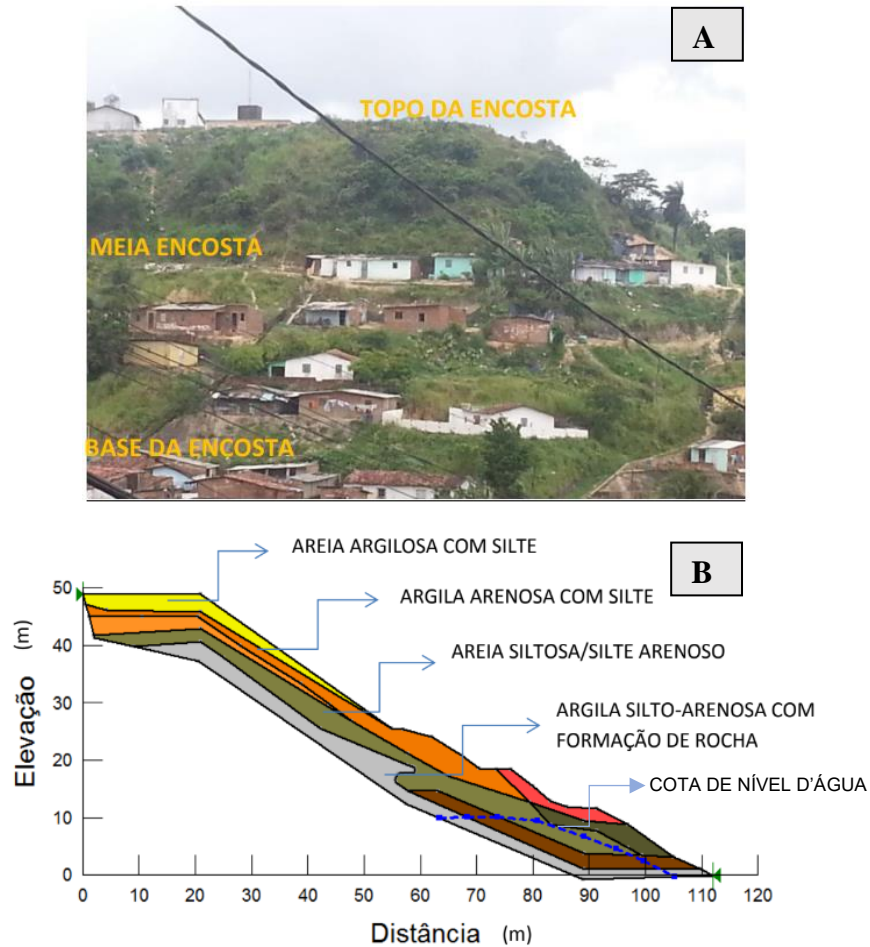
#### 4.9 Análise de estabilidade

Para análise de estabilidade de um talude, por meio do cálculo do fator de segurança ao deslizamento, é necessário conhecer o perfil topográfico, as camadas constituintes do perfil do solo e seus pesos específicos, os parâmetros de resistência e a posição do lençol freático. Como na área de estudo não foi possível a obtenção destas informações, optou-se por analisar se o composto ideal serviria para estabilizar uma encosta de outro local, com características geológicas semelhantes (solo de Formação Barreiras) e que tivesse todas as informações necessárias.

A área escolhida foi uma encosta da RMR estudada por Souza (2014), classificada com grau de risco alto, localizada no bairro Alto do Padre Cícero, Município de Camaragibe/PE (Figura 45.A), e que apresenta indícios de problemas relacionados à estabilidade, como presença de fissuras. A Figura 45.B mostra o perfil da encosta estudada por Souza (2014).



Figura 45 - Encosta: Partes integrantes (A) Seção heterogênea utilizadas na análise do SLOPE/W (B)



Fonte: Souza (2014)

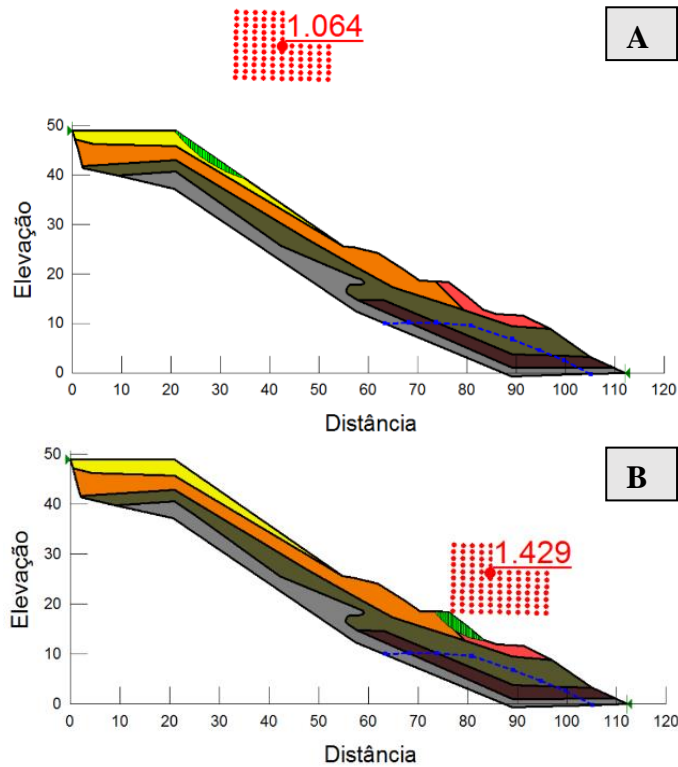
Souza (2014) descreveu que o topo, o meio e a base da encosta, para parâmetros do solo na umidade natural, apresentam fatores de segurança aceitáveis, conforme estabelecidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009), que é de 1,5 (Tabela 5). Contudo, considerando os parâmetros na condição inundada, os taludes do topo e do meio apresentaram fatores de segurança abaixo de 1,5, tornando, assim, um risco de deslizamento (Figura 46).

Tabela 5 - Resumo dos fatores de segurança do talude - análise do SLOPE/W

LOCAL	CONDIÇÃO	METODOLOGIA			
		Morgenstern & Price	Jambu	Bishop	Ordinary
Topo da encosta	Natural	1,705	1,628	1,709	1,638
	Inundado	1,064	1,034	1,067	1,036
Meio da encosta	Natural	2,056	1,953	2,061	1,974
	Inundado	1,402	1,357	1,405	1,363
Base da encosta	Natural	1,902	1,925	1,904	1,890
	Inundado	1,633	1,571	1,636	1,582

Fonte: Adaptado de Souza (2014)

Figura 46 - Fatores de segurança (condição inundado) - Topo da encosta (A); e Meio da encosta (B)



Fonte: Souza (2014)

A fim de avaliar a utilização do compósito estudado para estabilizar esta encosta, o talude foi modelado e analisado pela metodologia de *Morgenstern & Prince, Spencer e Bishop*, utilizando o *software* GeoSlope Studant e os parâmetros de cisalhamento na condição inundada encontrados por Souza (2014) (Tabela 6).

Tabela 6 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento das amostras do talude (condição inundada)

AMOSTRA	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\Phi$ (°)
Topo da encosta	1,85	1,00	32,00
Meio da encosta	1,952	2,85	31,62
Base da encosta	2,031	6,19	30,73

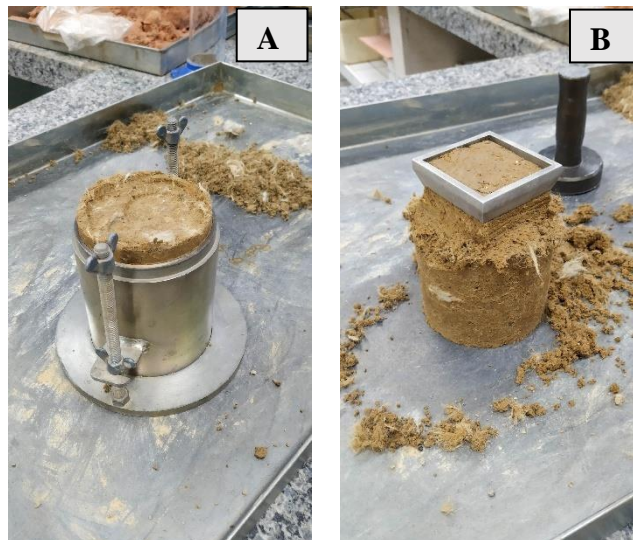
Fonte: Adaptado de Souza (2014)

Considerando que a área da encosta não apresenta uma ocupação desordenada, foi realizado um retaludamento (com corte da encosta) no topo do talude; e, no meio, foi introduzido um muro de contenção, adotando 5 metros de altura e 60° de inclinação, projetado com o compósito ideal obtido pela análise estatística, com base na resistência à compressão simples dos materiais. A altura de 5 metros foi definida seguindo as diretrizes do capítulo 11 do manual de ocupação de morros do Recife (2003), que trata sobre as obras com estrutura de contenção.

Os parâmetros da resistência ao cisalhamento do melhor compósito identificado pela a análise estatística foi obtido por meio do ensaio de resistência ao cisalhamento direto no LABGEO da UFCA – Juazeiro do Norte, por meio do equipamento de marca OWNTEC, modelo MS101.

Foram moldadas amostras compactadas em um cilindro com 10 cm de diâmetro e 12,04 cm de altura (Figura 47.A), utilizando a energia de compactação proctor normal, conforme estabelece a NBR 7182 (ABNT, 2020). Posteriormente, da amostra compactada, foram moldados os corpos de prova (Figura 47.B) com as dimensões de 59,6 mm x 59,6 mm x 20 mm (Largura x Comprimento x Altura) para a realização do cisalhamento direto.

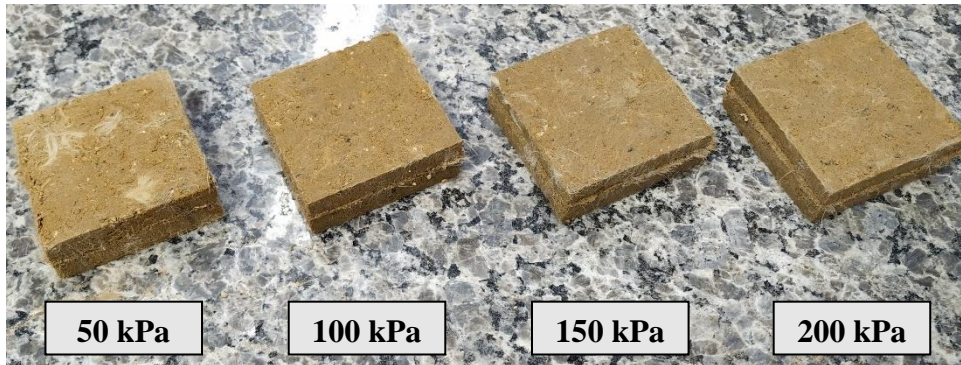
Figura 47 - Amostra compactada (A); e Moldagem do corpo de prova (B)



Fonte: Autor.

Foram moldados um total de 8 CPs, dos quais quatro foram utilizados para análise na condição inundada e quatro na umidade ótima. Inicialmente, os corpos de prova foram submetidos às tensões de adensamento de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa, até a estabilização da variação das deformações verticais. Posteriormente, os CP's foram submetidos ao ensaio de cisalhamento direto (Figura 48), adotando uma velocidade de deslocamento da parte superior da caixa de 0,2 mm/min, obtendo os parâmetros de cisalhamento do melhor compósito.

Figura 48 - Corpos de prova submetidos ao cisalhamento direto



Fonte: Autor.

#### 4.10 Análise econômica

Foi realizada, também, uma análise de custo, com base na planilha de custo da Caixa Econômica Federal - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - PE (SINAPI-PE), de março/2023, comparando a metodologia de solo-cimento ensacado com a metodologia proposta por este trabalho (Solo+RCC+Fibra de polipropileno) para a execução do muro de contenção.

Para isto foi criada uma composição analítica que detalha os materiais, mão de obra e os equipamentos para realização da execução de cada uma das metodologias de contenção, e com isso, gerou-se o custo por metro cúbico para cada método de contenção empregada.

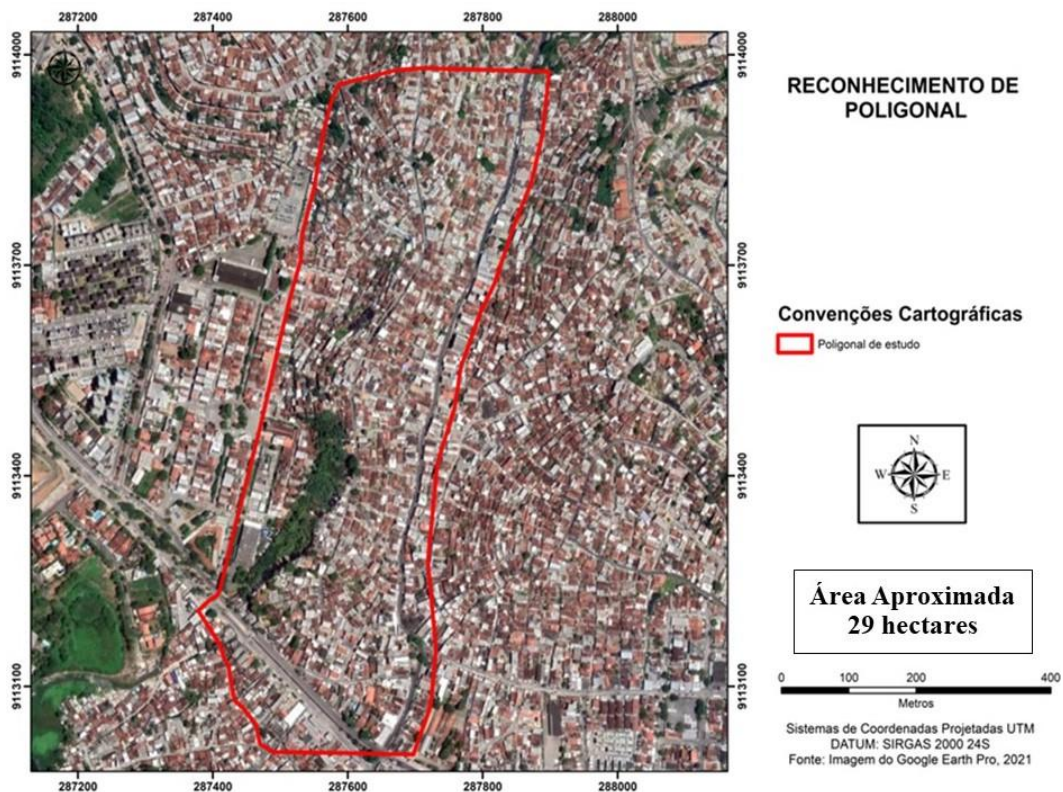
## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os seguintes resultados: análise temporal; ensaios de caracterização física, química, mineralógica e mecânica dos materiais e compósitos; análise estatística; análise de erodibilidade do solo e do melhor compósito dado pela estatística; e estudo de estabilização de um talude instável com o uso do melhor compósito dado pela estatística.

### 5.1 Ações antrópicas na área de estudo

Na área de estudo (Figura 49), foram encontrados diversos fatores socioambientais que contribuem para a instabilidade dos taludes, tais como a deficiência dos serviços de saneamento básico (Figura 50.A), deposição de resíduos sólidos nas canaletas de drenagem e na encosta (Figura 50.B e C), habitações irregulares e tipos de coberturas vegetais inadequadas para o local (Figura 50.A, C e D), espécies estas que absorvem bastante água e ocasionam um peso excessivo em vários pontos da encosta.

Figura 49 - Reconhecimento da poligonal da área de estudo



Fonte: Autor

Figura 50 - a) construções irregulares; b) disposição de resíduos sólidos; c) entupimento das valas de drenagem; e d) vegetação inadequada.



Fonte: Autor (set.2021)

Estes fatores, que contribuem para a instabilidade da encosta, também são apontados em outras pesquisas desenvolvidas em diversas localidades da cidade do Recife e de sua Região Metropolitana (GONÇALVES; SILVA; LAFAYETTE, 2021; NASCIMENTO et al., 2020; SANTOS et al., 2021). Com isso, são necessárias intervenções públicas, quanto à utilização de ações estruturais e não estruturais.

## 5.2 Análise multitemporal

As quantificações referentes às taxas do uso e ocupação do solo (solo exposto, vegetação, mancha urbana e sistema viário) e à taxa de variação da área de estudo estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 7 e 8. Essa quantificação foi baseada na classificação digital de imagens de satélite para os anos de 1974, 1984, 1997, 2004, 2014 e 2021 (Figuras 51 a 56).

Tabela 7 - Quantificação da taxas de ocupação das tipologias por ano

TIPOLOGIA	OCUPAÇÕES POR ANO											
	1974		1884		1997		2004		2014		2021	
	Área (ha)	Ocup. (%)	Área (ha)	Ocup. (%)	Área (ha)	Ocup. (%)	Área (ha)	Ocup. (%)	Área (ha)	Ocup. (%)	Área (ha)	Ocup. (%)
<b>Solo Exposto</b>	1,36	4,71	1,04	3,60	0,20	0,69	0,15	0,52	0,26	0,90	0,25	0,87
<b>Supressão Vegetal</b>	8,26	28,62	8,22	28,48	2,51	8,70	2,98	10,33	2,44	8,45	2,21	7,66
<b>Mancha Urbana</b>	15,43	53,47	16,2	56,13	22,90	79,35	21,61	74,88	23,52	81,50	23,83	82,57
<b>Sistema Viário</b>	3,81	13,20	3,4	11,78	3,25	11,26	4,12	14,28	2,64	9,15	2,57	8,91

Fonte: Autor

Tabela 8 - Taxa de variação das tipologias por período

TIPOLOGIA	VARIAÇÕES POR PERÍODO (%)					
	1974 a 1984	1984 a 1997	1997 a 2004	2004 a 2014	2014 a 2021	1974 a 2021
<b>Solo Exposto</b>	(-1,11)	(-2,91)	(-0,17)	(+0,38)	(-0,03)	(-3,85)
<b>Vegetação</b>	(-0,14)	(-19,79)	(+1,63)	(-1,87)	(-0,80)	(-20,96)
<b>Mancha Urbana</b>	(+2,67)	(+23,22)	(-4,47)	(+6,62)	(+1,07)	(+29,11)
<b>Sistema Viário</b>	(-1,42)	(-0,52)	(+3,01)	(-5,13)	(-0,24)	(-4,30)

Fonte: Autor

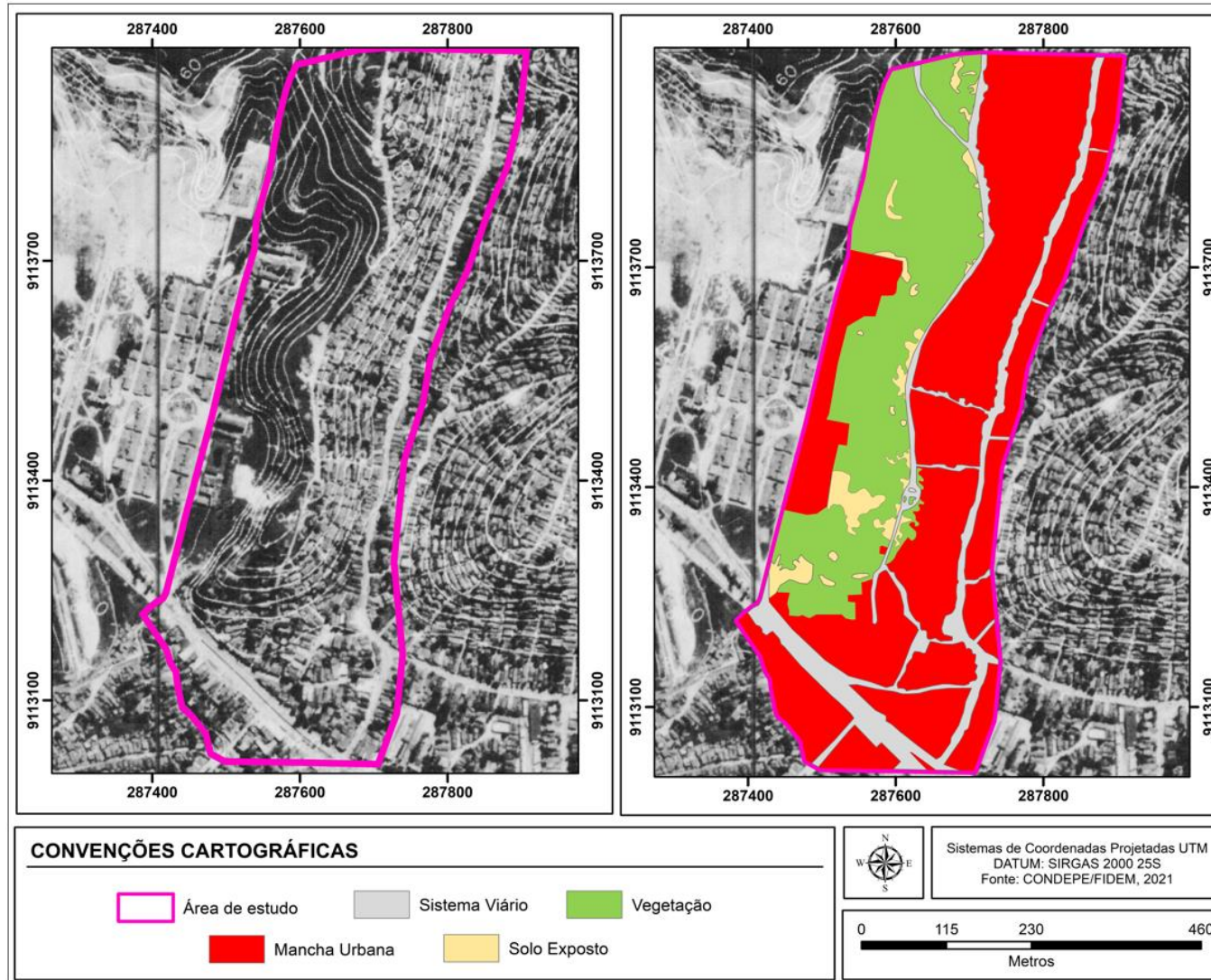
Figura 51 - Mapa de uso e ocupação - 1974



Fonte: Autor

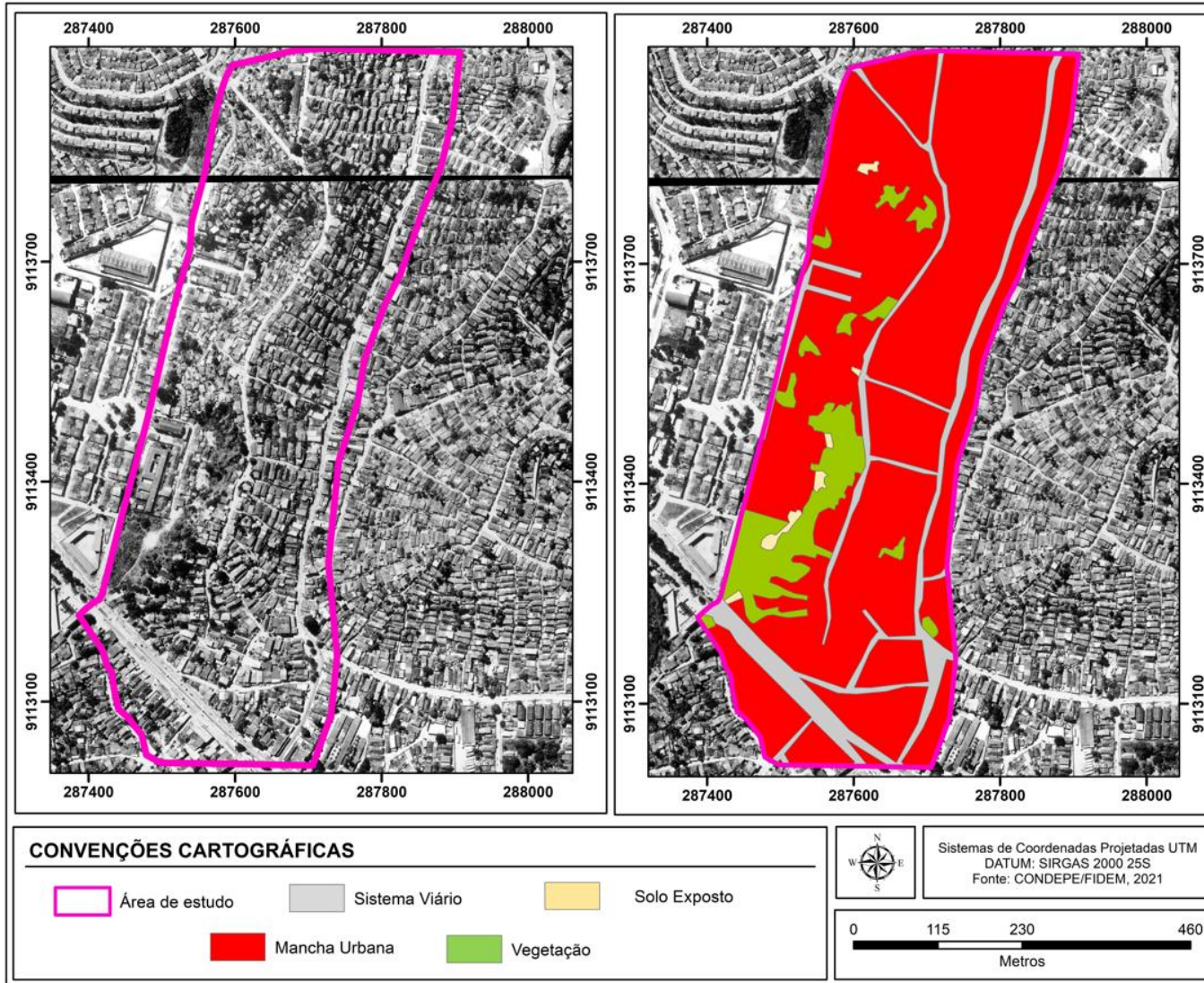


Figura 52 - Mapa de uso e ocupação - 1984



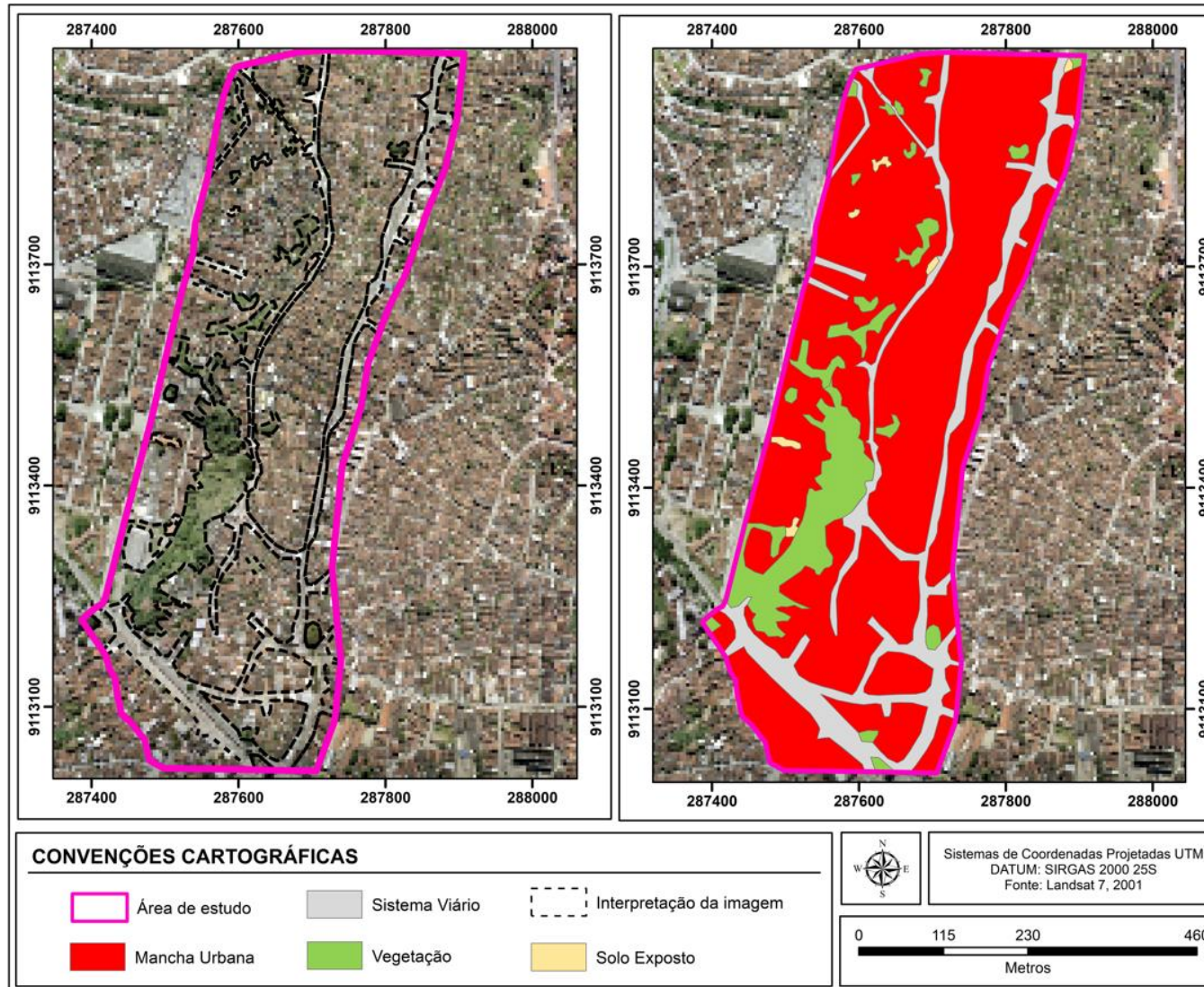
Fonte: Autor

Figura 53 - Mapa de uso e ocupação - 1997



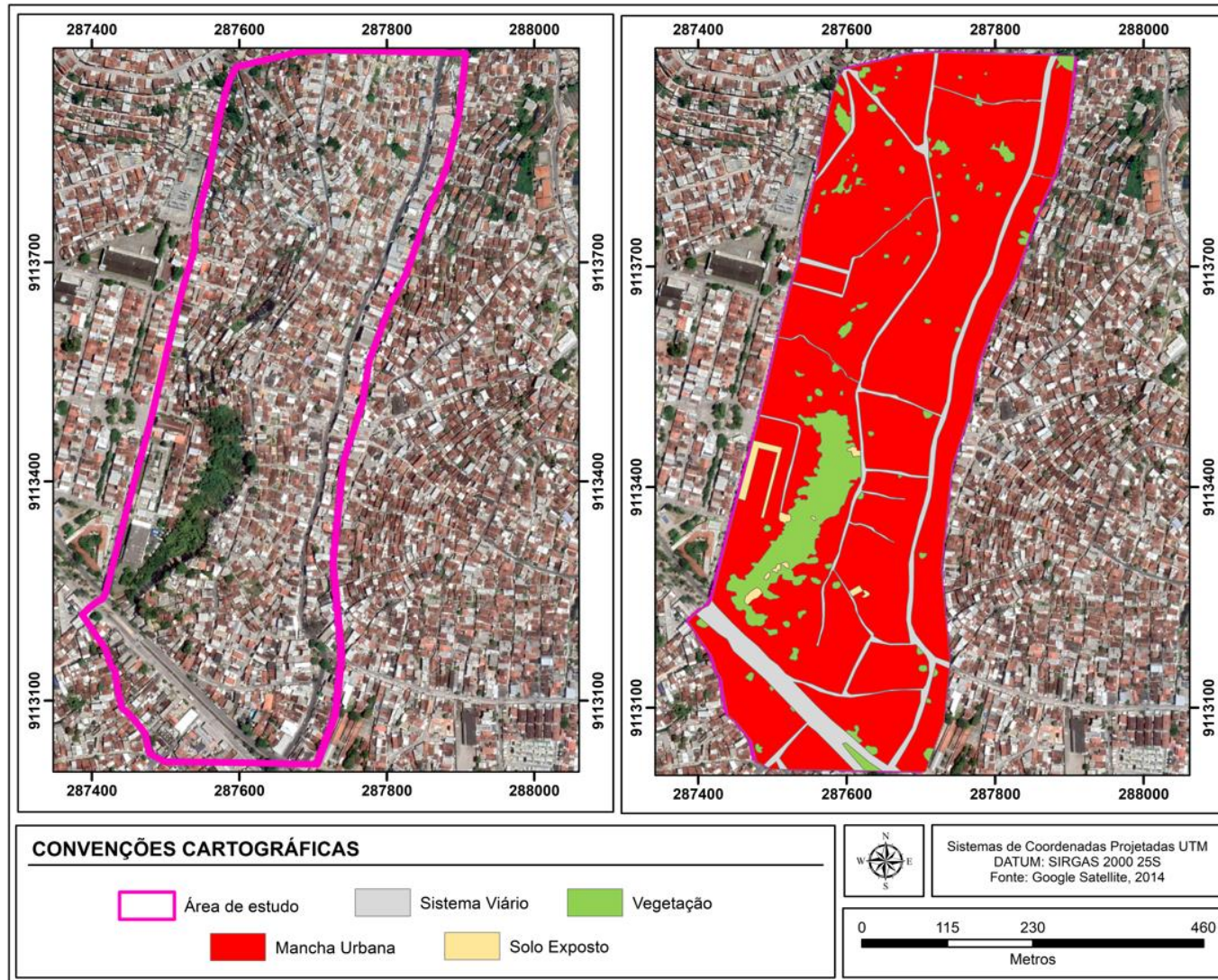
Fonte: Autor

Figura 54 - Mapa de uso e ocupação - 2004



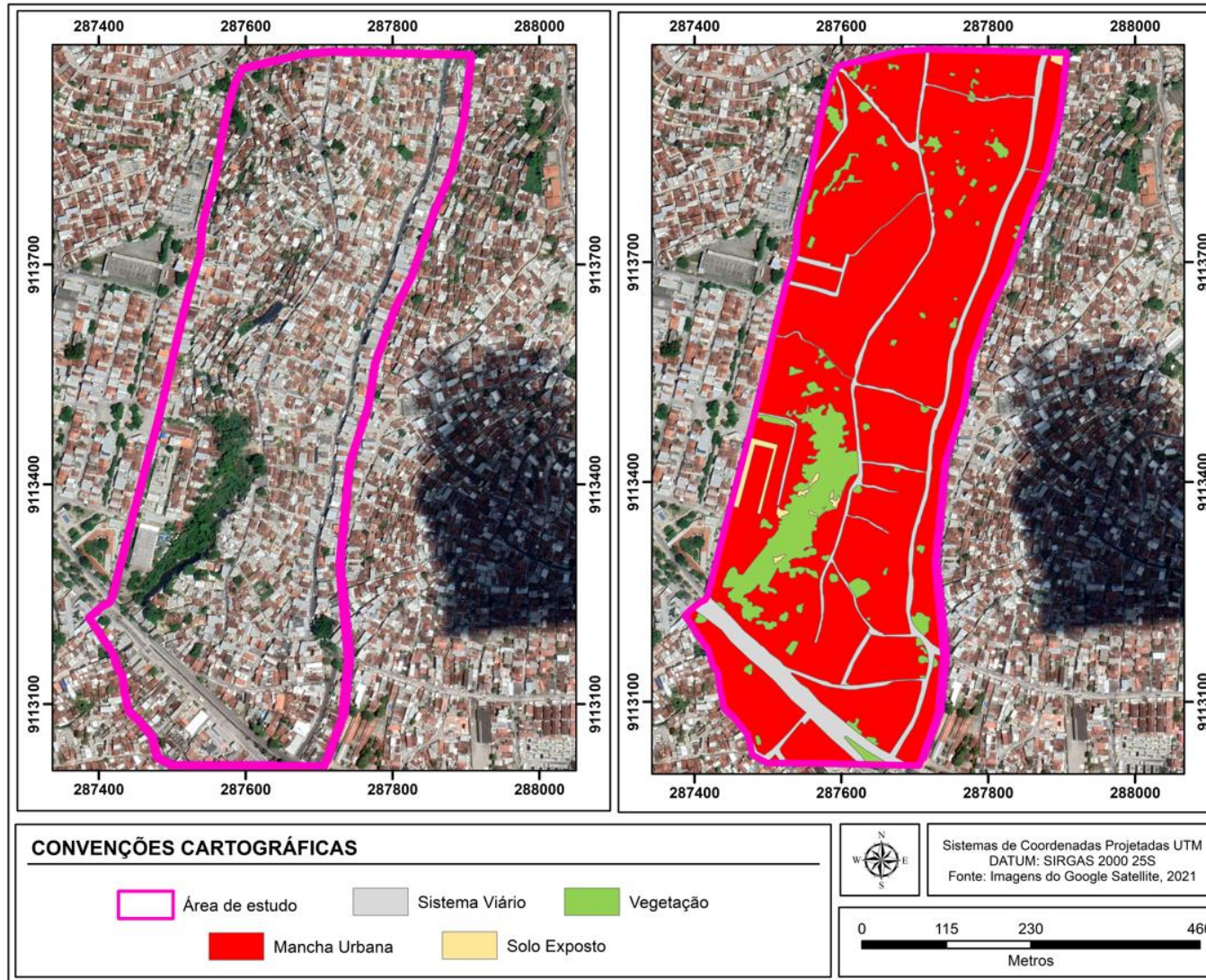
Fonte: Autor

Figura 55 - Mapa de uso e ocupação - 2014



Fonte: Autor

Figura 56 - Mapa de uso e ocupação - 2021



Fonte: Autor

A Figura 51 apresenta a imagem aérea referente ao ano de 1974, em que é possível observar o uso e ocupação do solo. Percebe-se que, na parte superior da encosta, no bairro de Nova Descoberta, predomina a ocupação urbana, enquanto que, para o lado do bairro da Macaxeira (parte inferior da encosta), há uma predominância de vegetação, indicando que a cidade se desenvolve de leste a oeste. Desta forma, devido ao uso e ocupação do solo, o escoamento das águas superficiais das áreas de cotas mais baixas ocorre através da linha de drenagem natural do solo, enquanto que, nas cotas mais elevadas, onde a ocupação é mais densa, o escoamento superficial é conduzido por meio de equipamentos de drenagem.

Verificou-se que, em 1974, a área ocupada por moradias e equipamentos públicos (15,43 ha) representava a maior parte da área de estudo, equivalente a 53,47% da totalidade, e a área de vegetação (8,26 ha) correspondia a 28,62% da área (Tabela 7). Também foi possível observar áreas de solo exposto (1,36 ha, 4,71% do total), estando concentradas em locais de maior declividade da encosta, favorecendo as ocorrências de processos erosivos.

Na área de estudo em 1984 (Figura 52), verifica-se um aumento da ocupação do solo (16,20 ha - 56,13% do total), principalmente por habitações, no sul da encosta, ocasionando uma supressão da cobertura vegetal, totalizando uma área de vegetação de 8,22 ha (28,48% da área de estudo). Importante mencionar que, comparando os mapas de uso e ocupação de 1974 e 1984, algumas áreas de solo exposto passaram a indicar cobertura vegetal. O percentual de área de solo exposto, em relação ao total da área de estudo, foi de 3,60% (1,04 ha), correspondendo a uma variação de -1,11% em relação ao ano de 1974 (Tabela 8).

Ressalta-se que a cobertura vegetal tem um papel fundamental para a estabilidade das encostas. As raízes da vegetação desempenham um papel ativo, favorecem a estabilização do solo e aumentam a sua resistência, reduzindo a potencialidade de ocorrências de processos de movimento de massa de solo (ROCCATI et al., 2021).

Na imagem apresentada na Figura 53, correspondente ao ano de 1997, pode-se verificar um aumento da ocupação urbana, chegando a representar 79,35% (22,90 ha) da área total, resultando, conseqüentemente, em uma redução de vegetação equivalente a 8,70% (2,51 ha) da área total. Com relação ao solo exposto, percebeu-se que algumas áreas foram ocupadas pela população, ocasionando uma redução, comparadas aos anos anteriores (Tabela 7), representando, em 1997, um percentual de 0,69% (0,20 ha) da área de estudo.

De 1991 a 2021, a taxa de crescimento populacional anual da cidade do Recife teve uma média geométrica equivalente a 0,89%, com 1.310.259 habitantes em 1991 para 1.661.017 habitantes em 2021 (PCR, 2021b; IBGE, 2021). À medida que as cidades crescem, as populações mais pobres ocupam áreas impróprias, como as encostas e margens de rios e córregos, além de áreas periféricas (MONTEIRO et al., 2020; LEITE; GIAVAROTTI, 2020), como tem sido observado na cidade do Recife, onde as pessoas mais vulneráveis estão ocupando áreas perigosas e propensas a movimento de massa.

A Figura 54 apresenta o mapa da área de estudo do ano de 2004. A imagem de satélite encontrada possui pixel com dimensão de 4x4 metros, tendo uma resolução um pouco menor quando comparada com as demais imagens. Contudo, com a vetorização, observou-se 74,88% (21,61 ha) de área urbana; 10,33% (2,98 ha) de área de vegetação; e 0,52% (0,15 ha) de solo exposto.

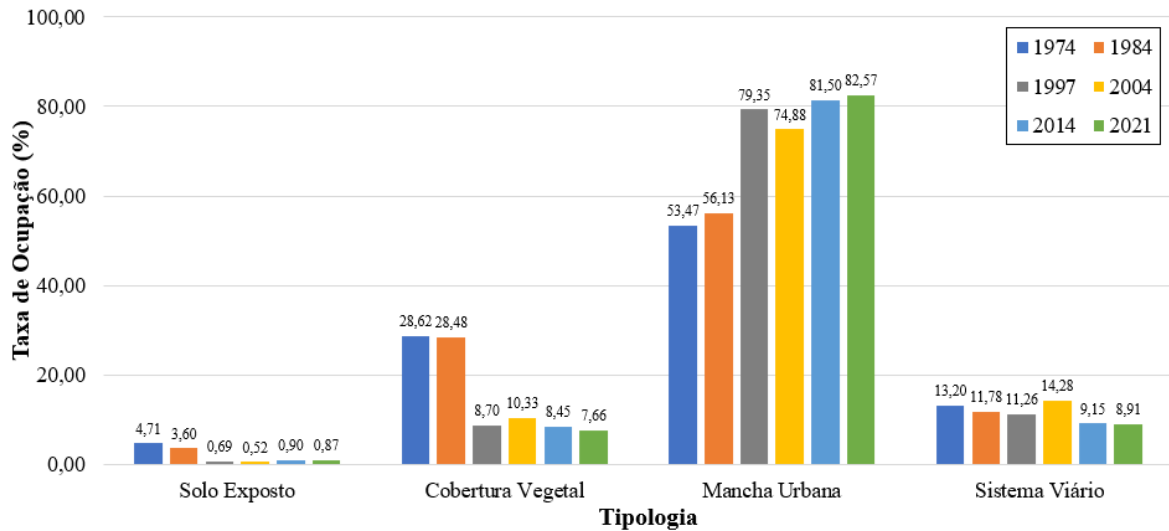
No ano 2014 (Figura 55), verificou-se um aumento da ocupação urbana, totalizando 81,50% (23,52 ha) da área de estudo. Já a área de vegetação e de solo exposto representaram 8,45% (2,44 ha) e 0,90% (0,27 ha), respectivamente. No ano de 2021 (Figura 56), percebeu-se um aumento da ocupação urbana em relação ao ano 2014, equivalente a 82,57% (23,83 ha), com área de vegetação ocupando 7,66% (2,21 ha) e solo exposto de 0,87% (0,25 ha) da área (Tabela 7).

É possível verificar que, em um recorte de 47 anos, o sistema viário sofreu uma variação negativa de 4,30%, apesar da variação do crescimento urbano ter aumentado em 29,11% (Tabela 8). Observa-se que o mapa de 1997 foi o que apresentou maior mudança no crescimento urbano, a partir deste ano, teve um crescimento lento até estagnar em 2014. Este processo se deu com o fechamento da fábrica da Macaxeira, em 1981, iniciando um processo de ocupação intensiva da comunidade, impulsionado por lutas por moradia e por empresas imobiliárias responsáveis pela gestão dos imóveis da fábrica (SANTANA, 2019).

Constata-se uma forte supressão da cobertura vegetal e um elevado crescimento populacional ao longo dos anos (Figura 57). A cobertura vegetal em 1974 era equivalente a 28,62% (8,26 ha) da área de estudo, atingindo 7,66% (2,21 ha) em 2021. Essa ocupação desordenada das

encostas, que reduz a cobertura vegetal, tem um impacto significativo no meio ambiente e na resistência da encosta (SANTOS; FALCÃO; LIMA, 2020).

Figura 57 - Percentual do uso e ocupação do solo (1974-2021).



Fonte: Autor

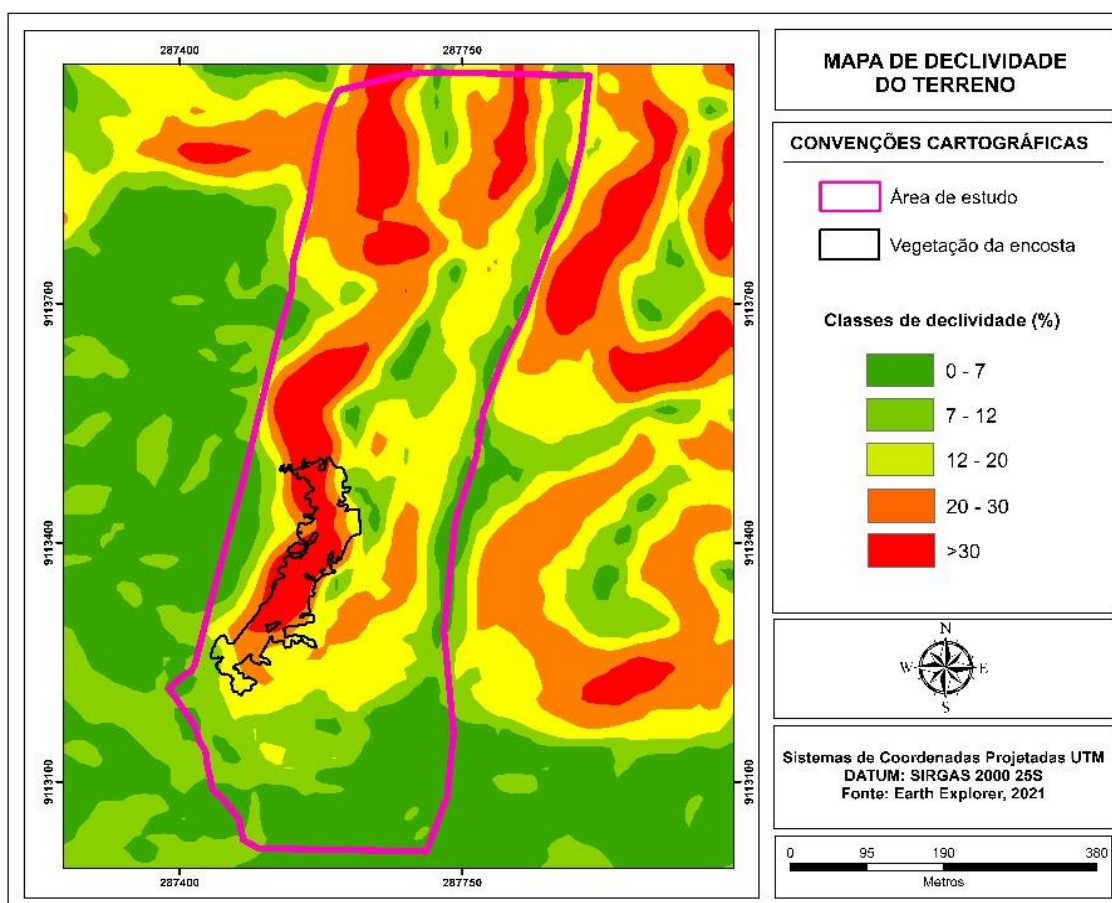
O mapeamento espaço-temporal, utilizando ferramentas da geografia ambiental (SANTOS et al., 2021), auxiliou na obtenção de resultados importantes para a tomada de decisão por parte do poder público, como indícios de intervenções estruturais e conscientização da população para proporcionar a convivência sustentável dos habitantes que vivem na área de estudo.

### 5.3 Análise da declividade da área de estudo

Foi elaborado, também, o mapa de declividade (Figura 58), onde foi observado que a área que permanece vegetada em 2021 possui declividades superiores a 30% (Tabela 9), o que contribuiu para o agravamento do risco de desastres. No modelo digital de elevação (Figura 59), observa-se que, onde há vegetação (indicada pela seta azul), é uma área côncava com elevada inclinação, fatores que podem ter contribuído para inibir a ocupação.



Figura 58 - Mapa de declividade



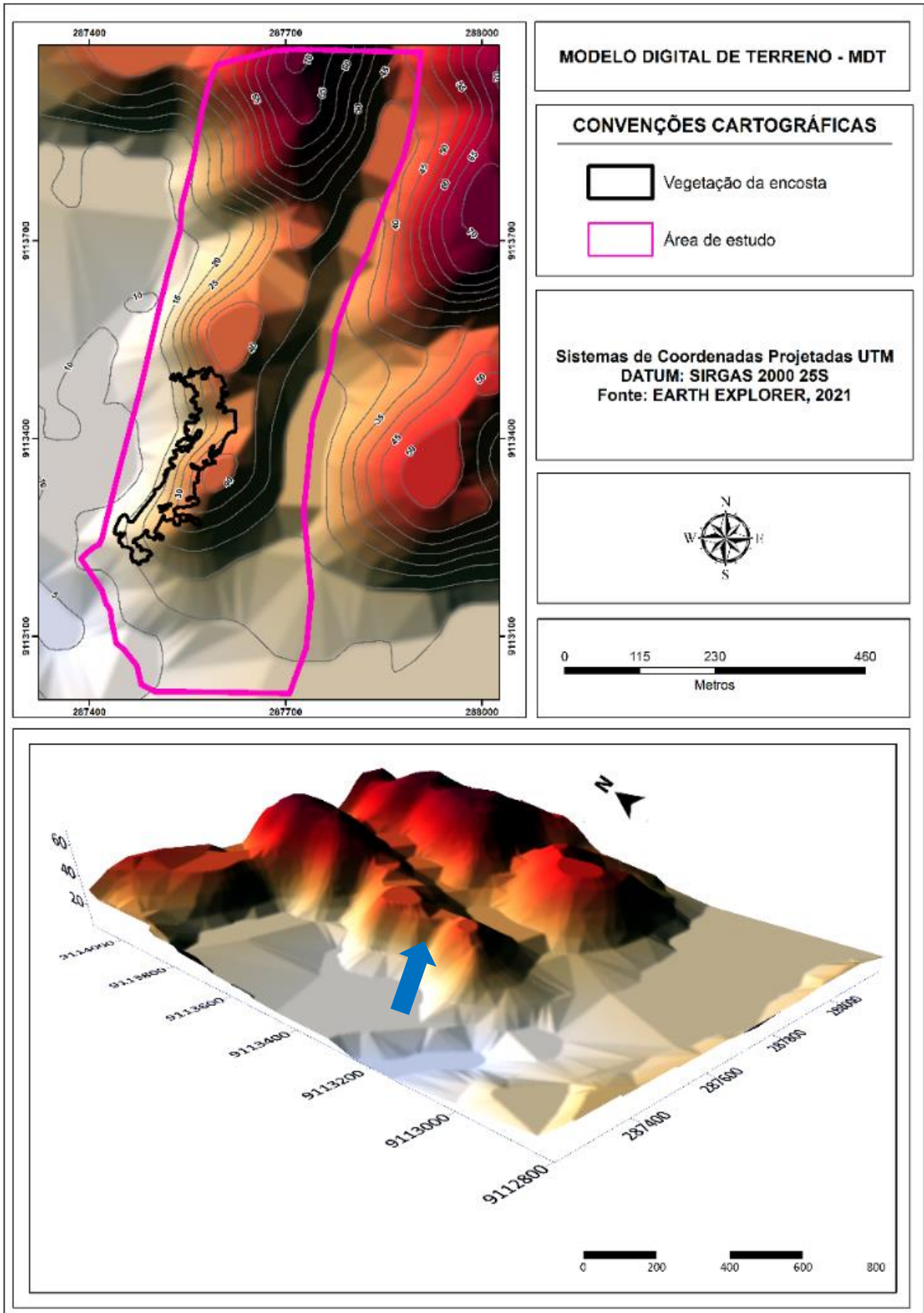
Fonte: Autor

Tabela 9 - Áreas das declividades

INTERVALO (%)	ÁREA DE ESTUDO		ÁREA DE VEGETAÇÃO	
	HA	%	HA	%
0 - 7	4,82	16,71	0,00	0,00
7 - 12	5,54	19,21	0,03	2,23
12 - 20	9,18	31,82	0,27	17,25
20 - 30	5,70	19,75	0,40	25,67
> 30	3,61	12,50	0,85	54,86
<b>Área Total</b>	<b>28,85</b>	<b>100,00</b>	<b>1,54</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Autor

Figura 59 - Modelo digital da área de estudo



Fonte: Autor

É possível observar que, aproximadamente, 65% da área de estudo apresenta declividade superior a 12%. Segundo os parâmetros de Ross (1994), a área é considerada de média fragilidade potencial, com risco de aparecimento de processos erosivos ou até mesmo deslizamentos de terra. Outro destaque percebido é que 54% da área de vegetação existente possui declividade superior a 30%, o que é considerado de fragilidade potencial muito alta.

Segundo o PMRR (2006), a encosta está classificada como grau de risco 3, sendo necessária uma reavaliação por parte do órgão responsável. Nesse contexto, o estudo também aponta para a necessidade de um monitoramento contínuo, pois o crescimento da ocupação urbana e os problemas ambientais e socioeconômicos levam a processos erosivos intensificados (MOURA-BUENO et al., 2018).

#### **5.4 Deslizamentos na área de estudo**

O ano de 2011 foi o que apresentou maior precipitação anual nos últimos 15 anos, com valor superior a 3200 mm/ano. Destaque para o mês de abril e maio, que apresentaram precipitações de 670 mm e 710 mm, respectivamente (APAC, 2022). Segundo a Prefeitura da Cidade do Recife (2011), a cidade passou por um período de chuvas intensas acima do esperado, porém as ações implantadas tiveram efeito positivo, pois não houve registro de incidentes graves na região.

Em maio de 2022, as precipitações pluviométricas ocorridas nos municípios da RMR superaram as médias mensais (Tabela 10). Somente em Ipojuca foi registrado um volume de 812,2 mm de chuva no mês, onde a média histórica é de 294,7 mm. Em Recife, o volume de chuva no mês de maio, que apresenta média histórica de 328,9 mm, correspondeu a 206% da média, tendo sido registrado, em 2022, um volume de 679,1 mm.

Tabela 10 - Precipitações real e esperada da RMR (maio/2022)

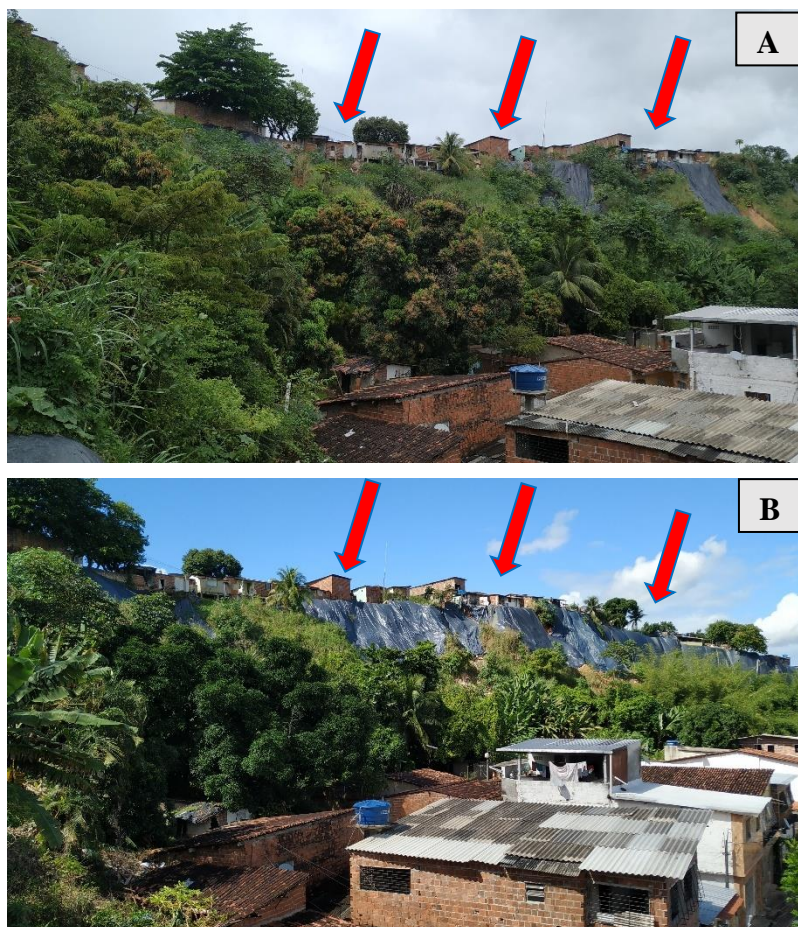
MUNICÍPIOS	Chuva Acumulada do mês de maio/2022 (mm)	Média climatológica do mês de maio (mm)	Percentual do acumulado em relação à média (%)
Abreu e Lima	634,6	316,8	200%
Araçoiaba	509,9	207,4	246%
Cabo de Santo Agostinho	692,9	288,4	240%
Camaragibe	684,5	294,6	232%
Igarassu	633,4	281,5	225%
Ilha de Itamaracá	527,7	290,3	182%
Ipojuca	812,2	294,7	276%
Itapissuma	501,7	276,9	181%
Jaboatão dos Guararapes	675,0	310,1	218%
Moreno	696,0	265,5	262%
Olinda	496,1	325,8	152%
Paulista	653,5	310,1	211%
<b>Recife</b>	<b>679,1</b>	<b>328,9</b>	<b>206%</b>
São Lourenço da Mata	506,6	243,8	208%

Fonte: Adaptado da APAC (2022b)

Em razão desses eventos extremos de chuvas, ocorreram diversos deslizamentos de terra e inundações em toda a Região Metropolitana do Recife, resultando em 128 mortes e mais de 9 mil pessoas desabrigadas, além de diversos problemas socioeconômicos, tornando-se, assim, o segundo maior desastre já registrado no estado (GLOBO, 2022). Segundo Melo (2021), a instabilidade de uma encosta devido ao processo de deslizamento de terra está associada a chuvas de alta intensidade.

Devido às ações antrópicas, às fortes chuvas e à alta declividade do terreno, foram registradas ocorrências que prejudicam a população da área de estudo. Para amenizar os riscos de deslizamento, a Defesa Civil adotou medidas não estruturais de colocação de lonas plásticas na encosta (Figura 60) e de interdição de casas, realocando os moradores para locais com mais segurança (Figura 61). Mesmo adotando estas medidas, foram registrados dois deslizamentos na área de estudo (Figura 62 e 63), com perdas de bens materiais e interdição de rua, mas sem vítimas fatais.

Figura 60 - Medidas não estruturais para evitar deslizamentos: set. 2021 (A); e jun. 2022 (B)



Fonte: Autor.

Figura 61 - Casas interditadas pela Defesa Civil (jun.2022)



Fonte: Autor.

Figura 62 - Deslizamento (jun.2022): área deslizada (A); e imóvel afetado (B)



Fonte: Autor.

Figura 63 - Deslizamento (jun.2022): área deslizada (A); e rua interditada (B)



Fonte: Autor.

## 5.5 Caracterização física

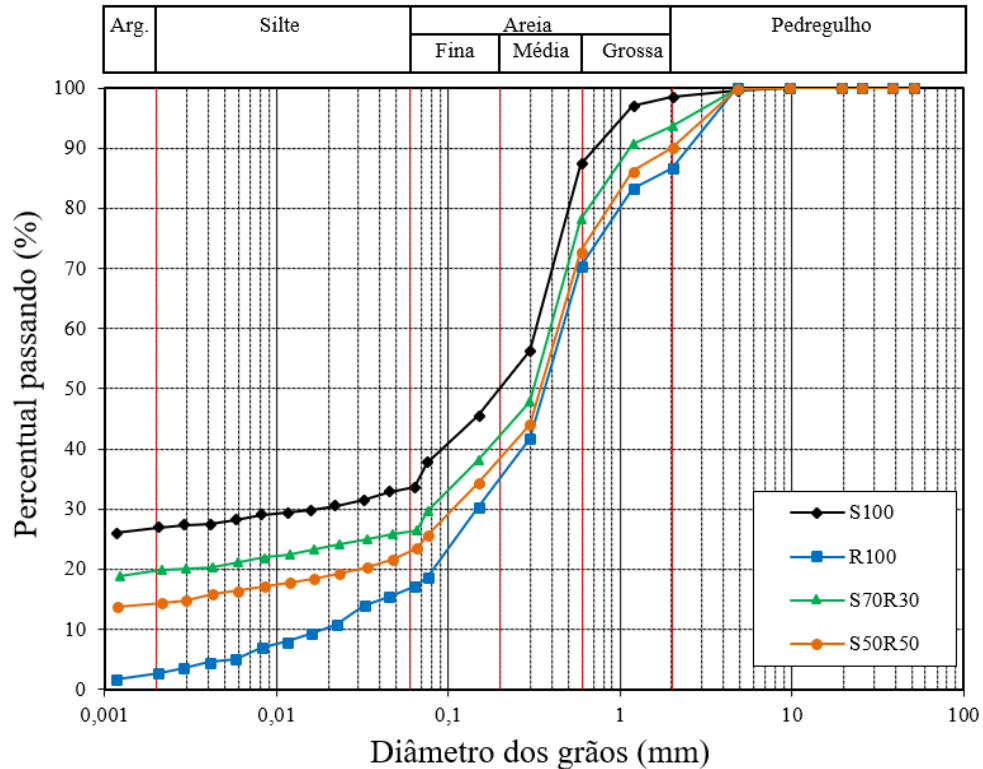
Este capítulo apresenta os resultados da caracterização física dos materiais e compósitos através dos ensaios de granulometria por sedimentação, densidade real dos grãos, limites de Atterberg e do comportamento laterítico com o uso da metodologia MCT.

### 5.5.1 Análise granulométrica

As curvas granulométricas das amostras do solo, RCC e dos compósitos são apresentadas na Figura 64. Na Tabela 11, é possível observar os percentuais para cada fração de tamanho dos

grãos, a relação silte/argila e os coeficientes de uniformidade e curvatura para os materiais e compósitos estudados.

Figura 64 - Curvas granulométricas dos materiais e compósitos



Fonte: Autor

Tabela 11 - Percentual do tamanho dos grãos dos materiais e compósitos

AMOSTRA	TEORES DOS GRÃOS (%)				RELAÇÃO (Silte/Argila)	Cu	Cc
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho			
S100	26,9	10,8	60,7	1,6	0,40	-	-
R100	2,7	15,8	68,1	13,4	5,83	21,0	3,05
S70R30	19,9	9,7	64,1	6,3	0,49	-	-
S50R50	14,4	11,2	64,3	10,1	0,79	-	-

Legenda: Cu = Coeficiente de uniformidade; e Cc = Coeficiente de curvatura.

Fonte: Autor

Observa-se que o solo é composto por areia, 60,7%, seguido de argila, 26,9%, e silte, 10,8%. Assim como o solo, os compósito S70R30 e S50R50 apresentaram proporções maiores de areia (64,1% e 64,3%), seguidos por argila (19,9% e 14,4%), silte (9,7% e 11,2%), porém aparecendo percentual considerável de pedregulhos finos (6,3% e 10,0%), devido à adição de RCC.

O RCC apresentou predominância de areia (68,1%), seguida de 15,8% de silte, 13,3% de pedregulho e um pequeno teor de argila (2,7%). Com os resultados apresentados, verifica-se que o aumento do teor do RCC aumenta os teores de areia e pedregulho e reduz o teor de argila do solo.

Como apresentado na Tabela 11, não foi possível calcular o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) do solo e dos compósitos, visto que o diâmetro efetivo (peneira que passa 10% da amostra) destes não é identificado. O RCC apresentou valores de coeficientes:  $C_u = 21$  e  $C_c = 3,05$ .

Verifica-se que o solo possui uma relação silte/argila de 0,40%. A EMBRAPA (2022) afirma que a relação silte/argila é um indicativo para o estágio de intemperismo de solos tropicais e conclui que solos com relação inferior a 0,70% possuem um alto grau de intemperismo e que são bons parâmetros indicativos para erodibilidade do solo (SOUSA; POLIVANOV; BARROSO, 2019).

Outro ponto verificado é que, quanto mais os resíduos são adicionados ao solo, os valores da relação silte/argila aumentam, visto que o RCC apresenta uma relação igual a 5,83%, próximos aos resultados encontrados por Pedrosa (2021), Silva (2020) e Nascimento (2019), que variaram entre 1,76 e 3,03.

A Tabela 12 apresenta a classificação dos materiais e compósitos de acordo com Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Através do SUCS, foi possível classificar o solo como areia argilosa (SC); o S70R30 foi classificado como areia siltosa-areia argilosa (SM-SC); e o RCC e o S50R50 foram classificados como areia siltosa (SM).

Tabela 12 - Classificação dos materiais e compósitos segundo o SUCS

AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO SUCS
S100	SC – Areia argilosa
R100	SM – Areia siltosa
S70R30	SM-SC – (Areia siltosa-areia argilosa)
S50R50	SM – Areia siltosa

Fonte: Autor



### 5.5.2 Análise da densidade real dos grãos

Os resultados da densidade real dos grãos do solo, RCC e dos compósitos são apresentados na Tabela 13, e variaram entre 2,562 e 2,629. Para Carvalho (2004), a densidade de grãos depende principalmente da composição química e mineral do solo.

Tabela 13 - Densidade real dos materiais e compósitos

AMOSTRA	DENSIDADE REAL
S100	2,629
R100	2,562
S70R30	2,599
S50R50	2,589

Fonte: Autor.

A densidade real dos grãos encontrada para o RCC está próxima dos valores obtidos por Almeida (2021), Nascimento et al. (2021), Barreto (2020), Portela (2019) e Silva, Fucal e Ferreira (2019), em que variaram entre 2,49 e 2,64.

### 5.5.3 Análise dos limites de Atterberg

A Tabela 14 mostra os valores obtidos nos ensaios de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e do Índice de Plasticidade (IP). É possível perceber que a amostra do RCC (R100) não possui limites de liquidez e plasticidade e se comportam como materiais não plásticos. O solo (S100) apresenta percentuais dos limites e índice de plasticidade, sendo classificado como moderadamente plástico.

Tabela 14 - Limites de Atterberg dos materiais e compósitos

AMOSTRA	LL (%)	LP(%)	IP (%)	CLASSIFICAÇÃO IAEG (1979)
S100	31,4	14,8	16,6	Moderadamente plástico
R100	NL	NP	-	Não plástico
S70R30	24,7	18,3	6,4	Levemente plástico
S50R50	22,7	19,3	3,4	Levemente plástico

Fonte: Autor.

Portela (2019) descreve que, devido ao alto teor de areia na composição do RCC, um baixo percentual de componentes de ligação leva a não plasticidade do material. Através disto, é

possível observar que a adição do RCC ao solo diminui o LL e aumenta o LP, reduzindo o IP das misturas, tornando, então, o S70R30 e o S50R50 materiais levemente plásticos. Este fenômeno também pode ser observado nos estudos de Macedo (2013) e Santos (2020), que também utilizaram RCC para melhoramento de solo.

#### 5.4.4 Análise do MCT

A Tabela 15 apresenta o teor de umidade (W), o número máximo de golpe, a altura (h) final após a compactação dos corpo de prova, o valor máximo da massa específica aparentemente seca (MEAS) e os valores de perda por imersão (PI) de cada corpo de prova cilíndrico utilizado nos ensaios.

Tabela 15 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios.

AMOSTRA	W (%)	MÁXIMO GOLPE	h final (mm)	MEAS (g/cm <sup>3</sup> )	PI (%)
S100	17,5	8	49,97	1,718	148
	15,9	8	48,35	1,800	150
	14,1	12	48,28	1,827	117
	11,9	48	46,51	1,936	0,0
	9,9	192	46,38	1,978	0,0
R100	18,0	12	49,60	1,722	118
	15,5	48	47,53	1,836	103
	13,7	128	47,25	1,895	95
	11,6	256	46,78	1,915	95
	10,0	256	46,24	1,952	99
S70R30	17,3	8	49,57	1,735	96
	14,9	12	47,66	1,841	75
	12,9	16	47,67	1,872	130
	11,1	64	46,38	1,917	87
	8,7	256	46,12	1,935	18
S50R50	16	8	48,96	1,774	58
	14,1	12	48,31	1,828	89
	12,1	24	47,51	1,891	115
	10,8	96	46,64	1,950	86
	8,9	256	46,25	1,959	27

Fonte: Autor

Os resultados da perda de imersão e dos coeficientes, que são parâmetros necessários para a classificação do MCT, são apresentados na Tabela 16. Salienta-se que, como as amostras obtiveram uma altura final menor que 53 mm, o valor do PI foi determinado na curva do miniMCV, com o valor igual a 15 (gráfico miniMCV para o eixo das abscissas e PI no eixo das ordenadas).

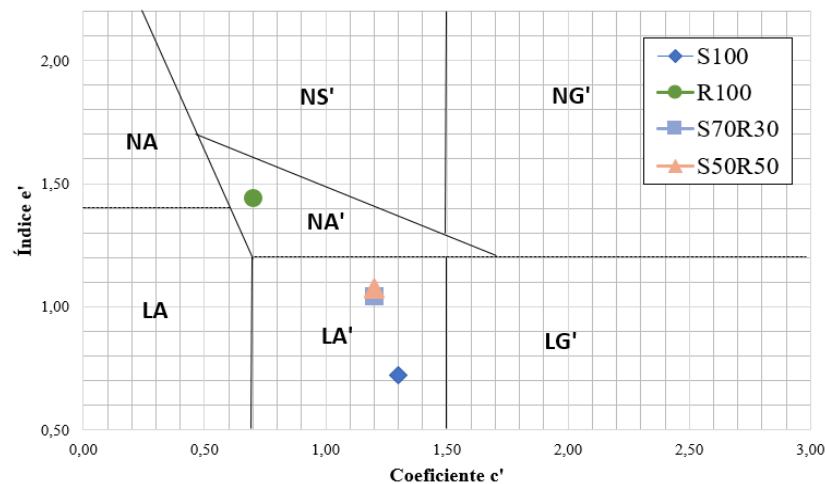
Tabela 16 - Parâmetros obtidos nos ensaios

AMOSTRA	PI (%)	COEFICIENTES		Índice e'
		c'	d'	
S100	0,0	1,30	53	0,72
R100	100	0,7	10	1,44
S70R30	75	1,20	52	1,04
S50R50	80	1,20	46	1,07

Fonte: Autor

A Figura 65 apresenta o ábaco para classificação MCT. O solo (S100) apresentou comportamento de solo arenoso laterítico (LA'), isso quer dizer que o solo é um material que tem uma boa característica para compactação, pois, de acordo com Nogami e Villibor (1995), é um material recomendado para camada de proteção à erosão, obras viárias (como base de pavimento de vias de baixo volume de tráfego), reforço de subleito, subleito compactado e corpo de aterro compactado.

Figura 65 - Ábaco com a classificação MCT dos materiais e compósitos



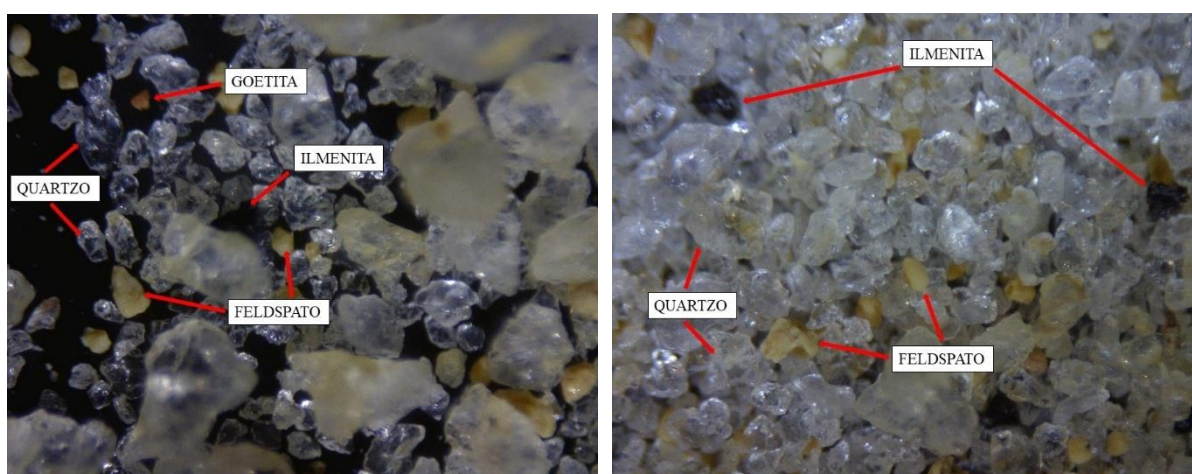
Fonte: Adaptado de Nogami e Villibor (1995)

Pode-se observar, também, que o RCC (R100) apresenta comportamento de solo arenoso não laterítico (NA'). Contudo, quando substituído o solo por RCC, os compósitos S70R30 e S50R50 continuaram com comportamento de solo arenoso laterítico (LA'), mostrando que os compósitos, nestas proporções, podem ser uma alternativa para reutilização dos RCC, não alterando o comportamento do solo. Este fenômeno também foi observado no estudo de Macedo (2013).

## 5.5 Caracterização mineralógica

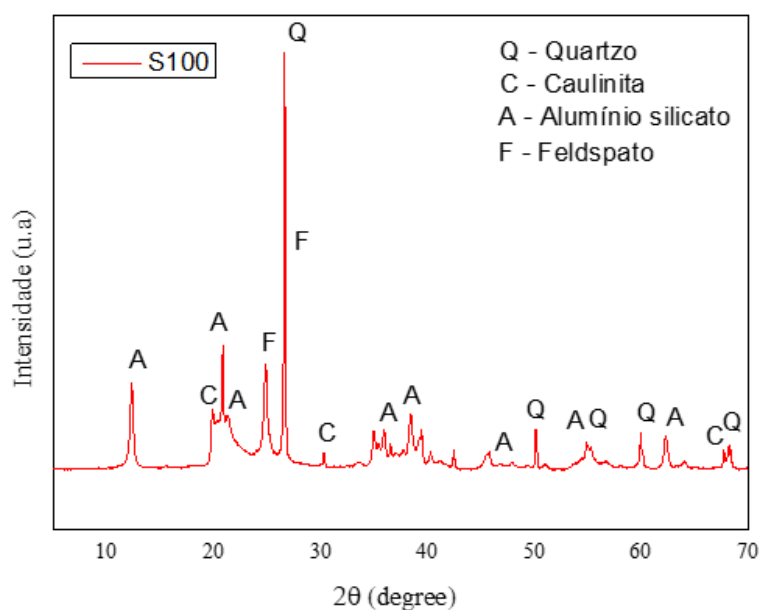
Com o uso da lupa binocular, foi realizada a caracterização mineralógica da fração granular dos materiais. Foi possível observar a presença de minerais, como o feldspato, ilmenita, goetita, e predominância de quartzo no solo (Figura 66). Pela difratometria de raios X, a fração de argila do solo apresentou picos de quartzo, caulinita, alumínio silicatado e feldspato, como mostra a Figura 67, em que o mineral quartzo apresentou o maior pico.

Figura 66 - Mineralogia do Solo (Fração granular)



Fonte: Autor

Figura 67 - Mineralogia do Solo (Fração de argila)



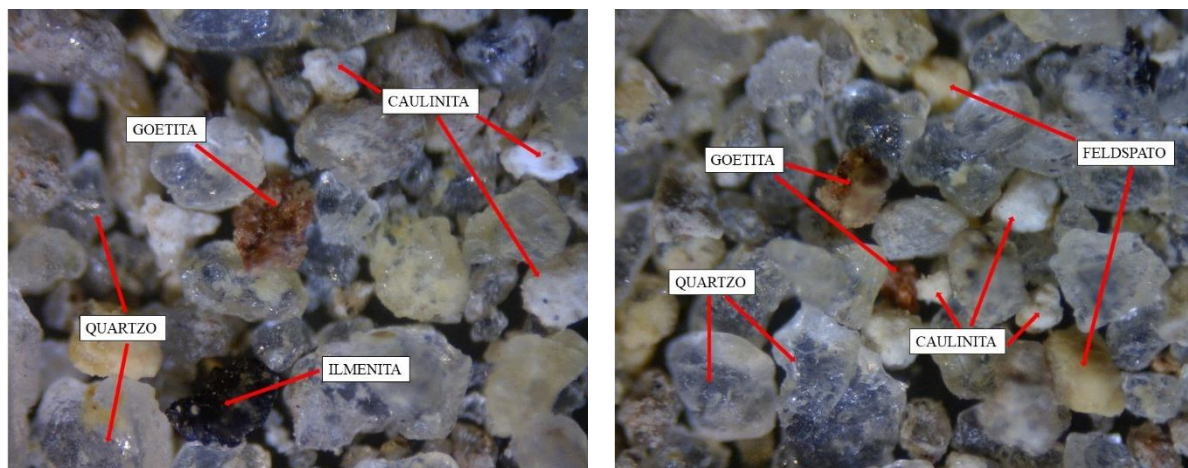
Fonte: Autor

Segundo Fontoura, Coutinho e Silva (2023), a ação do intemperismo nos minerais e solo interferem nos processos de movimento de massa. O quartzo é um material muito resistente às intempéries e é um dos minerais primário que constitui as rochas, podendo estar presente na maioria dos solos (KESKINEN et al., 2022; SURYANI et al., 2021; SCARIOT, 2018). Quando o solo é originado de uma rocha muito rica em quartzo, é provável que o solo apresente característica arenosa (PORTELA, 2019). No entanto, quando a rocha de origem do solo é rica em feldspato, o solo pode apresentar textura argilosa.

O feldspato é um mineral presente nas rochas, sendo menos estável ao intemperismo (FERNANDES, 2022; SANTOS et al., 2021). É composto por silicatos de alumínio combinados com cálcio, sódio, potássio e bário (LIRA; NEVES, 2013), e o processo químico do intemperismo dos feldspatos originam a caulinita (FONTOURA; COUTINHO; SILVA, 2023). O mineral ilmenita é constituído de cristais de óxidos de titânio e ferro e tem boa resistência ao intemperismo (MAIA, 2018; NASCIMENTO et al., 2018).

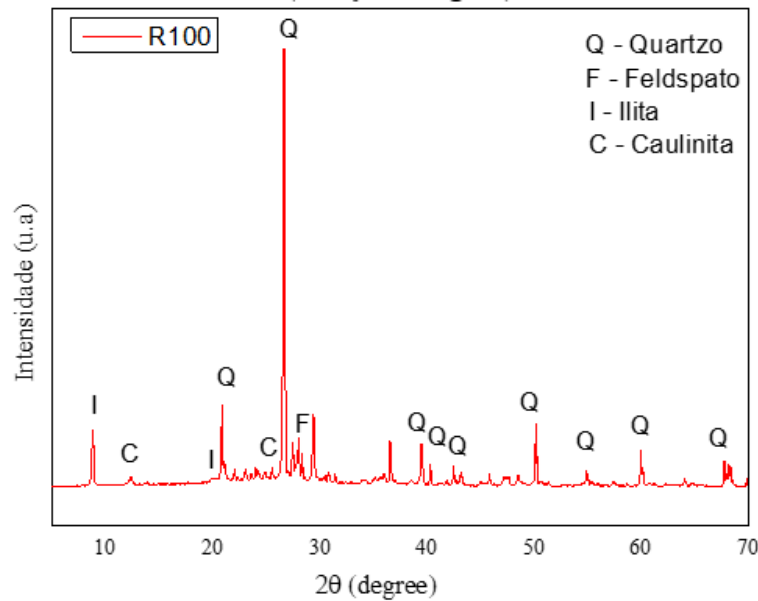
Na fração granular do RCC, foi identificada a presença de minerais, como quartzo, goetita, ilmenita e caulinita (Figura 68). Na fração de argila do RCC (Figura 69), foram encontrados picos de argilominerais de quartzo, feldspato, ilita e caulinita.

Figura 68 - Mineralogia do RCC (Fração granular)



Fonte: Autor

Figura 69 - Mineralogia do RCC (Fração de argila)



Fonte: Autor

Esses minerais, normalmente, são encontrados no RCC devido à relação com a areia utilizada na composição do concreto e da argamassa (SOUZA; RUDNICK; LUKIANTCHUKI, 2020). O mineral caulinita, quando encontrado no RCC, revela a presença de materiais cerâmicos, pois é o principal constituinte do mineral caulim (NASCIMENTO, 2019).

## 5.6 Caracterização química

Ao analisar o pH dos materiais (Tabela 17) em água destilada, foi observada uma variação entre 5,47 e 9,08, enquanto o pH em solução com KCl ficou entre 4,7 e 8,9. Desta maneira, o solo apresenta um pH de acidez moderada a leve, enquanto o RCC tem um pH considerado alcalino. As misturas dos materiais S70R30 e S50R50 foram classificados de alcalinidade leve a moderada.

Tabela 17 - Valores de pH em água e em KCl dos materiais e compósitos

AMOSTRA	pH em KCl	pH em água	$\Delta$ pH	CLASSIFICAÇÃO
S100	4,7	5,47	(-) 0,77	Muito fortemente ácido
R100	8,90	9,12	(-) 0,22	Fortemente alcalino
S70R30	7,45	7,59	(-) 0,14	Ligeiramente alcalino
S50R50	7,78	7,90	(-) 0,12	Ligeiramente alcalino

Fonte: Autor.

Segundo Anumata et al. (2021), amostras que apresentam pH ácido possuem um alto teor de óxido de sílica. É importante mencionar que solos da região semiárida com pH neutro tendem a apresentar baixo intemperismo (SANTOS et al. 2021). A variação negativa na diferença dos pH ( $\Delta$ pH), apontam a presença de alumínio trocável e presença de sílica, argila e predominância de cargas negativas na superfície coloidal nos materiais (FONTOURA; COUTINHO; SILVA, 2023; OLIVEIRA et al., 2021). Corroborando com os resultados encontrados no teste de DRX, revelando a presença de argilominerais ricos em sílica e alumínio, como illita e caulinita.

Quanto à análise de salinidade do substrato extraído, foram verificados os teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio, dissolvidos na água e usados para calcular os parâmetros de análise de dispersão, cujos valores são apresentados na Tabela 18. Observa-se que o percentual de sódio trocável encontrado no solo foi de 20,3%, sendo maior que os percentuais do RCC e dos compósitos, pois apresentaram uma quantidade elevada de cálcio nestes materiais.

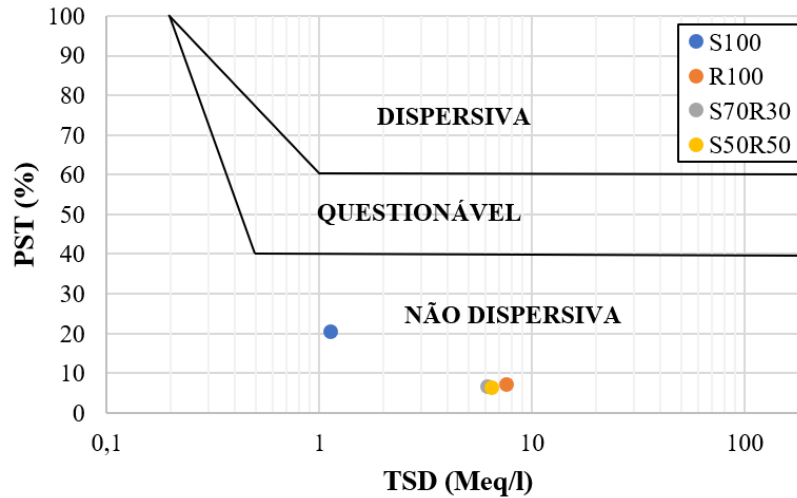
Tabela 18 - Parâmetros químicos dos materiais e compósitos

AMOSTRA	Teores de Sais (meq/L)				TSD	PST (%)	RAS
	Ca	Mg	Na	K			
S100	0,699	0,022	0,231	0,184	1,14	20,3	0,384
R100	5,789	0,677	0,535	0,670	7,67	7,0	0,298
S70R30	4,940	0,433	0,413	0,422	6,21	6,7	0,252
S50R50	5,090	0,529	0,422	0,504	6,54	6,4	0,252

TSD = Total de sais dissolvidos; PST = Porcentagem de Sódio Trocáveis; e RAS = Sólidos Totais Dissolvidos.  
Fonte: Autor

Como mostra a Figura 70, a partir do método proposto por Sherard, Dunnigan e Decker (1976), verificou-se que o solo, o RCC e os compósitos se enquadram na classificação da zona não dispersiva, corroborando com os resultados encontrados na metodologia MCT, que são materiais recomendados para camada de proteção à erosão.

Figura 70 - Relação entre o PST e o TSD dos materiais e compósitos



Fonte: Adaptado de Sherard, Dunnigan e Decker (1976)

Quanto à análise de fluorescência de raios X, verifica-se que os materiais e os compósitos (solo+RCC) apresentam predominância da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), equivalente a 50% da composição dos materiais, conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19 - Percentuais de óxidos presentes nos materiais e compósitos

<b>S100</b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Cl</b>
	-	36,98	49,14	0,24	0,11	0,01
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SrO</b>	<b>P.F.</b>
	0,24	0,18	1,10	7,03	0,04	4,93
<b>R100</b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Cl</b>
	1,26	16,27	51,88	0,62	0,86	0,05
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SrO</b>	<b>P.F.</b>
	2,76	17,56	-	5,10	0,06	3,57
<b>S70R30</b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Cl</b>
	0,17	32,81	50,82	0,27	0,27	0,03
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SrO</b>	<b>P.F.</b>
	0,72	3,34	0,99	6,52	0,04	4,03
<b>S50R50</b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Cl</b>
	0,31	29,98	50,27	0,39	0,38	0,03
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SrO</b>	<b>P.F.</b>
	1,13	6,21	1,00	6,24	0,04	4,01

Legenda: P.F. = Perda ao fogo.

Fonte: Autor.

Corroborando com pesquisas de Mello (2022), Eduarda Alves e Álvares et al. (2021), Almeida (2021) e Bernardon et al. (2020), o RCC é composto, principalmente, por óxido de silício (51,88%), óxido de cálcio (17,56%) e óxido de alumínio (16,27%). 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 pode favorecer o ganho de resistência (NASCIMENTO, 2019; PORTELA et al., 2021).

O solo é predominantemente constituído por  $\text{SiO}_2$  (49,14%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (36,98%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (7,03%), resultados estes compatíveis aos encontrados nos ensaios de mineralogia, tendo em vista que o material é basicamente constituído por quartzo (FONTOURA; COUTINHO; SILVA, 2023). Confirmando, também, os resultados encontrados no ensaio de MCT, pois, segundo Araújo e Farias; Oliveira Araújo; Guedes Rodrigues (2023), Nogami e Villibor (1995); e Teixeira et al. (2000), os solos com comportamento lateríticos são constituídos, basicamente, por quartzo, alumínio e óxidos de ferro.

A substituição do RCC no solo, compósitos S70R30 e S50R50, não alterou a composição química, quanto à predominância, contudo, aumentou os percentuais de  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$  e diminuiu os percentuais de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , porém, como visto no ensaio do MCT, a mistura continuou com o mesmo comportamento laterítico visto para o solo.

Segundo Pedrosa (2021), o elemento silício (Si) está diretamente ligado ao processo de intemperismo sofrido pelo solo, pertencendo ao grupo dos minerais silicatados responsáveis pela formação de rochas e sedimentos, como areia, silte e argila. Rocha (2018) afirma que grandes quantidades de óxidos de ferro e alumínio indicam ação de intemperismo, contudo, podem indicar solos com alto grau de cimentação, interferindo no ganho de resistência do solo.

## **5.7 Caracterização mecânica**

Esta seção mostra os resultados da caracterização mecânica dos materiais e compósitos através dos ensaios de compactação, resistência ao cisalhamento e da resistência à compressão simples.

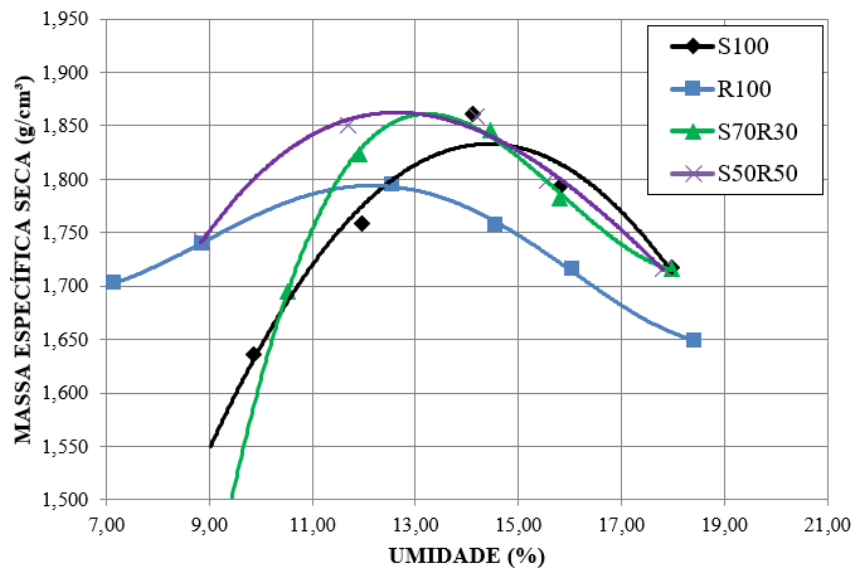
### **5.7.1 Compactação**

As curvas de compactação dos solo, RCC e compósitos estão representadas na Figura 71. Observa-se que o solo (S100) apresenta uma massa específica seca máxima de  $1,833 \text{ g/cm}^3$  a uma umidade ótima de 14,30%. O RCC (R100), quando comparado com o solo, apresenta uma massa específica seca máxima inferior, de  $1,785 \text{ g/cm}^3$ , com uma umidade ótima relativamente

próxima, com 12,00%. Os resultados encontrados para o RCC estão próximos dos valores mencionados nas pesquisas de Almeida (2021), Nascimento (2019), Portela (2019) e Macedo (2013), que variaram entre 1,710 g/cm<sup>3</sup> e 1,892 g/cm<sup>3</sup>; e 12,39% e 15,5%, respectivamente.

A Figura 71 também apresenta a curva de compactação para os compósitos de solo+RCC. Verifica-se que a adição do RCC aumenta a massa específica seca máxima e reduz a umidade ótima, quando comparada com os resultados dos materiais. Para o compósito S70R30, a massa específica seca máxima e a umidade ótima foram de 1,863 g/cm<sup>3</sup> e 13%, respectivamente. O compósito S50R50 apresentou a mesma massa específica seca máxima (1,863 g/cm<sup>3</sup>) e, praticamente, a mesma umidade ótima (12,6%). Estes comportamentos são semelhantes aos obtidos por Hidalgo et al. (2023), Pereira, Amorin e Motta (2022), Pedrosa (2021), Pereira (2021), Silva (2020), Souza, Rudnick e Lukiantchuki (2020) e Pessanha, Martins e Rodrigues (2019).

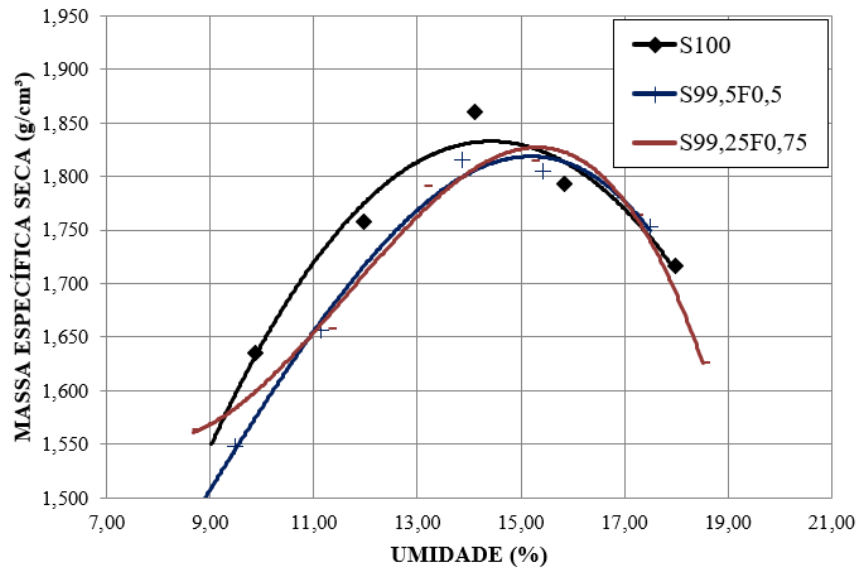
Figura 71 - Curvas de Compactação (S100; R100; S70R30; e S50R50)



Fonte: Autor

A Figura 72 apresenta as curvas de compactação do solo e dos compósitos formados pelo solo e fibra. O compósito S99,5F0,5 apresentou umidade ótima de 15,2% e massa específica seca máxima de 1,820 g/cm<sup>3</sup>. A amostra S99,25F0,75 apresentou umidade ótima de 15,30% e massa específica seca máxima de 1,827 g/cm<sup>3</sup>. Observa-se que houve um aumento na umidade ótima e uma leve redução na massa específica seca máxima, quando comparado com o solo puro e que corrobora com os resultados encontrados por Rocha (2019).

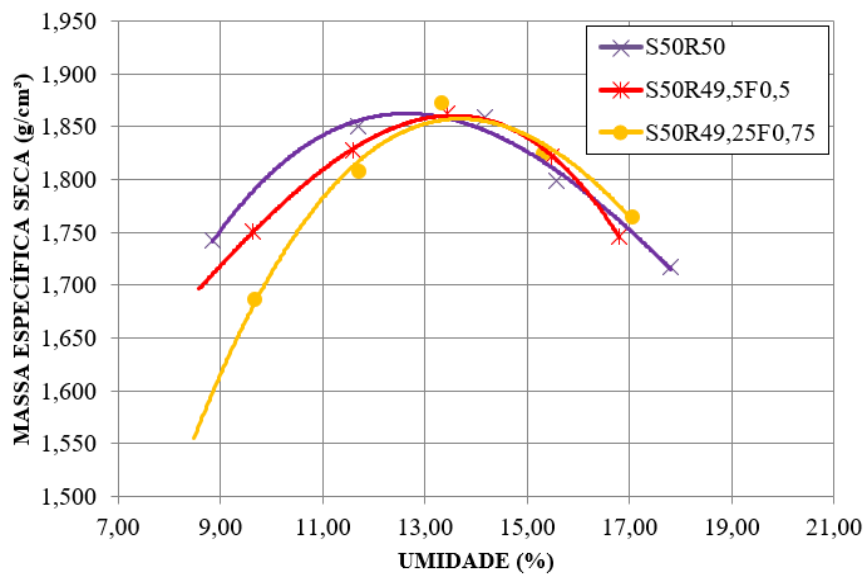
Figura 72 - Curvas de Compactação (S100; S99,5F0,5; e S99,25F0,75)



Fonte: Autor

Este mesmo comportamento foi identificado nos compósitos S50R50, quando adicionado às fibras (Figura 73). Quanto mais fibras foram adicionadas, maior foi a umidade ótima do compósito, 13,5% (S50R49,5F0,5) e 13,8% (S50R49,25F0,75). Contudo, a massa específica seca máxima permaneceu, praticamente, a mesma, no valor de 1,86 g/cm<sup>3</sup> para ambos os compósitos.

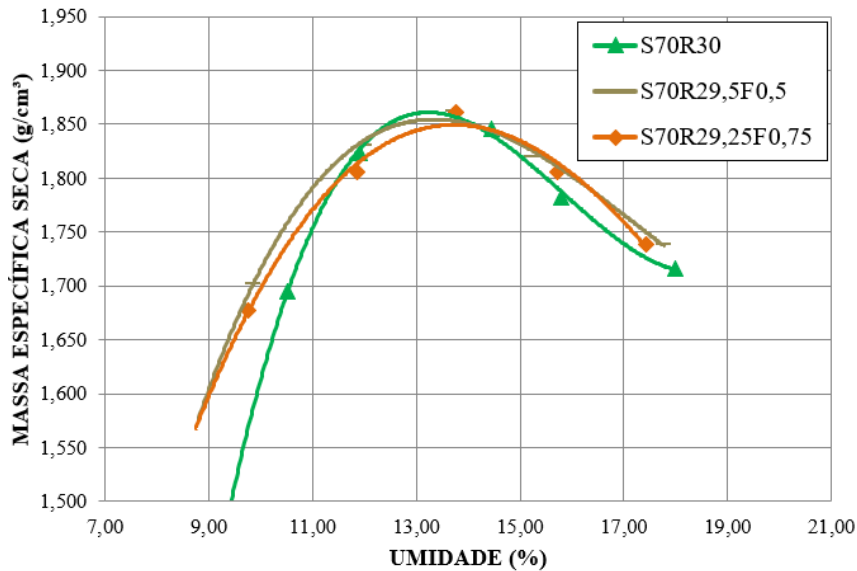
Figura 73 - Curvas de Compactação (S50R50; S50R49,5F0,5; e S50R49,25F0,75)



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 74 que a adição da fibra nos compósitos com 70% solo e 30% RCC apresentou uma leve alteração na massa específica seca máxima e na umidade ótima, pois os compósitos S70R29,5F0,5 e S70R29,25F0,75 apresentaram densidade seca máxima de 1,855 g/cm<sup>3</sup> e 1,850 g/cm<sup>3</sup>; e umidade ótima de, 13,4% e 13,7%, respectivamente.

Figura 74 - Curvas de Compactação (S70R30; S70R29,5F0,5; e S70R29,25F0,75)



Fonte: Autor

Segundo Abbaspour, Aflaki e Moghadas Nejad (2019), a redução na massa específica seca máxima do compósito pode estar associada à fibra, pois apresenta menor peso específico. Diversos autores afirmam que as fibras misturadas em solo diminuem a massa específica seca máxima e aumentam a umidade ótima (FAUSTINO, 2022; VALIPOUR; SHOURIJEH; MOHAMMADINIA, 2021; SANTOS, 2020; TRAN; SATOMI; TAKAHASHI, 2018).

Os valores da umidade ótima e da massa específica seca máxima das amostras podem ser analisados na Tabela 20. Verifica-se que a adição do RCC e da fibra interferem tanto na umidade ótima quanto na densidade seca máxima. Comparando os resultados, pode-se observar que o compósito S50R50 apresentou melhores parâmetros de compactação, com maior densidade seca máxima (1,863 g/cm<sup>3</sup>) para um menor teor de umidade ótima (12,6%), dentre os corpos de prova ensaiados. Ao adicionar a fibra, o ganho de densidade seca máxima ( $\gamma_{sec,max}$ ) não foi tão significativo e a umidade ótima (wot) foi maior, como foi observado no compósito S50R49,5F0,5 ( $\gamma_{sec,max}$  = 1,860 g/cm<sup>3</sup> e wot = 13,5%).

Tabela 20 - Umidades ótimas e massa específica seca dos materiais e compósitos

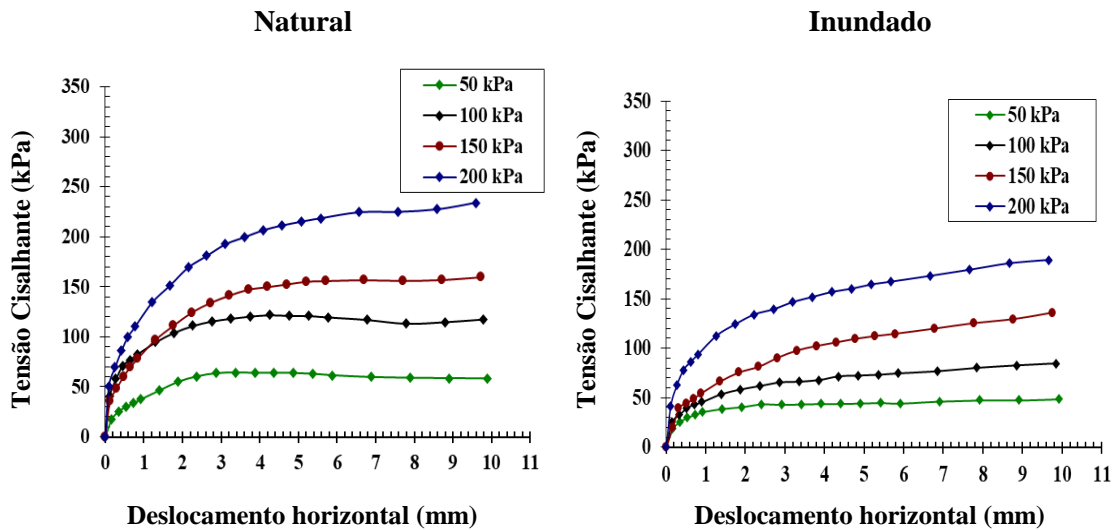
AMOSTRAS	W <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{\text{sec max}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
S100	14,30	1,833
R100	12,00	1,785
S99,5F0,5	15,20	1,820
S99,25F0,75	15,30	1,827
S70R30	13,00	1,863
S70R29,5F0,5	13,40	1,855
S70R29,25F0,75	13,70	1,850
S50R50	12,60	1,863
S50R49,5F0,5	13,50	1,860
S50R49,25F0,75	13,80	1,857

Fonte: Autor.

### 5.7.2 Análise da resistência ao cisalhamento do solo

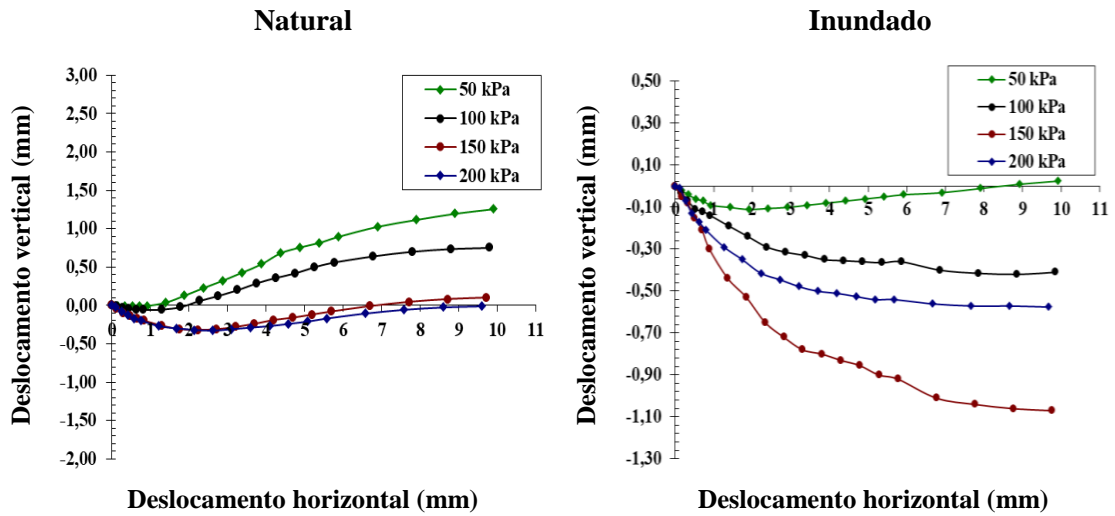
As Figuras 75 e 76 apresentam as curvas de Tensão Cisalhante (kPa) x Deslocamento Horizontal (mm) e Deslocamento Vertical (mm) x Deslocamento Horizontal (mm), respectivamente, das amostras indeformadas do solo no estado natural e inundado.

Figura 75 - Curvas Tensão Cisalhante x Deformação horizontal do solo indeformado



Fonte: Autor

Figura 76 - Curvas Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal do solo indeformado



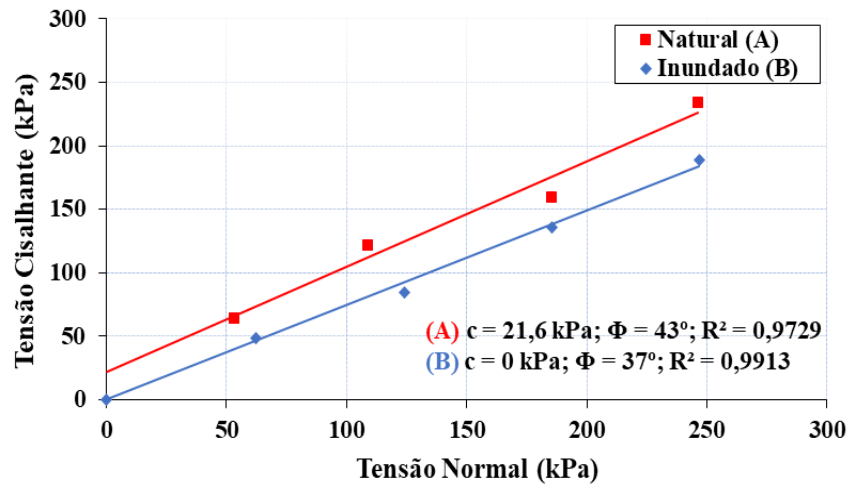
Fonte: Autor

Verifica-se, no gráfico de Tensão Cisalhante (kPa) x Deslocamento Horizontal (mm), Figura 75, que o solo apresenta tensões crescentes com o deslocamento nas duas condições, com exceção das tensões de 50 e 100 kPa das amostras do solo natural, que, a partir de 4 mm de deslocamento, apresentam tensões decrescentes.

As curvas de Deslocamento Vertical (mm) x Deslocamento Horizontal (mm), Figura 76, do solo natural apresentaram aumento de volume, quando os corpos de prova foram submetidos a tensões verticais de 50 kPa e 100 kPa. Nas tensões maiores, o comportamento foi de compressão. Na condição inundada, todas as curvas apresentaram comportamento de compressão, com tendência de expansão na tensão de 50 kPa.

As envoltórias estão apresentadas na Figura 77. Verifica-se que a inundação influencia de forma significativa os parâmetros de resistência ao cisalhamento deste solo, causando uma redução de 100% na coesão e de 13,95% no ângulo de atrito. Segundo Bastos (1999), quando a variação na coesão for maior que 85%, é um indicativo que o solo pode ser considerado erodível, e diversos estudos utilizam este parâmetro para esta finalidade, tais como: Bandeira et al. (2021), Da Silva et al. (2019) e Sousa, Polivanov e Barroso (2019).

Figura 77 - Envoltórias de resistência do solo indeformado: Natural (A); e Inundado (B)



Fonte: Autor

A Tabela 21 apresenta as condições iniciais e finais dos corpos de prova e os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras analisadas.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de cisalhamento.

CONDIÇÃO	Tensão (kPa)	W <sub>0</sub> (%)	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e <sub>0</sub>	S <sub>0</sub> (%)	S <sub>f</sub> (%)	c (kPa)	Φ (°)
Natural	50	10,73	1,856	0,57	49,62	-	21,6	43
	100	10,39	1,854	0,56	48,47	-		
	150	10,52	1,855	0,57	48,85	-		
	200	10,35	1,860	0,56	48,60	-		
Inundado	50	10,73	1,896	0,54	52,69	100	0	37
	100	10,39	1,902	0,53	51,96	100		
	150	10,52	1,788	0,63	44,22	100		
	200	10,35	1,953	0,49	56,02	100		

Legenda: W<sub>0</sub> - umidade do solo; e<sub>0</sub> - índice de vazios inicial; S<sub>0</sub> - grau de saturação inicial; S<sub>f</sub> - grau de saturação final; c - coesão; e Φ - ângulo de atrito.

Fonte: Autor

Diversos estudos foram realizados com amostras de solo na RMR proveniente de Formação de Barreiras com característica areia argilosa (SC). A Tabela 13 apresenta parâmetros de resistência ao cisalhamento, permitindo um melhor entendimento do solo local com esta característica. Percebe-se que o solo apresenta comportamento semelhante aos resultados das pesquisas de Santos (2001), Lafayette (2006), Souza (2014), Coutinho, Morais e Oliveira (2020) e Bezerra (2022).

Tabela 22 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos provenientes da Formação Barreiras da RMR.

LOCAL	REFERÊNCIA	CONDIÇÃO	c (kPa)	$\Phi$ (°)
Recife	<b>Esta Pesquisa</b>	Natural	21,6	43
		Inundado	0	37
	Coutinho et al. (1999) e Santos (2001)	Natural	13	41
		Inundado	7,7	35,7
	Lima (2002)	Natural	28 - 84	31 - 34
		Inundado	1-10	16 - 32
	Bandeira (2010)	Inundado	0-15	28,6 - 35,3
	Meira (2008)	Natural	1 - 4,2	28 - 34
		Inundado	0,4 - 3,5	23 - 29
	Santana (2006)	Natural	20,28	31,8
		Inundado	0	36,1
	Coutinho, Morais e Oliveira (2020)	Natural	1 - 27	28 - 36
		Inundado	0 - 9,0	23 - 36
	Fontoura, Coutinho e Morais (2021)	Natural	10,53	34,40
Natural		2,00	40,48	
Camaragibe	Bandeira (2010)	Inundado	0	35
	Magalhães (2013)	Natural	13 - 27	30 - 35
		Inundado	3,3-8,7	30,32
	Souza (2014)	Natural	7 - 28	32 - 35
Inundado		1 - 6	30 - 32	
Cabo de Santo Agostinho	Lafayette (2006)	Natural	33 - 56	33 - 36
		Inundado	1,5 - 1,8	33 - 35
Ilha de Itamaracá	Bezerra (2022)	Natural	44,67	35
		Inundado	8,33	30

Fonte: Adaptado de Bandeira (2010) e Bezerra (2022)

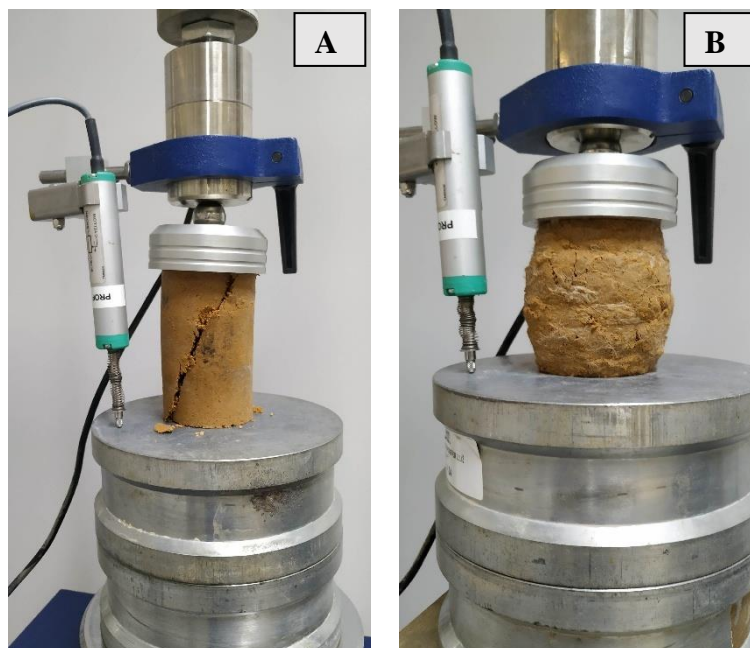
### 5.7.3 Análise da resistência à compressão simples (RCS)

As amostras de solo, RCC e compósitos foram rompidas para determinação da resistência à compressão simples (RCS), com isso, foram obtidos os valores correspondentes às idades de rompimento de 07, 28, 60 e 120 dias.

A Figura 78 mostra as formas de ruptura das amostras após a aplicação de carga. Percebe-se que as amostras sem fibra apresentaram ângulo de ruptura bem definido, na ordem de 60°, semelhante a materiais frágeis. Por outro lado, as amostras com fibra não apresentaram plano de ruptura bem definido, indicando um embarrigamento, típico de um comportamento de materiais dúcteis.



Figura 78 - Rompimento das Amostras: Sem Fibra (A); e Com Fibra (B)

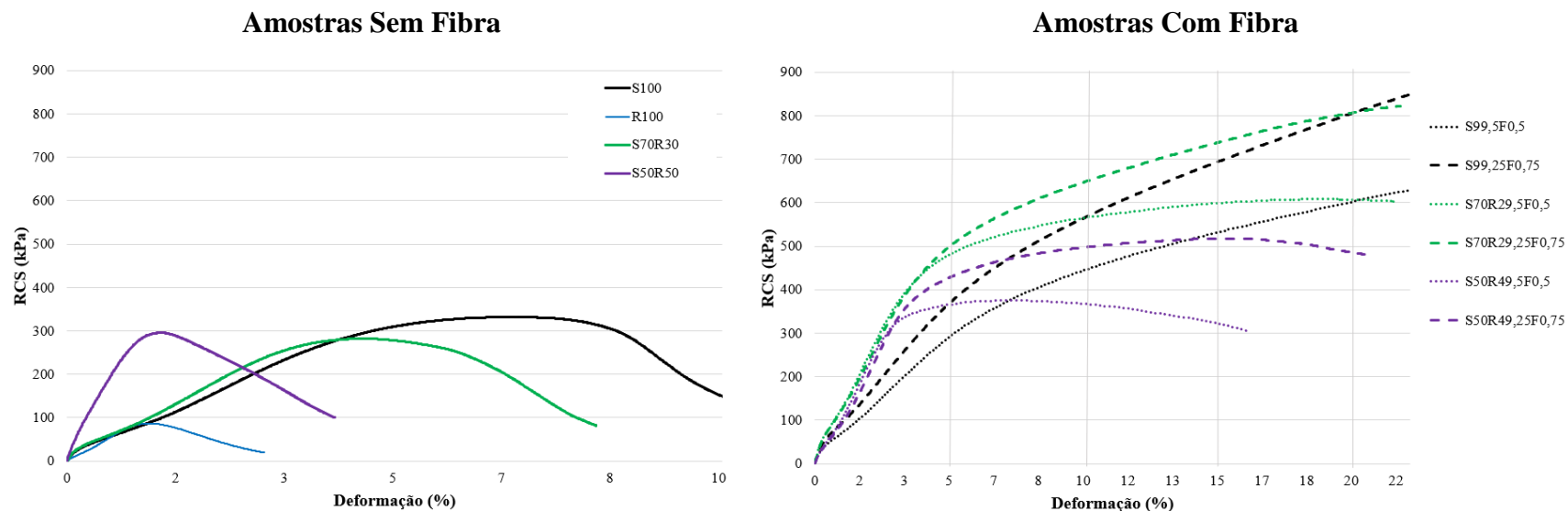


Fonte: Autor

As curvas de tensão e deformação dos compósitos, nas idades de ruptura de 07, 28, 60 e 120 dias, estão representadas nas Figuras 79 a 82, respectivamente. As Tabelas 23 a 26 mostram os valores da RCS a partir da deformação dos compósitos com fibra para cada idade de ruptura.

Observa-se que as amostras de solo com a fibra de polipropileno apresentam um comportamento dúctil, pois há crescimento da resistência à compressão contínuo, associado ao aumento da deformação, comportamento semelhante ao encontrado por Ali et al. (2020), Liu et al. (2020) e Rocha (2019). No entanto, as curvas dos compósitos sem a fibra demonstram picos de resistência.

Figura 79 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (07 dias)



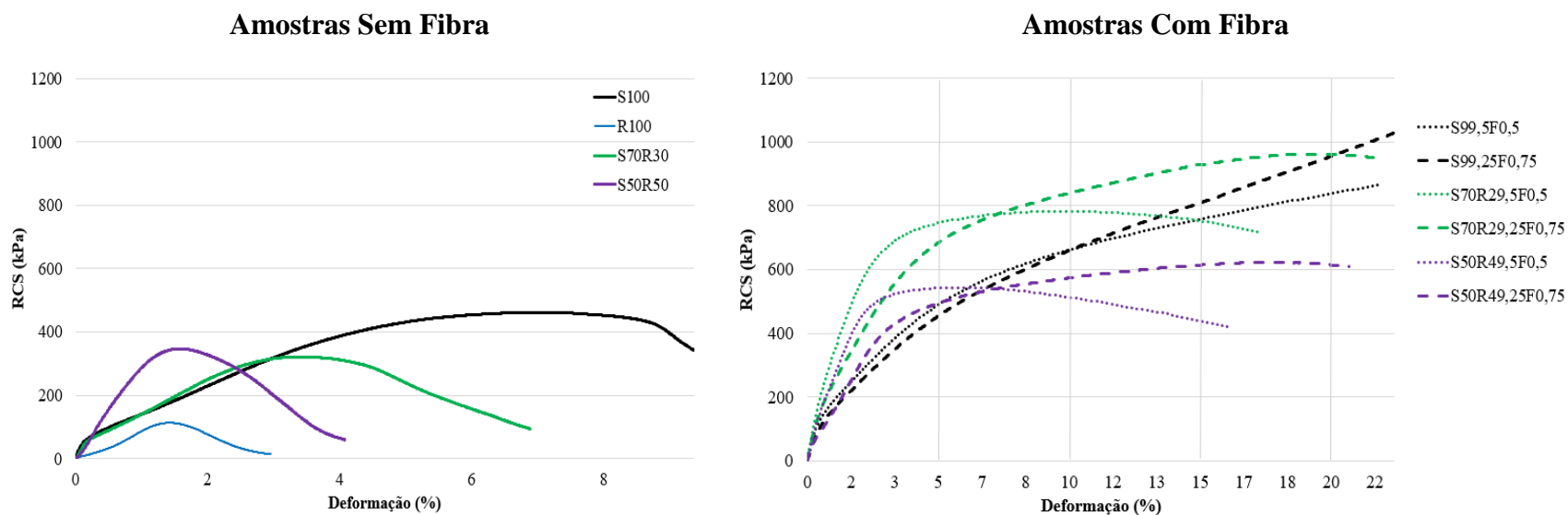
Fonte: Autor

Tabela 23 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (07 dias)

TIPO		Deformação (%)			
		5	10	15	20
RCS (kPa)	S99,5F0,5	292,74	443,39	525,93	602,40
	S99,25F0,75	369,75	563,11	659,20	805,71
	S70R29,5F0,5	481,79	564,64	585,01	606,88
	S70R29,25F0,75	500,13	646,13	741,20	806,85
	S50R49,5F0,5	366,18	367,71	321,88	-
	S50R49,25F0,75	428,83	497,24	508,62	486,55

Fonte: Autor

Figura 80 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (28 dias)



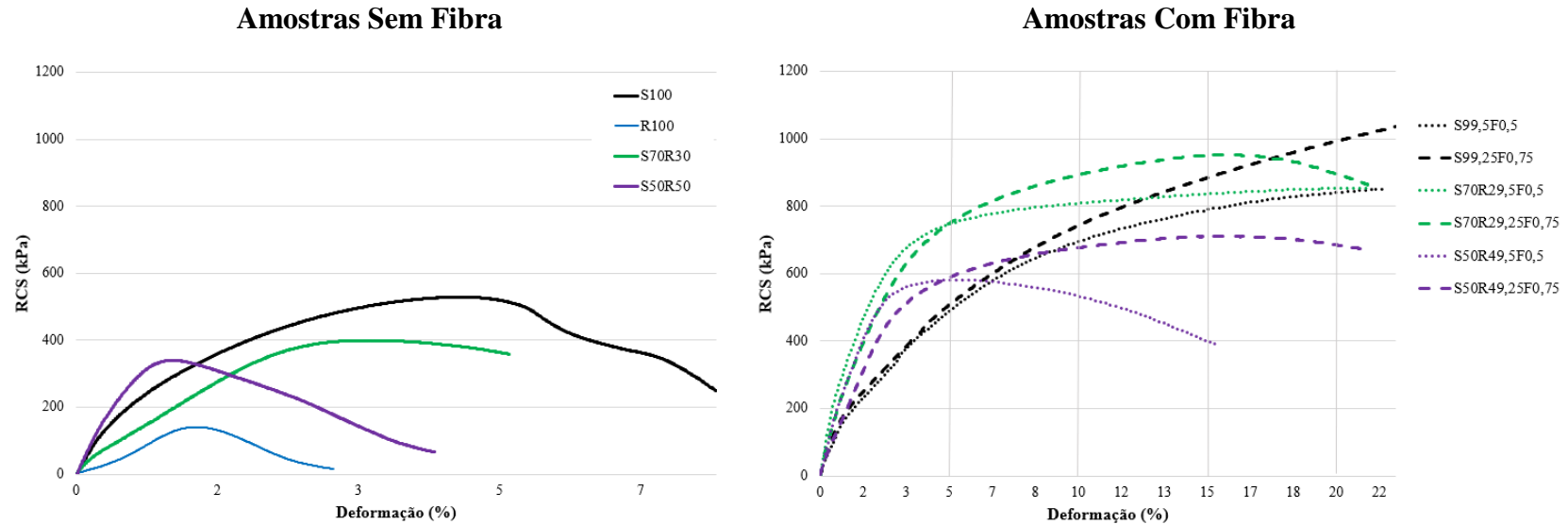
Fonte: Autor

Tabela 24 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (28 dias)

TIPO		Deformação (%)			
		5	10	15	20
RCS (kPa)	S99,5F0,5	491,64	661,24	763,44	838,64
	S99,25F0,75	456,50	659,20	809,27	956,97
	S70R29,5F0,5	746,97	781,60	752,23	-
	S70R29,25F0,75	686,02	839,32	932,01	961,55
	S50R49,5F0,5	544,31	513,37	438,50	-
	S50R49,25F0,75	496,05	573,60	615,61	613,57

Fonte: Autor

Figura 81 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (60 dias)



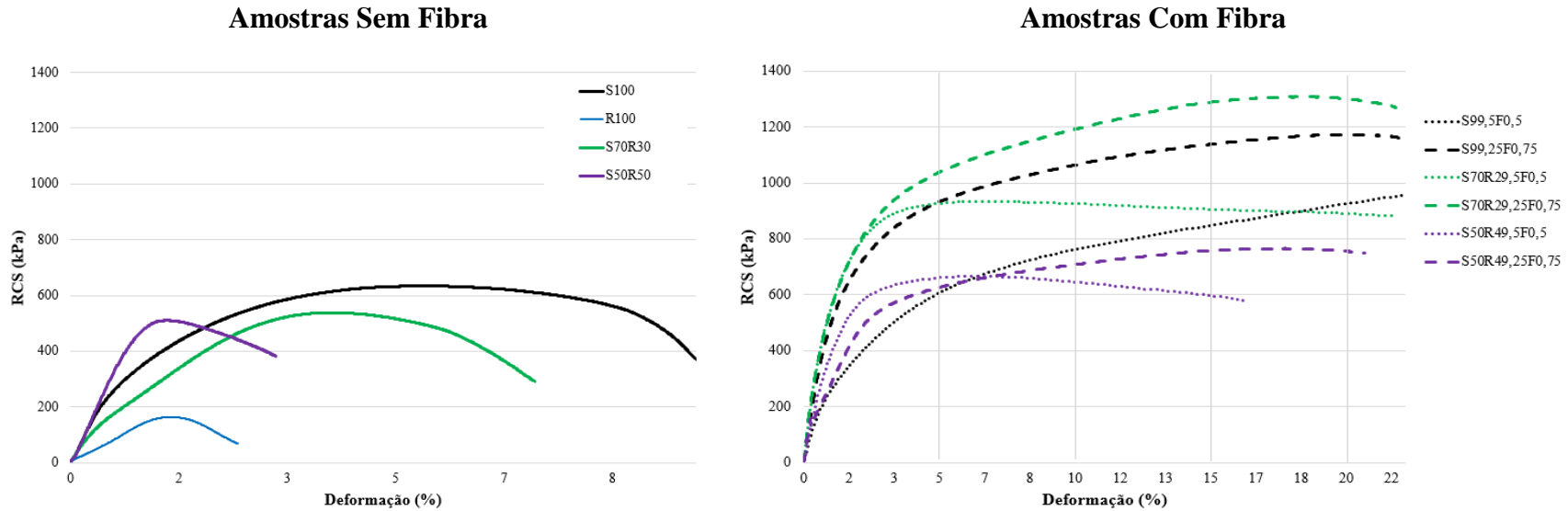
Fonte: Autor

Tabela 25 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (60 dias)

TIPO		Deformação (%)			
		5	10	15	20
RCS (kPa)	S99,5F0,5	491,13	694,34	789,75	840,34
	S99,25F0,75	509,13	741,54	885,16	993,81
	S70R29,5F0,5	747,82	808,08	836,60	852,56
	S70R29,25F0,75	750,53	892,46	950,35	895,34
	S50R49,5F0,5	581,45	533,57	398,95	-
	S50R49,25F0,75	589,60	676,85	709,45	684,49

Fonte: Autor

Figura 82 - Curva de tensão x deformação dos materiais e compósitos (120 dias)



Fonte: Autor

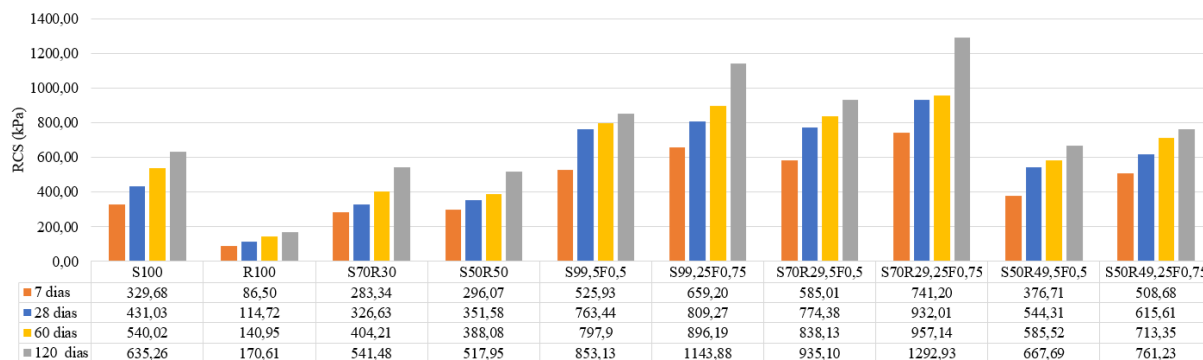
Tabela 26 - RCS dos compósitos com fibra pela deformação (120 dias)

TIPO		Deformação (%)			
		5	10	15	20
RCS (kPa)	S99,5F0,5	609,80	761,91	848,49	926,58
	S99,25F0,75	935,24	1064,77	1139,13	1172,91
	S70R29,5F0,5	927,94	926,16	906,54	890,65
	S70R29,25F0,75	1041,68	1192,26	1289,54	1302,10
	S50R49,5F0,5	661,41	646,30	597,06	-
	S50R49,25F0,75	627,96	707,92	758,17	755,80

Fonte: Autor

A Figura 83 apresenta os resultados das resistências à compressão simples dos materiais e compósitos, dados pela ruptura ou até mesmo pela deformação máxima de 15%, conforme a NBR 12770 (ABNT, 2022).

Figura 83 - Resultados da resistência à compressão simples



Fonte: Autor

Percebe-se que, em todos os materiais e compósitos, houve aumento da RCS referente à idade de ruptura das amostras, resultados estes compatíveis com os encontrados por Rodrigues (2022), Ordoñez Muñoz et al. (2021), Nascimento et al. (2021) e Pedrosa (2021). Este ganho de resistência pode ter sido motivado por alguns fatores, tais como: aumento da sucção nos contatos, que estavam a contribuir para a resistência, reações pozolânicas, formação de cimentações ou até mesmo perda de umidade.

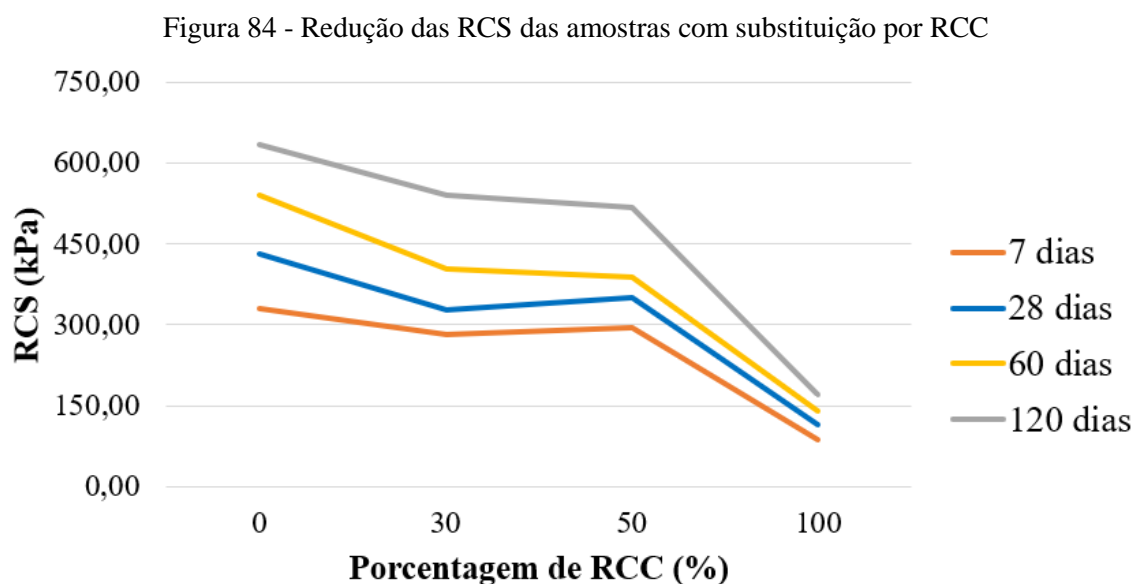
Na idade de ruptura de 07 dias, os resultados variaram entre 86 kPa e 741 kPa, como mostra a Figura 83. O compósito S70R29,25F0,75 apresentou um ganho de resistência de 125%, quando comparado com o solo puro, enquanto o compósito S70R30 obteve uma redução de 14%.

Os resultados da RCS das amostras com 28 dias de cura apresentaram variação de 115 kPa e 932 kPa. Nesta idade de ruptura, em relação ao solo puro, o compósito que apresentou o maior ganho na resistência foi o S70R29,25F0,75, com 116%, e o que apresentou maior redução foi o compósito S70R30, com -24%.

Observa-se que, aos 60 dias de cura, os resultados ficaram entre os intervalos de 140 kPa e 957 kPa. Comparando com o solo puro, o compósito S70R29,25F0,75 apresentou maior ganho de RCS, com 77%, porém o compósito S50R50 apresentou 28% de redução na RCS.

Aos 120 dias de cura, as amostras apresentaram RCS que variaram entre 170 kPa e 1292 kPa. Assim como observado nas demais idades de ruptura, comparando com a RCS alcançada pelo solo puro, o compósito S70R29,25F0,75 apresentou o maior ganho na resistência, com 103%, e o compósito S50R50 apresentou a maior perda, com 18%.

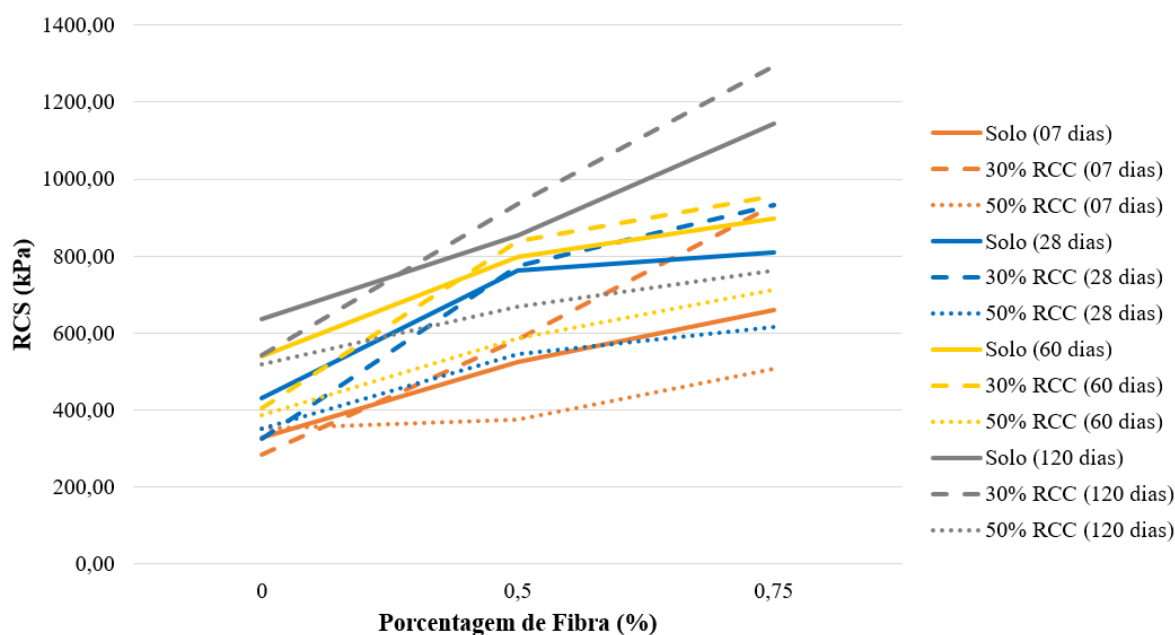
Bem como observado por Portela et al. (2021), quando substituiu o solo pelo RCC, menores foram os resultados da RCS (Figura 84), como mostram os compósitos S70R30 e S50R50, que apresentaram redução, respectivamente, de: 14% e 10% (07 dias); 24% e 18% (28 dias); 25% e 28% (60 dias); e 15% e 18% (120 dias). Contudo, como visto, quando analisados os resultados da resistência dos compósitos de solo+RCC+fibra de polipropileno, os compósitos apresentaram melhores resultados quando comparado ao solo puro.



Fonte: Autor

Observa-se que a substituição do solo pela fibra de polipropileno, nos compósitos S99,5F0,5 e S99,25F0,75, aumentaram entre 35% e 100% os valores de resistência à compressão do solo (Figura 85), corroborando com os resultados encontrados por Hamza et al. (2022), Liang et al. (2022), Ordoñez Muñoz et al. (2021), Ali et al. (2020), Liu et al. (2020), Abo El-Naga, Elsiragy e Ragab (2020), Zhao et al. (2020), Pachauri, Indu Priya e Garg (2019) e Macedo (2013). Pode-se verificar, também, que a fibra aumentou a resistência dos compósitos com substituição por RCC (S70R30 e S50R50).

Figura 85 - Crescimento das RCS das amostras com Fibra



Fonte: Autor

## 5.8 Resultado da Análise de Estatística

Foram realizadas as análises estatísticas referentes aos resultados obtidos pelos materiais e compósitos quanto à resistência à compressão simples (RCS). Nesta etapa, foram feitas as análises entre as médias da RCS e sua superfície de resposta.

### 5.8.1 Diferença entre as médias da RCS dos compósitos

Com os resultados de resistência à compressão simples dos materiais e compósitos referente ao tempo de cura (07, 28 e 120 dias) que foram submetidos, foi feito o teste de análise de variância (ANOVA), gerando o valor-P (Tabela 27).

Tabela 27 - Teste ANOVA dos resultados da RCS

	GL	SQ	MQ	Fc	Valor-P
RCS (07 dias)	9	1072512	119168	178,67	0,00000000
Erro	20	13340	667		
RCS (28 dias)	9	1793621	199291	41,57	0,00000000
Erro	20	95881	4794		
RCS (120 dias)	9	2856766	317418	82,05	0,00000000
Erro	20	77373	3869		

Legenda: GL = Grau de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados; Fc = Valor F.

Fonte: Autor



O teste da ANOVA indicou que, em todos os tempos de cura, a hipótese nula foi rejeitada (Valor-P < 0,05), isto significa que os resultados da RCS alcançados pelos materiais e compósitos diferem entre si. Sabendo que existe diferença, foi realizado o teste Tukey (Tabela 28), separando os compósitos em grupos, de acordo com a proximidade da média.

Tabela 28 - Teste de Tukey dos resultados da RCS

COMPÓSITO	RCS (07 dias) (kPa)	Gr. 7	RCS (28 dias) (kPa)	Gr. 28	RCS (120 dias) (kPa)	Gr. 120
S70R29,25F0,75	741,20	A	932,01	A	1292,93	A
S99,25F0,75	659,20	B	809,27	AB	1143,88	AB
S70R29,5F0,5	585,01	BC	782,28	AB	945,08	C
S99,5F0,5	525,93	CD	763,44	AB	856,13	CD
S50R49,25F0,75	508,62	D	622,19	BC	761,23	DE
S50R49,5F0,5	376,71	E	533,37	CD	667,69	EF
S100	329,68	EF	461,42	CDE	635,26	EF
S50R50	296,07	F	351,58	DE	517,95	F
S70R30	283,34	F	326,63	E	541,38	F
R100	87,60	G	117,99	F	170,61	G

Legenda: Gr. = Grupo.

Fonte: Autor

Com isso, foi possível verificar que os compósitos foram divididos em grupos, nos quais cada letra indica um grupo diferente. Observa-se que, em todas as idades de ruptura, o compósito S70R29,25F0,75 pertence ao grupo A, mostrando que o mesmo pertence ao grupo de maior resistência. Os compósitos que aparecem em grupos de 2 ou 3 letras, como, por exemplo, o compósito S99,25F0,75 (28 e 120 dias), que pertence ao grupo AB, significa que estes também apresentam semelhanças estatísticas tanto com o grupo A e como com o grupo B.

Observa-se que os materiais que não possuem fibra (S100, S70R30, S50R50) em todos os tempos de cura pertencem ao mesmo grupo de semelhança estatística (Grupo E ou F). Contudo, o solo puro (S100) também apresentou semelhança estatística com o compósito S50R49,5F0,5 em todas as idades de ruptura. O R100, em todos os tempos de cura, apresenta-se em grupo isolado, grupo este de menor resistência à compressão.

A Tabela 29 apresenta o valor-P do cruzamento dos resultados da RCS dos compósitos. Os valores destacados pela cor vermelha são inferiores ao nível de significância de 0,05%,

mostrando que existem diferenças estatísticas entre os resultados da RCS alcançados pelos compósitos. Contudo, os valores em preto são superiores a 0,05%, indicando que, estatisticamente, as RCS alcançadas pelos compósitos são semelhantes.

Tabela 29 - Valor-P do cruzamento dos resultados da RCS dos compósitos

COMPÓSITO	Valor-P									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(1) S100	-	0,001	0,963	0,974	0,052	0,000	0,005	0,000	1,000	0,533
(2) R100	0,001	-	0,025	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
(3) S70R30	0,963	0,025	-	1,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,653	0,039
(4) S50R50	0,974	0,021	1,000	-	0,001	0,000	0,000	0,000	0,695	0,047
(5) S99,5F0,5	0,052	0,000	0,001	0,001	-	0,529	0,999	0,014	0,254	0,978
(6) S99,25F0,75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,529	-	0,937	0,846	0,001	0,051
(7) S70R29,5F0,5	0,005	0,000	0,000	0,000	0,999	0,937	-	0,041	0,043	0,672
(8) S70R29,25F0,75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,846	0,041	-	0,000	0,000
(9) S50R49,5F0,5	1,000	0,000	0,653	0,695	0,254	0,001	0,043	0,000	-	0,918
(10) S50R49,25F0,75	0,533	0,000	0,039	0,047	0,978	0,051	0,672	0,000	0,918	-

Fonte: Autor

Desta maneira, o compósito que atingiu maior RCS em todas as idades, S70R29,25F0,75, apresenta, estatisticamente, resultados semelhantes ao compósito S99,25F0,75. Fazendo-se importante salientar que o solo puro (S100) apresenta semelhança estatística com os compósitos (ordem crescente de semelhança): S50R49,5F0,5; S50R50; S70R30; S50R49,25F0,75; S70R30; e S99,5F0,5.

### 5.8.2 Análise de Estatística da RCS - Superfície de Resposta

Para determinar o teor do compósito mais viável estatisticamente, foram adicionados os parâmetros que influenciaram nos valores da resistência (Tabela 30). Segundo o modelo apresentado por Silva et al. (2021) e Pedrosa (2021), parâmetros, como o tempo de cura das amostras (TC), o resíduo da construção civil (RCC) e a fibra, são variáveis independentes que influenciam na estabilização de solos.

Tabela 30 - Variáveis independentes utilizadas na estatística

PARÂMETROS	PROPORÇÕES
RCC	0% - 30% - 50% - 100%
Fibra de Polipropileno (FP)	0% - 0,5% - 0,75%
Tempo de Cura (TC)	07 - 28 - 120 (dias)

Fonte: Autor

Os resultados encontrados na análise estatística são apresentados na Tabela 31. Os fatores: grau de liberdade (G.L), soma dos quadrados (SQ), média dos quadrados (MQ) e Valor-F (Fc) são medidas da amplitude de variação que as variáveis independentes possuem na RCS, sendo importantes para determinar o Valor-P.

Tabela 31 - ANOVA das variáveis independentes

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>Fc</b>	<b>Valor-P</b>
Modelo	6	6598780	733197,7	73,11094	0,00000000
RCC	1	812028	812027,5	80,97147	0,07833919
Fibra de Polipropileno (FP)	1	653905	653905,5	65,20430	0,00000000
Tempo de Cura (TC)	1	915141	915140,7	91,25342	0,00000000
RCC*RCC	1	140599	140598,8	14,01984	0,00033948
FP*FP	1	9474	9474,3	0,94473	0,33399488
TC*TC	1	92569	92569,3	9,23057	0,00321398
RCC*FP	1	85974	85973,9	8,57290	0,00444209
RCC*TC	1	53275	53275,0	5,31233	0,02376754
FP*TC	1	53532	53531,5	5,33791	0,02344339
Error	80	802285	10028,6		
Total SQ	89	7401065			

Fonte: Autor

A análise de todas as variáveis independentes apresentou uma boa aderência ao modelo, pois os valores-P foram muito abaixo do limite ( $\text{Valor-P} < 0,05$ ), corroborando com Silva et al. (2021) e Pedrosa (2021). Entretanto, a interação do RCC e FP\*FP apresentou um limite superior ao nível de significância (0,05), mostrando que não influencia no modelo.

O modelo matemático apresenta um  $R^2$  de 89,16% (Tabela 32), indicando um bom grau de representação para estudos dessa natureza (SILVA, 2022; BRUNING et al., 2019; WANG; CHENG; TAN, 2018; GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017). Outro fator que torna o modelo adequado é a diferença entre os valores do  $R^2$  ajustado e do  $R^2$  previsto, que foi de 0,17%. Sheikhmohammadi et al. (2017) afirmam que a diferença entre os  $R^2$  ajustado e previsto, quando menor que 20%, qualifica o modelo como adequado.

Tabela 32 - Modelo Sintetizado

<b>R<sup>2</sup> (Modelo)</b>	<b>R<sup>2</sup> Ajustado (Modelo)</b>	<b>R<sup>2</sup> Previsto (Modelo)</b>
89,16%	87,94%	88,11%

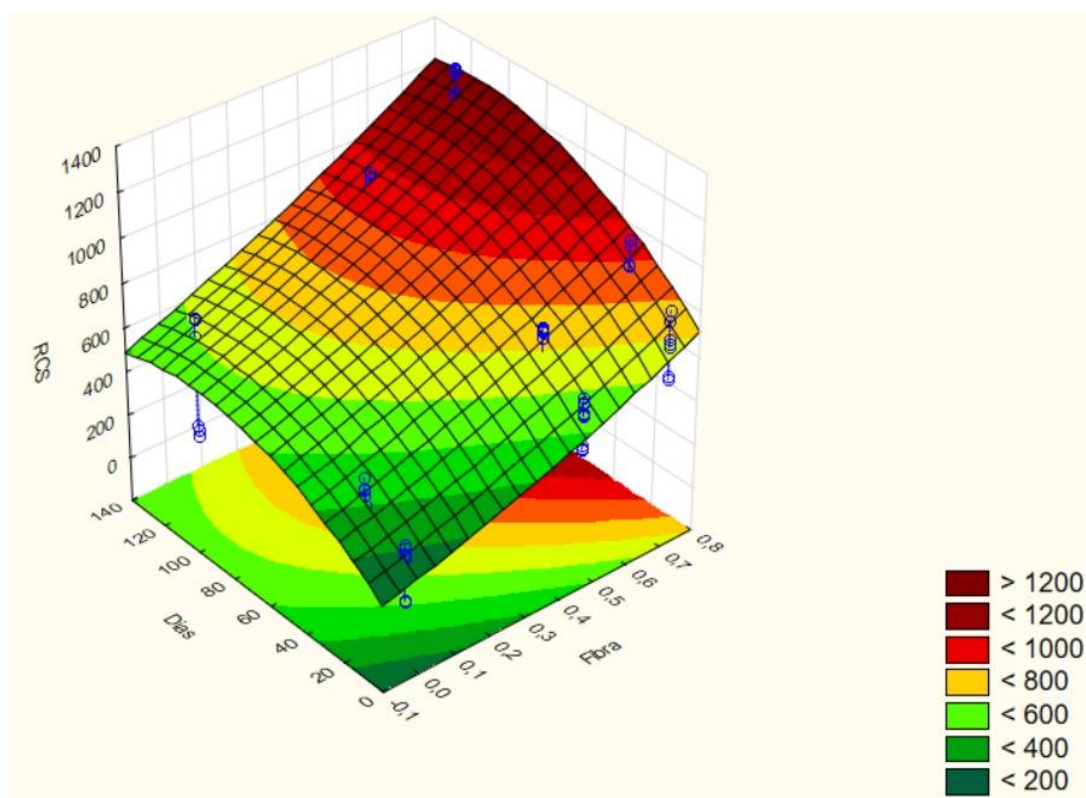
Fonte: Autor

Para garantir um modelo que mais se aproximasse da realidade, foram excluídas algumas interações (RCC, FB\*FB e RCC\*TC) da formulação do modelo, atingindo, assim, melhores resultados. A Equação 7 apresenta o comportamento de regressão dos compósitos.

$$\text{RCS (kPa)} = 297,02 + 518,29*\text{FB} + 6,74*\text{TC} - 0,03*\text{RC}*\text{RC} - 0,04*\text{TC}*\text{TC} - 3,44*\text{RCC}*\text{FB} + 2,11*\text{FB}*\text{TC} \quad (\text{Equação 7})$$

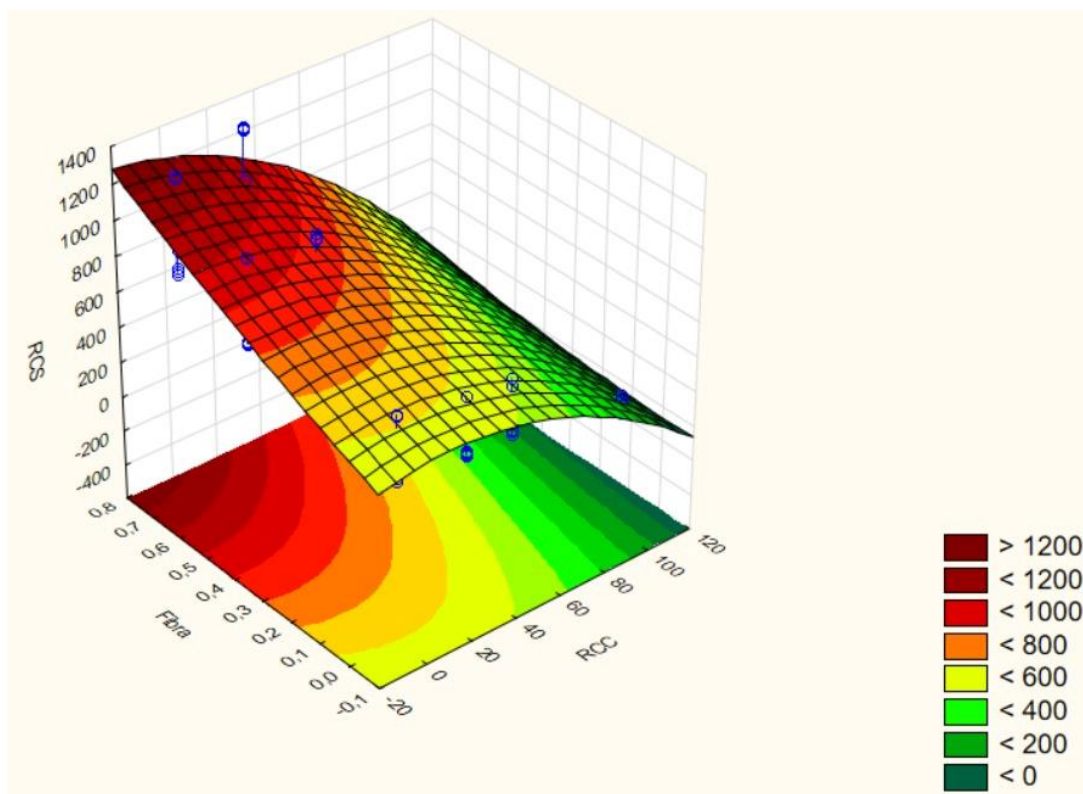
Foi obtida a superfície de resposta do modelo com duas variáveis independentes, que é fundamental para a definição da otimização do sistema, descrevendo mais precisamente as interações entre as variáveis independentes, influenciando na RCS. Percebe-se que, quanto mais tempo de cura e mais fibra, maiores são os resultados da RCS (Figura 86). Com o tempo de cura 120 dias, quanto mais RCC e menos fibra, menores são os resultados da RCS (Figura 87).

Figura 86 - Superfície de Resposta: RCSxFBxTC



Fonte: Autor.

Figura 87 - Superfície de Resposta: RCSxFBxRCC



Fonte: Autor.

Utilizando a Equação 7, variando os teores de incorporação (RCC, FB e TC), foi possível analisar o comportamento dos compósitos, prevendo os resultados da RCS. Com isso, conforme apresenta a Tabela 33, encontraram-se as quantidades necessárias para maximizar o valor da variável dependente (RCS).

Tabela 33 - Variáveis de otimização do valor da RCS.

RCC (%)	FP (%)	TC (Dias)	RCS (kPa)
0,00	0,75	120	1108,44

Fonte: Autor

Nota-se que a variável independente RCC, na estatística da superfície de resposta, não influencia no aumento da RCS dos compósitos, contudo, a incorporação da fibra de polipropileno e o TC coincidem com limites utilizados nesta pesquisa, indicando que a fibra e o TC tendem a aumentar a resistência.

## 5.9 Análise de erodibilidade

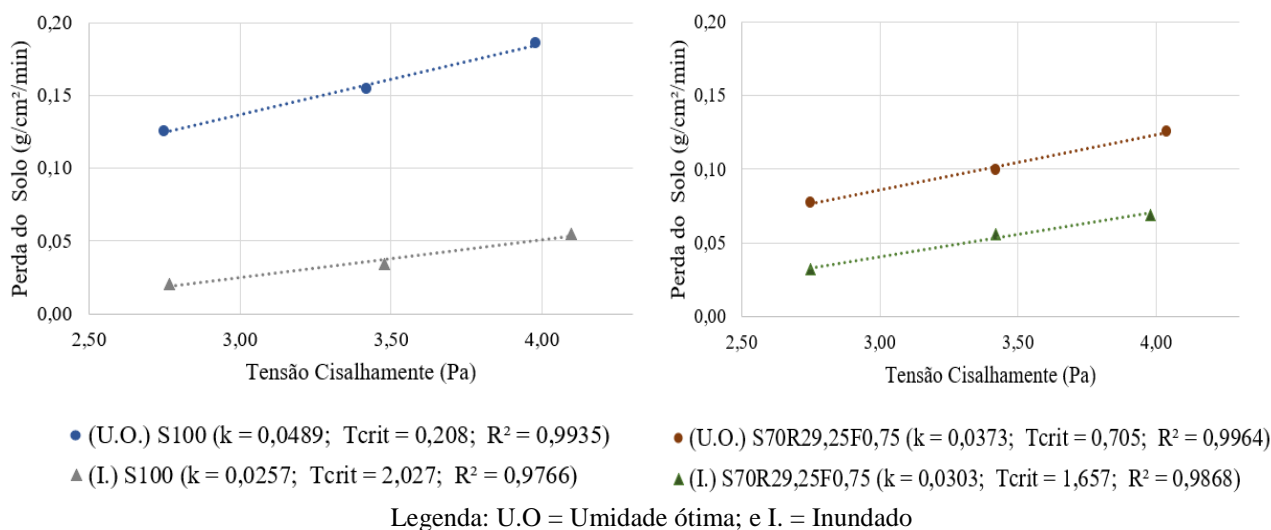
Os ensaios de Inderbitzen foram realizados com a finalidade de quantificar a erodibilidade do solo e do compósito que apresentou melhor resultado da RCS, por meio do fluxo de água superficial. Os resultados foram obtidos pela razão da perda do solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) pela tensão cisalhante hidráulica (Pa). A partir destes resultados, foi possível determinar a tensão hidráulica crítica ( $\tau_{\text{crít.}}$ ) e o fator de erodibilidade (K), conforme apresentam a Tabela 34 e a Figura 88.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios de Inderbitzen

AMOSTRA	CONDIÇÃO	Perda de solo ( $i = 60^\circ$ ) ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ )			$T_{\text{crit}}$ (Pa)	K ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ )
		3 l/min / (2,75 Pa)	4,8 l/min (3,42 Pa)	10,2 l/min (4,04 Pa)		
S100	Umidade ótima	0,126	0,154	0,186	0,208	0,0489
	Inundado	0,021	0,034	0,055	2,027	0,0257
S70R29,25F0,75	Umidade ótima	0,077	0,100	0,126	0,705	0,0373
	Inundado	0,032	0,056	0,069	1,657	0,0303

Fonte: Autor

Figura 88 - Perda do solo x tensão cisalhante hidráulica



Fonte: Autor

De acordo com parâmetros de Bastos (1999), na condição de umidade ótima, o solo puro é classificado como solo de média erodibilidade, pois apresentou um fator de erodibilidade de  $0,0489 \text{ g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ , corroborando com as análises da metodologia MCT e química. Ressalta-se que vários estudos utilizaram o parâmetro de Bastos (1999) para classificar a erodibilidade

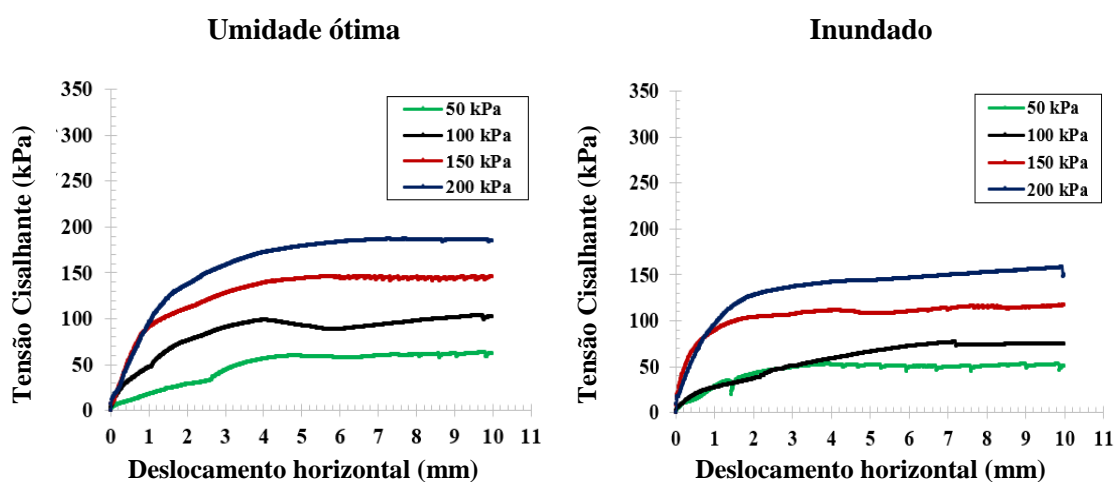
do material, como Thoma et al. (2022), Bezerra (2022), Bandeira et al. (2021), Soares et al. (2018) e Lafayette (2006).

O compósito S70R29,25F0,75 apresentou redução na perda de solo em todas as vazões, ocasionando uma redução de, aproximadamente, 24% no valor de K quando comparado ao solo puro. Percebe-se que, substituindo o solo por um material de menor coesão (RCC) e a fibra de polipropileno, o compósito apresentou a mesma classificação de erodibilidade (média erodibilidade), mostrando que a incorporação do RCC e da fibra, nestas proporções, tem a mesma eficiência do solo puro, sendo viável a utilização destes materiais.

### 5.10 Análise da estabilidade de um talude instável

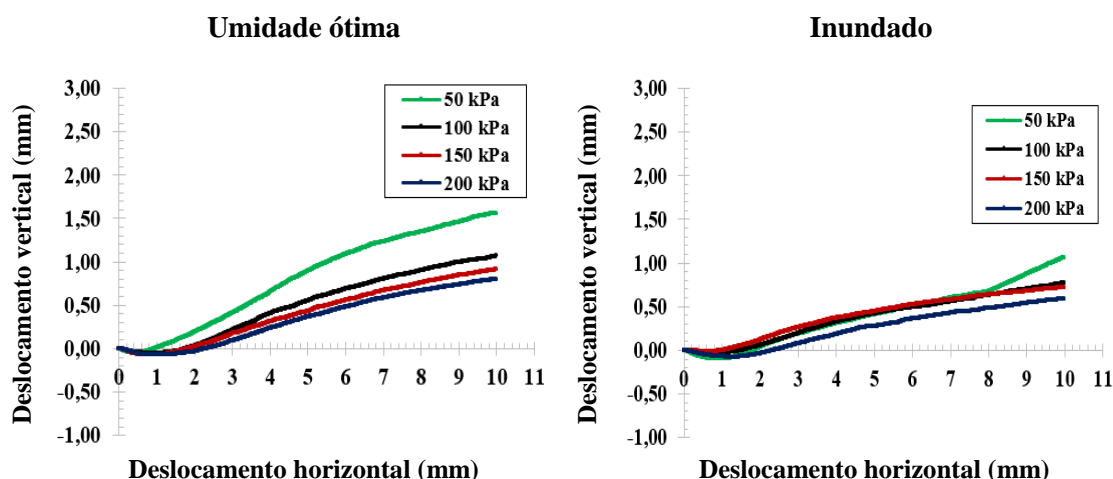
As Figuras 89 e 90 apresentam as curvas de Tensão Cisalhante (KPa) x Deslocamento Horizontal (mm) e Deslocamento Vertical (mm) x Deslocamento Horizontal (mm), respectivamente, das amostras compactadas do compósito S70R29,25F0,75 nas condições de umidade ótima e inundada. As envoltórias estão apresentadas na Figura 91.

Figura 89 - Curvas Tensão Cisalhante x Deformação horizontal do compósito compactado



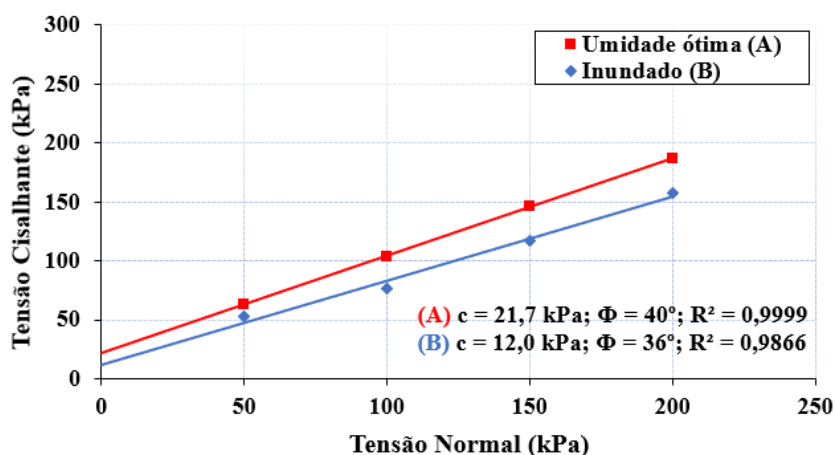
Fonte: Autor

Figura 90 - Curvas Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal do compósito compactado



Fonte: Autor

Figura 91 - Envoltórias de resistência do compósito compactado: Umidade ótima (A); e Inundado (B)



Fonte: Autor

O gráfico de Tensão Cisalhante (kPa) x Deslocamento Horizontal (mm) (Figura 89) mostra que o compósito apresenta tensões crescentes com o deslocamento nas duas condições, com exceção nas tensões de 100 kPa em umidade ótima e 50 kPa na condição inundada, que, a partir de 4 mm de deslocamento, apresentam tensões decrescentes, voltando a aumentar após 6 mm.

As curvas de Deslocamento Vertical (mm) x Deslocamento Horizontal (mm) (Figura 90) do compósito mostram que, em todas as tensões aplicadas, tanto na condição de umidade ótima quanto na inundada, apresentaram comportamento de compressão até o deslocamento de 2 mm, contudo, houve ganho de volume até o deslocamento de 10 mm.



A Tabela 35 apresenta os índices iniciais e finais dos corpos de prova. Após as amostras serem inundadas, o índice de vazios não foi alterado, mostrando que as amostras apresentaram um bom comportamento e controle de compactação. Verifica-se, também, que as amostras estavam completamente saturadas quando foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 35 - Índices iniciais e finais das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento.

CONDIÇÃO	Tensão (kPa)	W <sub>0</sub> (%)	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e <sub>0</sub>	e <sub>f</sub>	S <sub>0</sub> (%)	S <sub>f</sub> (%)
Umidade ótima	50	13,74	1,876	0,39	-	92,75	-
	100	13,42	1,877	0,38	-	90,68	-
	150	13,51	1,882	0,38	-	92,20	-
	200	13,56	1,879	0,38	-	91,89	-
Inundado	50	13,54	1,870	0,39	0,39	90,22	100
	100	13,5	1,848	0,41	0,41	86,40	100
	150	13,34	1,869	0,39	0,40	88,79	100
	200	13,38	1,864	0,39	0,40	88,20	100

Legenda: W<sub>0</sub> - umidade do solo; e<sub>0</sub> - índice de vazios inicial; S<sub>0</sub> - grau de saturação inicial; e<sub>f</sub> - índice de vazios final; e S<sub>f</sub> - grau de saturação final.

Fonte: Autor

Os parâmetros da resistência ao cisalhamento são apresentados na Tabela 36. Ressalta-se que não foi possível obter a envoltória da resistência ao cisalhamento do solo compactado puro. Com isso, observou-se que a incorporação da fibra de polipropileno e do RCC se mostraram interessantes, pois a perda na coesão do solo puro (amostra indeformada) foi maior que a do compósito, quando comparada a condição natural com a inundada.

Tabela 36 - Parâmetros dos resultados do ensaio de cisalhamento

AMOSTRA	CONDIÇÃO	c (kPa)	Φ (°)	R <sup>2</sup>
S100 (Indeformada)	Natural	21,6	43	0,9729
	Inundada	0	37	0,9913
S70R29,25F0,75 (Compactada)	Umidade ótima	21,7	40	0,9999
	Inundada	12,0	36	0,9866

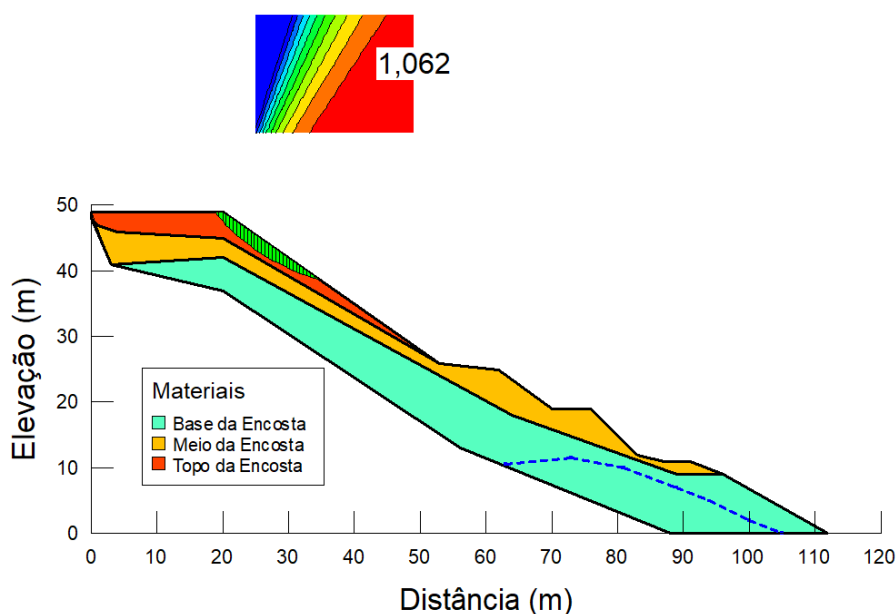
Legenda: c - coesão; e Φ - ângulo de atrito.

Fonte: Autor

A inundação também influenciou os parâmetros de resistência ao cisalhamento do compósito, causando uma redução de 45% na coesão do compósito em umidade ótima na condição inundada. Contudo, foi inferior a 85%, indicando que o compósito pode ser considerado não erodível (BASTO, 1999). É fundamental mencionar que houve uma perda de 10% nos valores do ângulo de atrito do compósito. Observou-se que na condição inundada, o solo reforçado (S70R29,25F0,75) apresentou um acréscimo de 12 kPa no parâmetro de coesão.

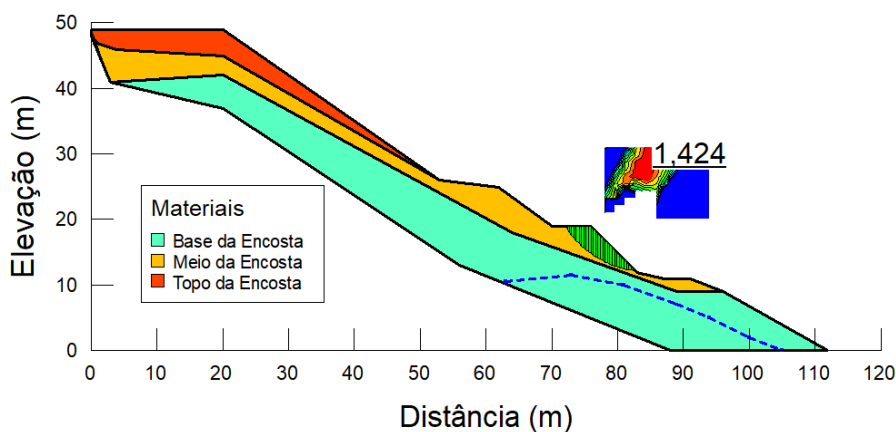
Posteriormente, o talude de Souza (2014) foi modelado utilizando os parâmetros na condição inundada, obtendo-se valores do fator de segurança de deslizamento semelhantes, como mostram as Figuras 92 e 93. Com a utilização da metodologia de Morgenstern & Price, nota-se que o topo e o meio da encosta apresentaram fatores de segurança inferiores ao mínimo aceitável para encostas urbanas, que seria de 1,5.

Figura 92 - Retaludamento - Topo da encosta



Fonte: Adaptado de Souza (2014)

Figura 93 - Retaludamento - Meio da encosta

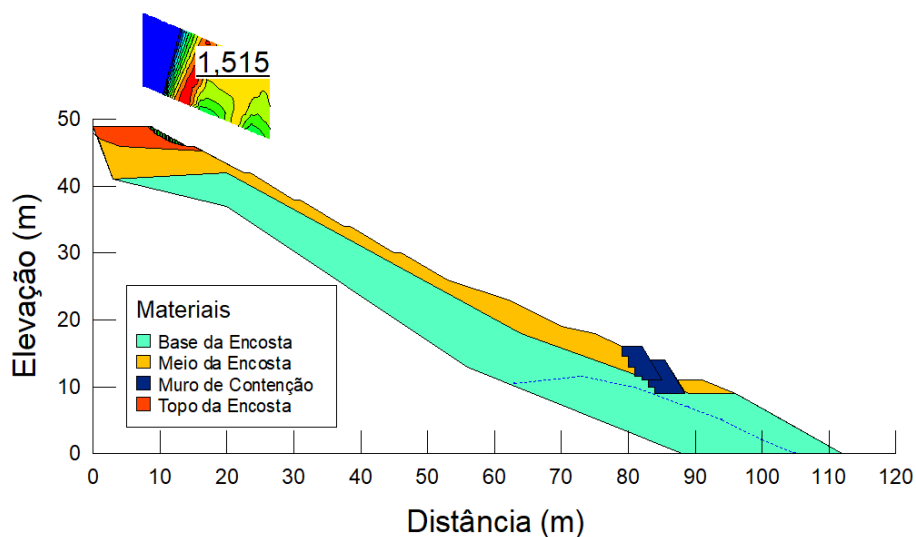


Fonte: Adaptado de Souza (2014)

Diante disto, foram propostas soluções para a estabilização do talude, também utilizando a metodologia de Morgenstern & Price. Conforme apresenta a Figura 94, foi projetado um

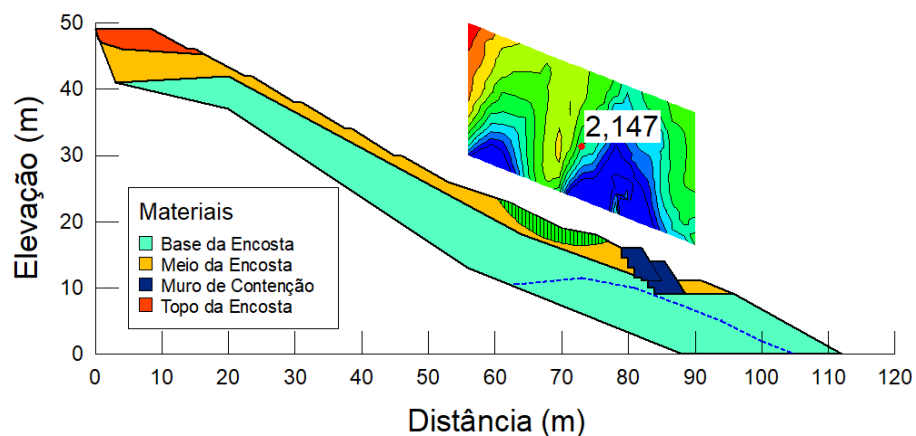
retaludamento no topo da encosta, com as seguintes condições: altura de corte de 4 metros, inclinação de 31 graus e patamares (bermas) com 1 metro de largura. Para o meio da encosta, foi solucionado com a construção de uma obra de contenção (Figura 95).

Figura 94 - Fator de segurança do topo da encosta



Fonte: Autor

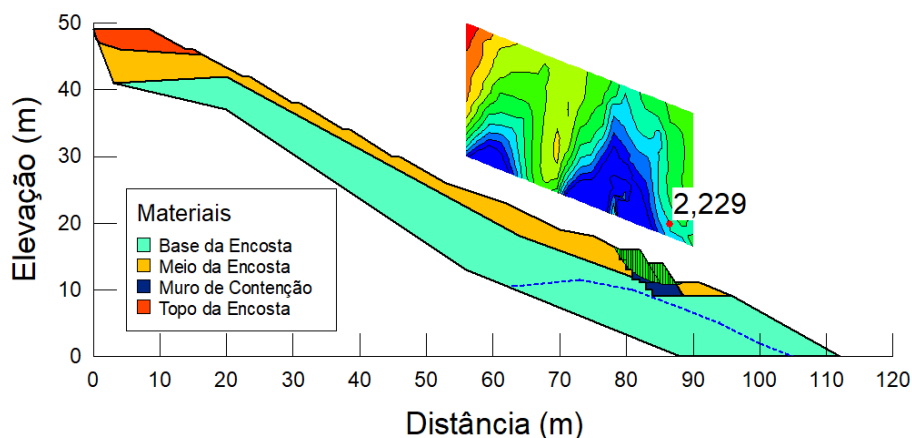
Figura 95 - Fator de segurança do meio da encosta



Fonte: Autor

Para aumentar o fator de segurança no meio da encosta, foi proposta a utilização de um muro de solo-resíduo-fibra, mais especificamente com o material estudado que apresentou a melhor RCS na análise estatística (S70R29,25F0,75). Adotando o muro de contenção semelhante ao solo cimento ensacado, com os parâmetros de resistência ao cisalhamento do compósito, verificou-se que o solo reforçado, com 5 metros de altura e inclinação de 60 graus, com largura de base de 2 metros, apresentaria condições de estabilidade ao talude na meia encosta, como mostrado na Figura 96.

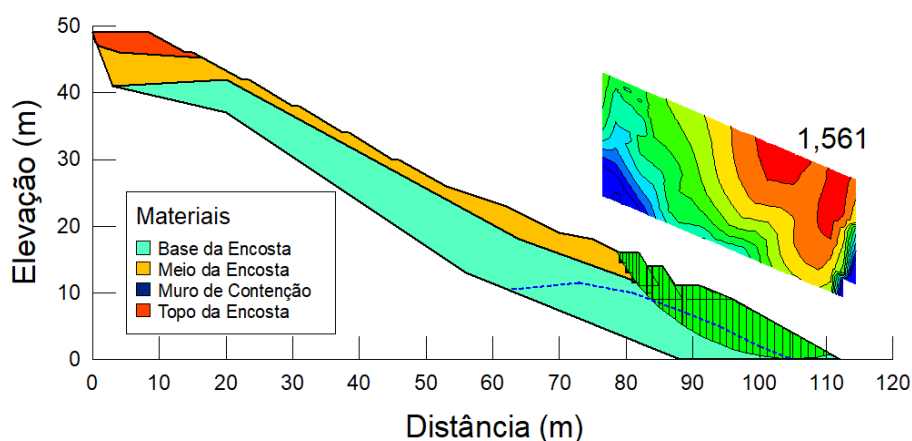
Figura 96 - Fator de segurança do muro de contenção



Fonte: Autor

Segundo Souza (2014), a base da encosta apresenta um fator de segurança de 1,633, mostrando-se estável. Entretanto, um dos parâmetros que causa a instabilidade de um talude é o peso específico do solo, pois este pode aumentar o carregamento em uma outra camada. Uma vez que o compósito na condição saturada, utilizado no muro de contenção, apresenta um peso específico de  $2,168 \text{ g/cm}^3$ , foi realizada uma análise na base da encosta e, como mostra a Figura 97, verificou-se que se manteve acima do valor mínimo exigido pela NBR 11682 (ABNT, 2009), que é de 1,5.

Figura 97 - Fator de segurança da base da encosta



Fonte: Autor

A Tabela 37 apresenta os fatores de segurança do talude calculados em outras duas metodologias de análises (*Spencer* e *Bishop*), após as intervenções realizadas para estabilização da encosta estudada por Souza (2014). Ressalta-se que as intervenções adotadas para estabilizar

o talude levou em consideração que a encosta não apresentava uma ocupação desordenada, principalmente nos trechos que foram feitos os cortes do talude.

Tabela 37 - Fatores de segurança da estabilização do talude - Condição Inundado

Local	Metodologia		
	Morgenstern & Price	Spencer	Bishop
Topo da Encosta	1,515	1,514	1,516
Meio da Encosta	2,147	2,143	2,15
Base da Encosta	1,561	1,560	1,587
Muro de contenção	2,229	2,225	2,232

Fonte: Autor

### 5.11 Análise econômica

Visto que o compósito ideal obtido pela estatística se mostrou eficiente, melhorando os fatores de segurança do talude estudado por Souza (2014), foi feita a comparação de custo, com base na tabela do SINAPI-PE (2023), entre um muro de contenção executado com solo-cimento ensacado (Tabela 38) e o muro projetado com o compósito (Tabela 39). Salienta-se que o custo do RCC e da fibra de polipropileno foram fornecidos pelas empresas Ciclo Ambiental e Etruria, respectivamente.

Tabela 38 - Composição analítica - Muro de contenção solo-cimento

Cód.	Descrição	Unid	Uso	Preço	Total (R\$)
-	<b>Solo cimento (teor 8%) ensacado - Compósito feito com material do talude</b>	m <sup>3</sup>	-	-	<b><u>391,14</u></b>
Material					
1379	Cimento Portland composto CP II-32	kg	179,8	0,70	125,86
Mão de obra e equipamento					
93358	Escavação manual de vala com profundidade menor ou igual a 1,30 m. af_02/2021	m <sup>3</sup>	1,00	80,78	80,78
88377	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	4,82	28,14	135,63
88830	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chp diurno. af_10/2014	CHP	1,12	1,89	2,12
88831	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chi diurno. af_10/2014	CHI	3,70	0,4	1,48
92123	Ensacamento de areia. af_11/2015	m <sup>3</sup>	1,00	45,27	45,27

Fonte: Elaborado pelo autor com base no SINAPI-PE (03/2023)

Tabela 39 - Composição analítica - Muro de contenção com o compósito

Cód.	Descrição	Unid	Uso	Preço	Total (R\$)
-	<b>Compactação de Talude - Compósito feito com material do talude</b>	m <sup>3</sup>	-	-	<b><u>690,74</u></b>
Material					
C. Amb.	Resíduo de Construção Civil (Passante peneira 4,8mm)	m <sup>3</sup>	0,2925	30,00	8,78
Etruria	Fibra de Polipropileno (Microfibra)	kg	13,97	23,00	321,31
Mão de obra e equipamento					
93358	Escavação manual de vala com profundidade menor ou igual a 1,30 m. af_02/2021	m <sup>3</sup>	1,00	80,78	80,78
88377	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	4,82	28,14	135,63
88830	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chp diurno. af_10/2014	CHP	1,12	1,89	2,12
88831	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador - chi diurno. af_10/2014	CHI	3,70	0,40	1,48
93382	Reaterro manual de valas com compactação mecanizada. af_04/2016	m <sup>3</sup>	4,00	35,16	140,64

Fonte: Elaborado pelo autor com base no SINAPI-PE (03/2023) e empresas Ciclo ambiental e Etruria.

Observa-se que o custo do metro cúbico do muro de contenção feito pelo compósito (R\$ 690,74) é 77% mais caro do que o muro confeccionado pela metodologia do solo-cimento ensacado (R\$ 391,14), no entanto, há um ganho significativo para o meio ambiente e para a sociedade, pois, cerca de 30% do muro, será feito com resíduo da construção civil e destinado de forma correta o resíduo, como também 30% menos uso de agregados naturais, contribuindo para o alcance da ODS-12 – Consumo e Produção Sustentável.

Observa-se que o material que mais onera o valor do metro cúbico do compósito (Tabela 39) é a fibra de polipropileno (R\$ 321,31), pois se refere a 46,5 % do custo total. Contudo, este custo pode ser reduzido através de incentivos fiscais, para obter fibras mais baratas através de parcerias comerciais entre o governo do estado/federal com a empresa fabricante, uma vez que o uso desta fibra apresentou melhorias nos comportamentos mecânicos.

Outro fator importante é que o muro de contenção feito com o compósito não utiliza o cimento em sua composição. O problema dos métodos de contenção que usam o cimento como

aglomerante, é o impacto ambiental (CHEN et al., 2021), pois a indústria do cimento tem sido bastante criticada, visto que a produção deste material emite muito gás de efeito estufa (ISLAM; CHITTOORI; BURBANK, 2020; UNEP, 2010).

## 6 CONCLUSÕES

Com a análise temporal realizada na área de estudo entre os anos de 1974 e 2021, observaram-se taxas significativas de variação da área classificada como mancha urbana, assim como de supressão de vegetação, variando de (+)29,11% e (-)20,96%, respectivamente. Este avanço da urbanização, em área com declividade elevada (maiores que 30%), e diminuição da área de vegetação intensificou os problemas socioambientais na região, impactando na estabilidade da encosta e elevando o risco de possíveis deslizamentos, como ocorrido nas fortes chuvas de maio de 2022.

Quanto à granulometria, o solo e o RCC foram classificados, segundo SUCS, como uma areia argilosa (SC) e areia siltosa (SM), respectivamente. Houve alteração na classificação após a substituição do solo pelo o RCC, o compósito S70R30 foi classificado como areia argilosa e siltosa (SC-SM); e o S50R50 como areia siltosa (SM). Quanto à classificação, segundo o comportamento laterítico, o solo e os compósitos (S70R30 e S50R50) apresentaram um comportamento de uma material arenoso laterítico; e o RCC apresentou um comportamento de material arenoso não laterítico.

Os valores da massa específica do solo e do RCC demonstraram semelhança entre eles. A substituição de solo por RCC, gerando compósitos, apresentou resultados bem próximo dos materiais. Quanto à análise dos limites de Atterberg dos materiais, verificou-se que o solo é classificado como moderadamente plástico e o RCC como materiais não plásticos; quando feita a substituição do solo pelo RCC, os dois compósitos apresentaram classificação de levemente plástico.

Na mineralogia do solo, foram detectadas a presença de minerais, como o feldspato, ilmenita, goetita, e a predominância de quartzo e argilos minerais, como picos de quartzo, caulinita, alumínio silicatado e feldspato. No RCC, foram identificadas a presença de minerais, como quartzo, goetita, ilmenita e caulinita, e argilos minerais, sendo encontrados picos de quartzo, feldspato, ilita e caulinita. Esses minerais, normalmente, são encontrados no RCC devido à relação com a areia utilizada na composição do concreto e da argamassa.

Quanto à análise química da avaliação do pH do solo e dos compósitos, junto à substituição do RCC, o solo apresentou um material de acidez moderada à leve, o RCC e os compósitos foram



classificados como alcalinos, porém, quanto maior a substituição de RCC, mais básica a amostra se apresenta. Quanto à salinidade, todos os materiais e compósitos se apresentaram quimicamente não dispersivos. Em relação à presença dos óxidos encontrados no solo e nos compósitos (S70R30 e S50R50), predominaram os óxidos de silício, de alumínio e de ferro e o RCC apresentou predominância dos óxidos de silício, de cálcio e de alumínio.

Outro aspecto observado é que os compósitos gerados pelo solo e RCC aumentaram a densidade seca máxima e diminuíram a umidade ótima quando comparados ao solo. Já a adição da fibra de polipropileno, tanto no solo quanto nos compósitos, apresentou uma leve diminuição na massa específica seca máxima e um aumento na umidade ótima, o que não é adequado para uma obra de estabilização de solo.

Quanto à resistência à compressão simples, a incorporação de 30% e 50% RCC ao solo reduziu a RCS quando comparada ao solo em todas as idades de ruptura. Contudo, os compósitos que apresentaram a incorporação da fibra de polipropileno aumentaram a RCS quando comparados aos resultados alcançados pelo solo puro, destaque para o compósito S70R30F0,75, que apresentou melhor RCS em todas as idades de ruptura. Assim, com 120 dias de cura, o compósito S70R30F0,75 apresentou a maior resistência à compressão, de 1292,93 kPa, aumentando a RCS do solo em 103%.

As curvas de tensão e deformação dos compósitos com fibras, em todas as idades de ruptura, apresentaram uma ruptura com característica de um material dúctil, havendo crescimento da resistência à compressão contínuo, associado ao aumento da deformação, esse comportamento se mostra interessante no ponto de vista geotécnico, permitindo intervenções técnicas eficientes. No entanto, as curvas dos compósitos que contêm somente solo e RCC demonstraram picos de resistência, com característica de um material frágil.

A estatística mostra que, através do teste da ANOVA, em todos os tempos de cura, existem diferenças nos resultados das RCS dos materiais e compósitos e o teste de Tukey aponta que as amostras do compósito S70R29,25F0,75 se destacaram por permanecer sempre no grupo de maior RCS. O modelo matemático/estatístico apresentou um  $R^2$  igual a 89,16%, indicando um comportamento positivo e uma boa aderência ao modelo, chegando a uma otimização estatística em teores de 99,25% de solo e 0,75% de fibra de polipropileno aos 120 dias de cura, alcançando 1108,44 kPa de resistência à compressão simples (RCS).

Quanto à análise de erodibilidade, na condição da umidade ótima, o melhor compósito apontado pela estatística (S70R29,25F0,75) obteve redução na perda de solo em todas as vazões analisadas, reduzindo, aproximadamente, 24% no valor do fator de erodibilidade (K) quando comparado ao solo puro. Mesmo com essa redução, o compósito apresentou a mesma classificação de erodibilidade do solo (média erodibilidade), apontando que a incorporação do RCC e da fibra de polipropileno, nestas proporções, apresentou a mesma eficiência do solo puro, sendo viável a utilização destes materiais.

Com o compósito S70R29,25F0,75, através de uma análise computacional, foi possível estabilizar um talude que apresenta fatores de segurança ao deslizamento abaixo do seguro. Mesmo sendo 77% mais caro, quando comparado com o muro confeccionado pela metodologia do solo-cimento ensacado, o compósito se mostra uma alternativa mais viável, pois, com a destinação correta do RCC, a redução da utilização de agregado natural e a não utilização do cimento como aglomerante, há um ganho significativo para o meio ambiente e para a sociedade.

Diante dos resultados expostos, verifica-se que a utilização do RCC com a inclusão da fibra de polipropileno se apresentou como uma alternativa viável, para melhoramento das propriedades de um solo em uma área de risco a deslizamento, reduzindo os impactos ambientais com o emprego adequado destes materiais.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos encontrados, sugerem-se alguns pontos, como diretrizes para pesquisas futuras:

- Investigar a característica mecânica de compósitos com teores de fibra de polipropileno superiores a 0,75%, para verificar se uma quantidade maior da fibra alcança melhores resultados;
- Verificar, *in situ*, o comportamento da encosta após incorporação do RCC e das fibras de polipropileno, visando diminuir o risco de deslizamento da encosta;
- Analisar os materiais e compósitos através dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de tomografia computadorizada de Raios X, a fim de compreender o acréscimo da resistência com o tempo de cura;
- Comparar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo compactado, com o solo reforçado (Solo+RCC e Solo+RCC+Fibra);
- Realizar ensaios geotécnicos (SPT e resistência ao cisalhamento em várias camadas) e topográficos na área de estudo, para possibilitar a realização de um estudo mais aprofundado quanto à estabilidade; e
- Investigar o potencial de erodibilidade dos materiais e compósitos através de ensaios indiretos e diretos.

## REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, M.; AFLAKI, E.; MOGHADAS NEJAD, F. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. **Journal of Cleaner Production**, vol. 207, p. 1059–1071, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.253>

ABO EL-NAGA, I.; ELSIRAGY, M. N.; RAGAB, M.. Utilization of synthetic reinforcement for enhancement of oil-contaminated subgrade soil in highway pavement. **Innovative Infrastructure Solutions**, vol. 5, no. 38, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00289-9>.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Abrelpe, São Paulo/SP. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>>. Acesso em: mar. 2023

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Histórico de Chuvas**. Recife, 2023. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: abril. 2023.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Acumulado mensal de precipitação maio/2022**. Recife, 2022. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/uploads/MAIO-2022-.pdf>. Acesso em: jul. 2022.

ANUMATA, S. E.; OGWUEGBU, M. O. C.; NWOKO, I. A.; AKALEZI, C. O. Mineralogical and Elemental Analysis of Clay Sample from Iyinwaogba Umuosode Alike Ikenanzizi Obowo Local Government Area of Imo State. **J. Mater. Environ. Sci**, vol. 12, no. 4, p. 511–531, 2021.

ALHEIROS, M. M. **Risco de Escorregamento na Região Metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado), Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 1998.

ALHEIROS, M. M.; SOUZA, M. Â. A.; BITOUN, J; MEDEIROS, S. M. G. M.; JÚNIOR, W. M. A. **Manual de Ocupação dos Morros da Região Metropolitana do Recife**. Fundação de Desenvolvimento Municipal FIDEM; coord. Margareth Mascarenhas Alheiros... (et al.). - Recife: Ensol, 2004.

ALI, M.; AZIZ, M.; HAMZA, M.; MADNI, M. F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. **Geomechanics and Engineering**, vol. 22, no. 3, p. 227–236, 2020. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.

ALMEIDA, S. M. **Análise do comportamento do solo com adição de resíduos de construção e fibras de sisal**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2021.

ALMEIDA, J. L. **Determinação da taxa de infiltração de água através de snesores termopares e de capacitância (FDR) em um solo areno=siltoso remoldado em laboratório**. Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

AKAY, O.; ÖZER, ; A. T.; FOX, G. A.; WRE, D.; WILSON, G. V. Fiber Reinforced Sandy Slopes under Groundwater Return Flow. **J. Irrig. Drain Eng.**, vol. 5, no. 144, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001300).

American Concrete Institute. ACI 302.1R- 96 Guide for concrete floor and slab construction. Michigan, 1997.

ARAÚJO E FARIAS, M. L. .; OLIVEIRA ARAÚJO, H. A. .; GUEDES RODRIGUES, J. K. Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos . **TRANSPORTES**. vol. 31, no. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2750>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS-ABRAINC. **PIB da construção tem alta de 6,9% em 2022 e puxa crescimento da economia**, 2023. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/construcao-civil/2023/03/02/pib-da-construcao-tem-alta-de-69-em-2022-e-puxa-crescimento-da-economia#:~:text=mar%C3%A7o%20de%202023-,PIB%20da%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20tem%20alta%20de%206%2C9%25%20em%202022,crescimento%20de%202%2C9%25>. Acesso em: mai.2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 2016. (Versão corrigida em 2016)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016. (Versão corrigida em 2017)

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016. (Versão corrigida em 2018)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016. (Versão corrigida em 2020)

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, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9604: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9917: Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C. Rio de Janeiro, 2022.

AYLLON, F. M.; TORREECILHA, J. K.; SILVA, P. S. C. Análise por ativação neutrônica instrumental em carbonato gerado na mineração de nióbio. In: SILVA, P. S. C.; ZAHN, G. S.; SOUZA, F. de A. **Contribuições do reator IEA-R1 para a pesquisa nuclear WARP 2**. São Paulo: Blucher, 2022.

BANDEIRA, A. P. N.; MACEDO, C. C. A.; CLARINDO, G. S.; LIMA, M. G. de S.; NETO, J. B. de S. Assessment of potential surface degradation resulting from erosion processes in environmentally protected area. **Soils and Rocks**, vol. 44, no. 1, p. 1–10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2021.052420>.

BANDEIRA, A. P. N.; NUNES, P. H. de S.; LIMA, M. G. de S. Gerenciamento de riscos ambientais em municípios da região metropolitana do Cariri (Ceará). **Ambiente & Sociedade**, vol. 19, no. 4, p. 65–84, 2016.

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, 2010.

BANDERIRA, A. P. N.; MACEDO, C. C. A.; CLARINDO, G. S.; LIMA, M. G. de S.; NETO, J. B. De S. Assessment of potential surface degradation resulting from erosion processes in environmentally protected area. **Soils and Rocks**, vol. 44, no. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2021.052420>.

BARBOSA, F. G. **Estrutura e análise espaço temporal da vegetação do manguezal do Pina, Recife-PE: subsídios para manejo, monitoramento e conservação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Pós-graduação em Geografia, Recife, 2010.

BARRETO, S. S. **Fabricação de tijolos prensados de solo-resíduos-cimento e avaliação de desempenhos térmico e acústico**. Dissertação (Mestrado) Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, 2020.

BASILIO, T. C. C.; FUJIMOTO, J. T.; LOPES, T.; ASCIUTTI, G. A. M.; LORANDI, R.; LOLLO, J. A. Influência da Forma das Encostas na Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Claro (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 71, no. 1, p. 233–252, 2019. DOI: [doi.org/10.14393/rbcv71n1-2172](https://doi.org/10.14393/rbcv71n1-2172).

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1999.

BASTOS, C. A. B.; JÚNIOR, G. de F. N. G.; KUHN, V. de O. Solos Não Saturados e os Processos Erosivos. In: SALES, M. M.; CARVALHO, J. C. de; MASCARENHA, M.M. dos A.; LUZ, M.P. de; SOUZA, N. M. de; ANGELIM, R. R. **Erosão em Borda de Reservatório**. vol. 3. Goiânia, Gráfica UFG, 2017.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Avaliação Geotécnica da Erodibilidade dos Solos. In: **SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL**, vol. 2, p. 203-211, Porto Alegre, 2000.

BERNARDON, L.; WAECHTER, J. L.; SILVA, R. D. A.; LERMEN, R. T.; NOVAES, J. F. Avaliação da substituição total de areia natural por RCC em argamassa de assentamento. **Revista de Arquitetura IMED**, vol. 9, no. 2, p. 173–192, 2020.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.18256/2318-1109.2020.v9i2.4003>.

BEZERRA, J. da S. **Análise do processo erosivo de uma encosta no bairro de Bom Jesus – Ilha de Itamaracá/PE**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Pernambuco, Pós graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.

BISPO, C. de O.; MELO, N. A. de; TOUJAGUEZ, R. Ocupação irregular de encostas urbanas no município de Maceió-AL. **Revista OKARA: Geografia em debate**, vol. 13, no. 1, p. 216–229, 2019. DOI: [10.22478/ufpb.1982-3878.2019v13n1.39080](https://doi.org/10.22478/ufpb.1982-3878.2019v13n1.39080).

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos (Tradução de Antônio B. Neiva Figueiredo Filho)**, 5ª edição, Rio de Janeiro, Ed. Freitas bastos, p. 647, 1979.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília, 2007.

BRASIL. 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 República Federativa do Brasil**, nº 136, p. 95-96, 2002.

BRITO, J. **Técnicas de melhoramento de solos**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Técnico, Programa de Pós-Graduação Construção e Reabilitação. 2002.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. Estabilização de solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, ano 2, v. 1, ed. 6, p. 425-438, 2017.

BRUNING, J.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BOSCAINI, R.; CONCEIÇÃO, C. G. da; GOLLO, E. de D. A. Estimativa da curva de retenção de água no solo por função de pedotransferência. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, vol. 28, no. 1, p. 97–110, 2019. DOI: <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2019v28n1p97-110>.

BULTI, D. T.; ABEBE, B. G.. Analyzing the impacts of urbanization on runoff characteristics in Adama city, Ethiopia. **SN Applied Sciences**, vol. 2, no. 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2961-3>.

BURGOS, P. C.; CONCIANI, W. Cap. 8 – Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos. In: CARVALHO, J. C. de; GITIRANA JUNIOR, G. de F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. dos A.; SILVA FILHO, F. C. da S. (Orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ªed. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 181-204.

CABRAL, A. E. B.; MOREIRA, K. M. de V. **Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil. Sindicato da Indústria da Construção Civil do Ceará**. Programa Qualidade de Vida na Construção. Fortaleza, 2011.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO-CBIC. **Construção é responsável por mais de 50% dos investimentos no País**. Rio de Janeiro: Informativo Econômico, fev. 2019. Disponível em: [https://cbic.org.br/es\\_ES/construcao-e-responsavel-por-mais-de-50-dos-investimentos-no-pais/](https://cbic.org.br/es_ES/construcao-e-responsavel-por-mais-de-50-dos-investimentos-no-pais/) Acesso em: mar.2022.

CARDOSO, A. L.; DENALDI, R. **Urbanização de Favelas no Brasil**. In: MORAES, D.; MIRANDA, L.; SOUZA, M. Â. de A. Entre Camadas de Urbanização e Intervenções Integrais. 1ª ed. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2018.

CARVALHAIS, R. M.; MORAES, N. A.; SILVA, H. F.; BERNARDES, I. M. M. Deslizamento de encostas devido a ocupações irregulares. **Brazilian Journal of Development**, vol. 5, no. 7, p. 9765–9772, 2019. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n7-150>.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. Campina Grande: Marcone. 2004. 310 p.

CARVALHO, L. M. C. **Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala**. 2019. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas em Áreas Urbanas. In: MORAIS, M. da P.; KRAUSE, C.; LIMA NETO, V. C. (ed.). **Caracterização e Tipologia de Assentamentos Precários: estudos de caso brasileiros**. Brasília: Ipea, 2016. p. 540.

CHEN, K.; WU, D.; ZHANG, Z.; PAN, C.; SHEN, X.; XIA, L.; ZANG, J. Modeling and optimization of fly ash–slag-based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization. **Construction and Building Materials**, vol. 315, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125723>.

CHEN, M.; GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. Evaluating Mechanical Strength of Peat Soil Treated by Fiber Incorporated Bio-cementation. **International Journal of GEOMATE**, vol. 20, no. 78, p. 121–127, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21660/2021.78.Gx162>.

CHOOBBASTI, A. J.; KUTANAEI, S. S.; AFRAKOTI, M. T. P. Modeling of compressive strength of cemented sandy soil. **Journal of Adhesion Science and Technology**, vol. 33, no. 8, p. 791–807, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1548535>.



COUTINHO, R. Q., OLIVEIRA, J. R., LIMA FILHO, M. F., COELHO, F. A. A., SANTOS, L. M. Estudo da Erosão da Encosta do Horto de Dois Irmãos – PE. 9o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia (CD-ROM). **Anais** [...]. ABGE, Novembro, São Paulo - SP. 1999.

COUTINHO, R. Q.; MORAIS, B. D. de; OLIVEIRA, M. S. de. Caracterização física e mecânica de solos de encostas da Formação Barreiras localizadas no bairro Ibura (Cohab), Recife-PE. 18 Aug. 2020. **XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica** [...]. [S. l.]: Editora Cubo, 18 Aug. 2020. p. 4717–4724. DOI: <https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0594>.

DA SILVA, T. O.; NETO, S. L. S. D.; FERRAZ, R. L.; PITANGA, H. N.; PAES, B. S. T. Susceptibility to erodibility of residual soils based on correlations of physical-mechanical geotechnical properties. **Anuario do Instituto de Geociencias**, vol. 42, no. 1, p. 188–195, 2019. DOI: [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_188\\_195](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_188_195).

DANSO, H.; MARTINSON, D. B.; ALI, M.; WILLIAMS, J. Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks. **Construction and Building Materials**, vol. 83, p. 314–319, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.039>.

DEJONG, J. T.; MORTENSEN, B. M.; MARTINEZ, B. C.; NELSON, D. C. Bio-mediated soil improvement. **Ecological Engineering**, vol. 36, p. 197–210, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>.

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

DIAS, V. B; FALCÃO, S. M. P.; ANDRADE, C. B. HOLANDA, B.M. Mapeamento De Áreas De Deposição Irregular De Resíduos De Construção E Demolição Em Bairros Da Zona Norte Da Cidade Do Recife-Pe. In: ALMEIDA, I. M. S. de; SILVA, K .A. da; EL-DEIR, S. G. (Orgs.). **Resíduos Sólidos: Gestão e gerenciamento**. 1ªed. Recife: EDUFRPE e Gampe/UFRPE, 2022. p. 351-367.

DINOTTE, A. C. B. P.; SILVA, C. F. A.; ROSSONI, H. A. V. Contribuição dos geoindicadores como ferramenta na identificação dos processos erosivos associados a Antropogeomorfologia. **Ateliê Geográfico**, vol.14, n.1, p.155–173, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5216/ag.v14i1.57150>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME-256/94 - Ensaio de Perda de Massa por Imersão. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 258/94 - Ensaio de Compactação Mini – MCV. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

EDUARDA ALVES E ÁLVARES, L.; CARDOSO RODRIGUES, . E. C. R. .; LOBATO FERREIRA, J. L. F.; ALVES RODRIGUES, J. .; GOMES DOS SANTOS, W. .; MOREIRA DE OLIVEIRA, R. .; NAZARENO PEREIRA CARDOSO, D.; MARQUES VIEGAS, B. Caracterização reológica de geopolímero em estado fluido a partir de resíduos de construção civil da cidade de Belém-PA. **Conjecturas**, vol. 22, no. 18, p. 154–167, 2022.

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: mar. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA–EMBRAPA. **Embrapa Solos: Atributos do Solo.** EMBRAPA, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/atributos-do-solo/outros-atributos#:~:text=Rela%C3%A7%C3%A3o%20silte%2Fargila&text=%C3%89%20empregad a%20em%20solos%20de,textura%20argilosa%20ou%20muito%20argilosa>. Acesso em: mai. 2022.

ESTABRAGH, A. R.; BORDBAR, A. T.; JAVADI, A. A. A Study on the Mechanical Behavior of a Fiber-Clay Composite with Natural Fiber. **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 31, no. 2, p. 501–510, 1 Apr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9602-6>.

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: 26 mar. 2022.

FAUSTINO, O.W.C. **Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.

FERNANDES, J. B. **Estudo da resistência e da deformabilidade de um perfil de solo tropical não saturado.** Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Bauru, 2022.

FIDEM – Fundação de Desenvolvimento Municipal. **Manual de Ocupação dos Morros da Região Metropolitana do Recife.** Recife: 2003. 384p.

FONTOURA, T. B.; COUTINHO, R. Q.; DA SILVA, F. O. T. Geochemical and Mineralogical Contributions in the Study of Sedimentary Rock (Barreiras Formation) Soils, Recife/Brazil: Implications for Landslides. **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 41, p. 205–224, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02274-8>.

FONTOURA, T.; COUTINHO, R.; MORAIS, B. 2D stability and flow analysis of a slope in Recife - PE with Barreiras Formation soil in unsaturated conditions. 337., 2021. **MATEC Web of Conferences** [...]. [S. l.]: EDP Sciences, 2021. vol. 337, DOI: . <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133703017>.

FRANCH-PARDO, I.; NAPOLETANO, B. M.; BOCCO, G.; BARRASA, S.; CANCER-POMAR, L. The role of geographical landscape studies for sustainable territorial planning. **Sustainability (Switzerland)**, vol. 9, no. 11, p. 1–23, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112123>.

FREITAS, P. S. de; SANTOS, P. R. dos; PINTO, E. M.; ESTEVES, I. C. A. Movimentos de massa: A solução por meio dos muros de contenção. **Revista Científica de Ciências Aplicadas da FAIP**, vol. 5, no. 10, p. 30–42, 2018.

GARBER N.; HOEL L. Traffic and highway engineering, 4<sup>th</sup> edn. 2009. West Publishing Company, Boston

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2016.

GIRÃO, O.; CORRÊA, A. C. de B.; GUERRA, A. J. T. Influência da climatologia rítmica sobre áreas de risco: o caso da Região Metropolitana do Recife para os anos de 2000 e 2001. **Revista de Geografia**, vol. 23, no. 1, p. 03-41, 2006.

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**, vol. 10, no. 8, p. e14210817217, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17217>.

GOMES-RIBEIRO, M.; DE QUEIROZ-RIBEIRO, L.-C.. Segregação socioespacial e desigualdades de renda da classe popular na metrópole do Rio de Janeiro, Brasil. **Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales**, vol. 47, no. 142, p. 17–48, 2021. DOI: <https://doi.org/10.7764/EURE.47.142.02>.

GONÇALVES, L. M. da S.; SILVA, L. C. L. da; LAFAYETTE, K. P. V. Avaliação dos riscos de deslizamento no bairro de Sapucaia no município de Olinda, Pernambuco, Brasil. **Gaia Scientia**, vol. 15, no. 1, p. 158–172, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2021v15n1.57079>.

GONÇALVES, R. B. **Significado geomorfológico dos sedimentos cenozóicos do baixo curso do Rio Capibaribe – PE**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de pós-graduação em Geografia, Recife, 2018.

GONG, Y.; HE, Y.; HAN, C.; SHEN, Y.; TAN, G. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2019, p. 1–11, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5725708>.

GRAY, D.H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 109, no. 3, p. 335–353, 1983. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1983)109:3(335).

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**. vol. 21, no. 5, p. 1717-1727, 2017.

HADDAD, A.; JAVDANIAN, H.; EBRHIMPOUR, F. Identification and Stabilization of Dispersive Soils: Case Study of Water Transfer Canal of Simindasht-Garmsar. **Journal of Engineering Geology**, vol. 11, no. 1, p. 29-50, 2017.

HAMZA, M.; IJAZ, N.; FANG, C.; IJAZ, Z. Stabilization of Problematic Expansive Clays using Polypropylene Fiber Reinforcement Experimental Investigation of Stabilization of Clayey Soil by adding Egg Shell Powder View project. **Jordan Journal of Civil Engineering**, vol. 16, no. 4, 2022.

HAN, C.; CHENG, P. Micropore variation and particle fractal representation of lime-stabilised subgrade soil under freeze–thaw cycles. **Road Materials and Pavement Design**, vol. 16, no. 1, p. 19–30, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.956139>.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 30, p. 100–116, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>.

HIDALGO, C.; CARVAJAL, G.; HINCAPIE, A.; MUÑOZ, F.; HERNÁNDEZ, M. Ground Improvement by Construction and Demolition Waste (CDW) Soil Mixture Replacement. **Buildings**, vol. 13, no. 3, p. 779, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13030779>.

HOLANDA, M. J. de O. **Desenvolvimento de Ferramenta de Apoio à Gestão Municipal de Resíduos de Construção e Demolição na Região Metropolitana do Recife**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2018.

HOOVER, J. M.; MOELLER, D.T.; PITT, J.M.; SMITH, S.G.; WAINAINA, N.W. Performance of randomly oriented fiber reinforced roadway soils. Iowa DOT Project-HR-211, **Department of Transportation**, Highway Division, Iowa State University. 1982

IAEG. Comminson “Engineering Geological Mapping” Classification of rocks and soils for engineering geology mapping. Part 1: rock and soil materials. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, Krefeld, vol.19, p.364-371, 1979.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>. Acessado em: 27 de setembro de 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2021**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acessado em: 20 mai. 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

ILLSTON, J. M. [Ed]. Construction Materials; their nature and behaviour. **E & FN Spon**, 2ed.. 518p., 1994 London.

ISLAM, M. T.; CHITTOORI, B. C. S.; BURBANK, M. Evaluating the Applicability of Biostimulated Calcium Carbonate Precipitation to Stabilize Clayey Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 32, no. 3, p. 040193691–0401936911, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003036](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003036).

JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. Estruturação natural de paisagens da Zona da Mata do estado de Pernambuco. **Ciência Geográfica**, vol. XXVI, no. 1, p. 9–33, 2022.

JESUS, J.; BORGES, M. T. Salinização de solos em Portugal. **Revista de Ciência Elementar**, vol. 8, no. 03, p. 1-5, 2020. DOI: [doi.org/10.24927/rce2020.047](https://doi.org/10.24927/rce2020.047)

KAMINO, G.; GOMES, S.; BRAGANÇA, L. Improving the sustainability assessment method SBTool Urban - A critical review of construction and demolition waste (CDW) indicator. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, vol. 225, no. 1, p. 0120041–0120048, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012004>.

KESKINEN, R.; HILLIER, S.; LISKI, E.; NUUTINEN, V.; NYAMBURA, M.; TILJANDER, M. Mineral composition and its relations to readily available element concentrations in cultivated soils of Finland. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, vol. 72, no. 1, p. 751–760, 2022. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09064710.2022.2075790>.

KHANDANI, F. S.; ATAPOUR, H.; RAD, M. Y.; KHOSH, B. An experimental study on the mechanical properties of underground mining backfill materials obtained from recycling of construction and demolition waste. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02046>.

KUASNE, A. **Curso textil em malharia e confecção**. 2º Módulo. Araranguá, 2008. (Apostila). Disponível em: [https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/88/Apostila\\_fibras.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/88/Apostila_fibras.pdf)

KURANLI, Ö. F.; UYSAL, M.; ABBAS, M. T.; ÇOŞGUN, T.; NIŞ, A.; AYGÖRMEZ, Y.; CANPOLAT, O.; AL-MASHHADANI, M. M. Mechanical and durability properties of steel, polypropylene and polyamide fiber reinforced slag-based alkali-activated concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2031302>.

KURUGODU, H. V.; BORDOLOI, S.; HONG, Y.; GARG, Ankit; GARG, Akhil; SREEDEEP, S.; GANDOMI, A. H. Genetic programming for soil-fiber composite assessment. **Advances in Engineering Software**, vol. 122, p. 50–61, 1 Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.04.004>.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo geológico-geotécnico para o entendimento do processo erosivo no parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcante no Cabo de Santo Agostinho / PE**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Pós graduação em Engenharia Civil, Recife, 2006.

LEITE, A. C. G.; GIAVAROTTI, D. M. Padrão territorial e crise do trabalho: oconfinamento como forma deterritorialização das relações sociais capitalistas contemporâneas. **Cuadernos de Geografia: Revista Colombiana de Geografia**, vol. 29, no. 1, p. 32–50, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76443>.

LI, J.-S.; CHEN, X.; LANG, L.; HE, X.-X.; XUE, Q. Evaluation of natural and artificial fiber reinforcements on the mechanical properties of cement-stabilized dredged sediment. **Soils and Foundations**, vol. 63, p. 1–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101319>.

LI, M.; CHAI, S. X.; ZHANG, H. Y.; DU, H. P.; WEI, L. Feasibility of saline soil reinforced with treated wheat straw and lime. **Soils and Foundations**, vol. 52, no. 2, p. 228–238, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.02.003>.

LIANG, S.; XIAO, X.; WANG, J.; WANG, Y.; FENG, D.; ZHU, C. Influence of Fiber Type and Length on Mechanical Properties of MICP-Treated Sand. **Materials**, vol. 15, p. 1–12, 2022. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15114017>.

LIMA, C. S. T. **Caracterização tecnológica de resíduos de escavação de estaca tipo hélice contínua para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife**. 2002. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2002.

LIMA, R. P. de; AVILA JACINTHO, A. E. P. G. de; FORTI, N. C. da S.; PIMENTEL, L. L. Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada. **Revista Matéria**, vol. 27, no. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1343>.

LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, vol. 8, no. 3, p. 110–117, 2013.

LIU, J.-L.; HOU, T.-S.; LUO, Y.-S.; CUI, Y.-X. Experimental Study on Unconsolidated Undrained Shear Strength Characteristics of Synthetic Cotton Fiber Reinforced Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 38, no. 2, p. 1773–1783, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01129-z>.

LIU, J.; BAI, Y.; FENG, Q.; SONG, Z.; WEI, J.; SUN, S.; KANUNGO, D. P. Strength Properties of Sand Reinforced with a Mixture of Organic Polymer Stabilizer and Polypropylene Fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 30, no. 12, p. 040183301–0401833011, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002541](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002541).

LIU, J.; BAI, Y.; SONG, Z.; KANUNGO, D. P.; WANG, Ying; BU, Fan; CHEN, Zhihao; SHI, Xiao. Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer. **Construction and Building Materials**, vol. 253, p. 119164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119164>.

LIU, J.; CHEN, Z.; KANUNGO, D. P.; SONG, Zezhuo; BAI, Yuxia; WANG, Ying; LI, Ding; QIAN, Wei. Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer. **Engineering Geology**, vol. 252, p. 125–135, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.003>.

LIU, Q.; MA, Y. Study on the Impact of New Urbanization on Land Intensive Use - A Case Study of Shaanxi Province. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 768, no. 5, p. 052004, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/768/5/052004>.

LUNA, A. D. (Org.). **Manual para destinação**: orientação ao consumidor sobre como e onde destinar os seus resíduos sólidos em Pernambuco. 3 ed. Recife: Editora UFPE, 2018.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2013.

MAGAGNIN FILHO, N. **Resíduos da Construção Civil na cidade de Londrina**: análise da política de gerenciamento de resíduos da construção civil adotada pelo município e estudo de caso utilizando uma proposta de reciclagem baseada na técnica de estabilização à base de cimento Portland. Tese (Doutorado) –Universidade de São Paulo, Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Carlos, 2015.

MAGALHÃES, J. S. L. A. **Estudo de estabilidade da encosta Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe-PE**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Programa de pós graduação em Engenharia Civil, Recife, 2013.

MAIA, M. A. de O. **Caracterização da ilmenita como fonte de obtenção de dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, 2018.

MÁLIA, M.; BRITO, J. de; PINHEIRO, M. D.; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management and Research**, vol. 31, no. 3, p. 241–255, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X12471707>.

MARINHO, B.; OLIVEIRA, V.; FONSECA, D Chuvas em Pernambuco: corpo de última desaparecida é encontrado e bombeiros encerram buscas; 128 pessoas morreram. **TV GLOBO**, Recife/PE, 03/06/2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/06/03/sobe-para-128-numero-de-mortos-apos-o-corpo-desaparecida-devido-as-chuvas-em-pernambuco-ser-encontrado.ghtml>. Acesso em: 20 de jul. 2022.

MASCARENHA, M. M. A.; MAHLER, C. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; NACINOVIC, M. G. G.; BANDEIRA, A. P. N.; ALMEIDA, J. G. R. Erosão. In: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ª ed. São Paulo: ABMS, 2015, p. 581-609.

MEHRJARDI, G. T.; AZIZI, A.; HAJI-AZIZI, A.; ASDOLLAFARDI, G. Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. **Transportation Geotechnics**, vol. 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349>.

MEIRA, F. F. D. A. **Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, 2008.

MELLO, G. A. **Caracterização de resíduos da construção e demolição em uma usina de reciclagem visando aplicação como pavimento para calçamento**. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade, 2022.

- MELO, C. B. **Utilização de informações espaciais de alta resolução para análise de suscetibilidade de deslizamento sob situação de precipitações intensas**. 2021. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil Recife, 2021.
- MIRANDA, A. C. da S.; LIMA, A. M. M. de. Voçorocas urbanas e protocolo de avaliação de risco geoambiental aplicado em Açailândia-MA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 14, no. 2, p. 492–506, 2021. DOI: [10.26848/rbgf.v14.2.p492-506](https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p492-506)
- MORANDINI, T. L. C.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. **Holos Environment**, vol. 17, no. 1, p. 66–78, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v17i1.11887>.
- MONTEIRO, E. Z.; PINA, S. A. M. G.; FREIRE, R. A.; TURCZYN, D. T.. The study of urban morphology in Campinas Metropolitan Region, Brazil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, vol. 12, p. 1–14, 2020. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.E20190260>.
- MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; MIGUEL, P.; HORST, T. Z. Erosão em áreas de encosta com solos frágeis e sua relação com a cobertura do solo. **Revista Scientia Agraria**, vol. 19, no. 1, p. 102–112, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/rsa.v19i1.53738>.
- MOUSAVI, S. E.; KARAMVAND, A. Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, vol. 4, no. 4, p. 412–421, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.02.002>.
- NASCIMENTO, E. C. **Avaliação das propriedades do agregado reciclado da construção civil para utilização em sistema de cobertura final de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2019.
- NASCIMENTO, E. C. do; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, L. C. L. da; BEZERRA, J. da S.; PORTELA, M. F. de Al. Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, vol. 10, no. 10, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19158>.
- NASCIMENTO, M.A.; RIOS, D. C., SANTOS, I. P. L. dos.; CONCEIÇÃO, H. Ilmenitas Manganíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos: Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia. **Anuario do Instituto de Geociências**, vol. 41, no. 3, p. 658–671, 2018. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_658\\_671](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_658_671)
- NASCIMENTO, L. A. do; SILVA, T. A. da; LAFAYETTE, K. P. V.; SANTOS, M. J. P. dos; CAVALCANTI, A. R. Urbanização desordenada e degradação ambiental associados a escorregamentos: uma abordagem metodológica para análise temporal de ocupações subnormais. **Ciência e Natura**, vol. 42, p. e81, 2020. DOI: [10.5902/2179460X41198](https://doi.org/10.5902/2179460X41198).
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo, 1995.



OLIVEIRA, A. M. da S.; RIBEIRO, D. F.; GONZAGA, L. G. das M. Utilização do método anova em amostras de concreto leve com pérolas de eps: uma abordagem didática voltada para o ensino de estatística nos cursos de graduação em engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, vol. 41, no. 1, p. 3–15, 2022. <https://doi.org/10.37702/ree2236-0158.v41p3-15.2022>.

OLIVEIRA, A. S. de; PIERANGELI, M. A. P.; SOUSA, J. B. de; LOPES, H. S. S.; GALBIATI, C.; SOUZA, C. A. de; CLAUDINO, W. V. Caracterização morfológica, física e química de solos da bacia hidrográfica do médio curso do rio Teles Pires, no Município de Alta Floresta - MT. **Research, Society and Development**, vol. 10, no. 9, 2021. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18157>.

OLIVEIRA, G. B. S.; BRITO, E. R. de A. C.; LIMA, L. A.; SOUSA, L. V. de; OLIVEIRA, F. de A. de. Mapeamento da deposição irregular dos resíduos provenientes da construção civil na cidade de Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, vol. 11, no. 3, p. 86–90, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v11i3.4345>.

OLIVEIRA, J. C. de A. N.; CAVALCANTI, T. M. D.; RIBEIRO, M. I. de P. Estabilização de taludes através da utilização de muros de arrimo. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, vol. 4, no. 1, p. 45–65, 2021.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>

ORASUTTHIKUL, S.; UNNO, D.; YOKOTA, H. Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar. **Construction and Building Materials**, vol. 146, p. 594–602, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.134>.

ORDOÑEZ MUÑOZ, Y.; IZZO, R. L. dos S.; ALMEIDA, J. L. de; BALDOVINO, J. A.; ROSE, J. L. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirota formation. **Transportation Geotechnics**, vol. 31, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100673>.

OWINO, A. O.; HOSSAIN, Z. The influence of basalt fiber filament length on shear strength development of chemically stabilized soils for ground improvement. **Construction and Building Materials**, vol. 374, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130930>.

PACHAURI, S.; PRIYA, M. I.; GARG, A. Comparative analysis of strength characteristics of soil reinforced with coir and polypropylene fibers. **Lecture Notes in Civil Engineering**, vol. 14, p. 355–361, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7\\_40](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_40).

PACHECO, M. S. M. **Análise da variabilidade e dispersão espacial elementar em solos e sedimentos por micro fluorescência de raio X – um caso de estudo**. Dissertação (Mestrado) Universidade Nova de Lisboa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geológica, 2020.

PAIVA, M. C.; SILVA, A. P. da; KUHN, V. de O.; MENÉNDEZ, O. H. Caracterização de um Solo Arenoso Fino Laterítico para Base de Pavimentos. **Revista de Ciências e Tecnologia**, vol. 5, no. 8, 2019.

PALACIO-LEÓN, O.; PORRAS, A. C.; CASTIBLANCO, Y. L. V. Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. **Revista Tecnura**, vol. 21, no. 53, p. 96–106, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.8195>.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p, 2016.

PAZ, D.; LAFAYETTE, K.; SOBRAL, M. do C.; HOLANDA, M. J.; XIMENES, T. Riscos de impactos ambientais proveniente da deposição irregular de Resíduos da Construção Civil em bacias hidrográficas da Região Metropolitana do Recife. **Águas Subterrâneas**, vol. 32, no. 3, p. 325–336, 2018. Doi: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29149>

PEDROSA, A. A. **Comportamento geomecânico de solo reforçado com resíduo da construção civil e fibras de polietileno tereftalato (PER)**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2021.

PEREIRA, L. A. de F.; AMORIM, E. F.; MOTTA, L. M. G. da. A. Análise de Solo misturado com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para uso em Obras Rodoviárias. **Research, Society and Development**, vol. 11, no. 8, 2022. Doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30315>

PEREIRA, L. A. de F. **Análise comparativa de estruturas de pavimentos utilizando RCD e dimensionadas a partir de parâmetros distintos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2021.

PEREIRA, P. B.; NUNES, H. K. de B.; ARAÚJO, F. de A. da S. Análise multitemporal de uso, ocupação e cobertura da terra na zona Leste da cidade de Caxias/Maranhão/Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física v**, vol. 14, no 3, p. 1415–1428, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1415-1428>.

PESSANHA, V. H. M.; MARTINS, C. de P.; RODRIGUEZ, T. T. Caracterização e Compactação de Misturas de Solo Argiloso com Resíduo da Construção Civil. *In*: 5ª Edição do Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste - Geocentro, 2019, Brasília-DF. **Anais** [...]. ABMS-Núcleo Centro-Oeste, 2019.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. 2007. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Recife, 2007.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Classificação dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Serra da Prata, estado do Paraná. **Geoinjá: Revista do**

**Programa de Pós-Graduação em Geografia**, vol. 4, no. 1, p. 3–27, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4025/geoinga.v4i1.49152>

PMRR - Plano Municipal de Redução de Riscos em Assentamentos Precários do Município de Recife-PE, 2006.

POLOVINA, S.; RADIĆ, B.; RISTIĆ, R.; KOVAČEVIĆ, J.; MILČANOVIĆ, V.; ŽIVANOVIĆ, N. Soil erosion assessment and prediction in urban landscapes: A new G2 model approach. **Applied Sciences (Switzerland)**, vol. 11, no. 9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11094154>.

PORTELA, M. F. A. **Avaliação da dispersividade e resistência à compressão de compósitos de um solo da formação barreiras com RCD e cal**. 2019. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 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**, vol. 10, no. 1, 2021. Doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11959>.

Prefeitura da cidade do Recife (PCR). **Caracterização do território**. Disponível em: <<http://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>>. Acessado em: 27 de setembro de 2021a.

Prefeitura da cidade do Recife (PCR). **Informações socioeconômicas**. Disponível em: <<http://www2.recife.pe.gov.br/pagina/informacoes-socioeconomicas>>. Acessado em: 18 de outubro de 2021b.

Prefeitura da cidade do Recife (PCR). **Recife tem mês mais chuvoso dos últimos 33 anos**. 2011. Disponível em: <<https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/02/05/2011/recife-tem-mes-mais-chuvoso-dos-ultimos-33-anos>>. Acessado em: 05 de dezembro de 2022.

Prefeitura da cidade do Recife (PCR). **As unidades protegidas do Recife: a cidade do Recife e seu patrimônio ambiental**. 2012. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/wp-content/uploads/UNIDADES-DE-CONSERVA%20c3%87%20c3%83O-MUNICIPAIS.pdf>. Acesso em: 10 de março de 2022.

Prefeitura da cidade do Recife (PCR). **Serviço para o cidadão: Macaxeira**. Disponível em: <<https://www2.recife.pe.gov.br/servico/macaxeira?op=NTI4Mg==>>. Acessado em: 05 de abril de 2022.

Prefeitura de Volta Redonda. Furban-VR inicia melhorias nos bairros Açude e Roma II. Publicado em 13/09/2021. Disponível em: <https://www.voltaredonda.rj.gov.br/noticias/4064-furban-vr-inicia-melhorias-nos-bairros-a-a%20C3%A7ude-e-roma-ii/>. Acesso: 01 abril de 2023.

QUARIGUASI, J. B. F.; GONÇALVES, H. B. B.; OLIVEIRA, F. H. L. de; AGUIAR, M. 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

RECIFE, Decreto n. 27.399, de 27 de setembro de 2013. **Regulamenta as unidades de recebimento de resíduos sólidos oriundos de pequenos geradores, no âmbito do Município do Recife**. Diário Oficial Municipal do Recife, Recife, PE, set 2013.

RENGASAMY, P.; TAVAKKOLI, E.; MCDONALD, G. K. Exchangeable cations and clay dispersion: net dispersive charge, a new concept for dispersive soil. **European Journal of soil science**, Australia, vol. 67, p. 659 – 665, 2016.

REUTERS. **Homem observa destroços de uma casa que desabou durante um deslizamento de terra causado por fortes chuvas no Jardim Monte Verde em Recife**. mai/2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-61621022> Acesso: 22 jun. 2022.

REZAEIMALEK, S.; HUANG, J.; BIN-SHAFIQUE, S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. **Construction and Building Materials**, vol. 146, p. 210–220, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.093>.

ROCCATI, A.; PALIAGA, G.; LUINO, F.; FACCINI, F.; TURCONI, L. Gis-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. **Land**, vol. 10, no. 162, p. 1–28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10020162>.

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

RODRIGUES, M. H. R. **Otimização da dosagem e das propriedades mecânicas e de expansibilidade de misturas entre solos e coprodutos siderúrgicos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, 2022.

ROMERO, L. L.; VIEIRA, J. O. W. M.; MEDEIROS, L. A. R. de; MARTINS, R. F. Fibras artificiais e sintéticas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 1 , p. [54]-66, 1995.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, vol. 8, p. 3-74, 1994.

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.

SANTA ROSA, J. M. de S.; LAFAYETTE, K. P. V.; DANTAS, D. M. de M; SILVA, G. R. da. Produção De Tijolos Ecológicos: Incorporação De Resíduos Alternativos. *In: ALMEIDA, I. M. S. de; SILVA, K .A. da; EL-DEIR, S. G. (Orgs.). Resíduos Sólidos: Gestão e gerenciamento*. 1ªed. Recife: EDUFRPE e Gampe/UFRPE, 2022. p. 351-367.

SANTANA, J. K. R. de. Análise evolutiva da ocupação dos morros da cidade do Recife. XVI Simpósio Nacional de Geografia Urbana (SIMPURB). **Anais** [...]. Teatro da UFES e CCHN, Novembro, 2019.

SANTANA, J. K. R. de. **Aplicação do Modelo Hierárquico Analítico (AHP) na previsão das áreas de perigo a escorregamentos em Recife (PE)**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2020.

SANTANA, J. K. R. de; SILVA, D. R. D.; SANTOS, E. M. dos; SANTOS, G. F. S. dos; LISTO, F. de L. R. Análise da evolução das áreas de perigo a escorregamentos no bairro da Macaxeira, Recife (PE). **Revista Equador**, vol. 8, no. 2, p. 240–256, 2019.

SANTOS, C. L. dos; SILVA, O. G. da; VITAL, S. R. O. Mapeamento de Áreas de Risco Associadas ao Carste em Área Urbana no Município de João Pessoa-PB. **Sociedade & Natureza**, vol. 34, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.14393/sn-v34-2022-63641>.

SANTOS, E. de O.; FALCÃO, N. A. de M.; LIMA, J. V. A. de. Deslizamento de encostas urbanas: consequências e implicações sociais, ambientais e políticas, em Viçosa/AL, Brasil. **Diversitas Journal**, vol. 5, no. 3, p. 1859–1886, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v5i3-1176>.

SANTOS, E. P. da S.; LIMA, F. G. F.; DA SILVA, E. F.; DE FREITAS, D. F.; FERREIRA, E. de A.; VASCONCELOS, A. de A. Physical, chemical, and mineralogical attributes and organic fractions of biogenic aggregates of earthworms and toposequence of inceptisol in semi-arid region. **Ciencia e Agrotecnologia**, vol. 45, 2021. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145014721>.

SANTOS, I. S.; SILVA, M. C. da C.; AZEVEDO, G. D. A.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, S. R. da. Avaliação espaço-temporal do processo de uso e ocupação de uma encosta no bairro de Macaxeira - Recife / PE - Brasil. **Revista de Geografia**, vol. 40, no. 1, p. 334-358, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.257514>.

SANTOS, I. S.; SILVA, F. G. A. da; MOURA JR., J. Maria de; LAFAYETTE, K. P. V.; KOHLMAN RABBANI, E. R. Reforço de solo erodível com utilização de fibras: Uma revisão sistemática da literatura. **Conjecturas**, vol. 22, no. 6, p. 288–304, 2022. DOI: [10.53660/CONJ-1042-P15](https://doi.org/10.53660/CONJ-1042-P15).

SANTOS, L. R. dos; CRISPIM, F. A.; PAULO, P. R. del. Estabilização de Solos com um Aditivo a Base de Enzimas para fins Rodoviários. **E&S Engineering and Science**, vol. 7, no. 3, p. 2–11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18607/es201876930>.

SANTOS, M. J. P. dos; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, T. A. da; PORTELA, M. F. de A.; BEZERRA, J. da S.; FERREIRA, S. R. de M.; NETO, M. Ma. C. Landscape Transformation: Temporal Evolution of the Erosion Process on a Hillside on the Island of Itamaracá / Brazil. **Technology, and Sciences (ASRJETS) American Scientific Research Journal for Engineering**, vol. 77, no. 1, p. 63–75, 2021.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de;

OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

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

SCARIOT, K. A. L. **Estudo paramétrico da resistência ao cisalhamento de um solo de baixa capacidade de suporte**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Campina Grande, Pós graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, 2018.

SEDUC - Secretaria de Educação do Ceará. **Fibra Têxtil**. Curso técnico em tecelagem. Ceará, 2012. (Apostila). Disponível em:  
[https://educacaoprofissional.seduc.ce.gov.br/images/material\\_didatico/textil/textil\\_fibras\\_texteis.pdf](https://educacaoprofissional.seduc.ce.gov.br/images/material_didatico/textil/textil_fibras_texteis.pdf)

SHEIKHMOHAMMADI, A.; MOHSENI, S. M.; KHODADADI, R.; SARDAR, M.; ABTAHI, M.; MAHDAVI, S.; KERAMATI, H.; DAHAGHIN, Z.; REZAEI, S.; ALMASIAN, M.; SARKHOSH, M.; FARAJI, M.; NAZARI, S. Application of graphene oxide modified with 8-hydroxyquinoline for the adsorption of Cr (VI) from wastewater: Optimization, kinetic, thermodynamic and equilibrium studies. **Journal of Molecular Liquids**, vol. 233, p. 75–88, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.101>.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S. Identification and nature of dispersive soils. **ASCE, Divisão Geotécnica**, Vol. 102, GT4, 1976.

SHUKLA, S.K. Fundamentals of FibreReinforced Soil Engineering, **Springer Nature Singapore Pte Ltd.**, pp.23-44, 2017.

SILVA, A. C. da. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 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, vol. 24, no. 2, p. e-12355, 2019.

SILVA, A. F. **Condições naturais e uso do solo**. In: JATOBÁ, L.; LINS, R. C.; SILVA, A. F. Tópicos especiais de geografia física. 2. ed. Petrolina: Progresso, v. 1, p. 109-142, 2014.

SILVA, C. F. A. da; BARRETO, E. P.; SHULLER, C. A. B.; FERREIRA, B.; MELO, W. D. A. Evolução multi-temporal do uso e ocupação do solo no entorno do campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco Zona Oeste da Cidade do Recife. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 9, no. 2, p. 319–333, 2016. DOI: [10.26848/rbgf.v9.2.p319-333](https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p319-333).

SILVA, T. A. **Análise do comportamento geomecânico de compósitos de solo, resíduos de madeira e de construção para redução de processos erosivos**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 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**, vol. 9, no. 6, p. 3766-3788, 2021.

SILVA, T. M. da. **Resistência do concreto com agregado reciclado de resíduo de construção civil em relação à corrosão de armaduras sob ação de CO<sub>2</sub> e Cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2020.

SILVEIRA, M. R. **Efeito da inclusão de tiras poliméricas de polietileno tereftalato e da adição de cimento na resistência mecânica de solo arenoso laterítico**. 2019. Dissertação (Mestrada), Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, 2019.

SINGH, A., ALI JAWAID, S.M. AND CHAURASIA SHREE RAM. Techniques to improve the strength of ground. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, vol. 4, No. 4, pp.754-760, 2016.

SOARES, D. L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E. V.; DA MOTTA, L. M. G.; DE SOUZA, C. C. Erodibilidade de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada. **Anuário do Instituto de Geociências**, vol. 41, no. 1, p. 179–193, 2018. [https://doi.org/10.11137/2018\\_1\\_179\\_193](https://doi.org/10.11137/2018_1_179_193).

SOHAIB, N.; MAMOON, R.; SANA, G. C.; SEEMAB, F. Using Polypropylene Fibers in Concrete to achieve maximum strength. **Proc of the Eighth International Conference on Advances in Civil and Structural Engineering**, p. 37–42, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-145-0-36>.

SONG, J.; ZHOU, Y.; JIN, L.; SUN, Y. Evaluating Sustainability of Urbanization from a Multidimensional Perspective: A Case Study of 11 National Urban Agglomerations in China. **Journal of Urban Planning and Development**, vol. 147, no. 4, p. 050210471–0502104712, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000769](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000769).

SONMEZER, Y. B. Investigation of the liquefaction potential of fiber-reinforced sand. **Geomechanics and Engineering**, vol. 18, no. 5, p. 503–513, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2019.18.5.503>.

SOUSA, R. S. de; POLIVANOV, H.; BARROSO, E. V. Erodibilidade de solos derivados de rochas da suíte serra dos órgãos: Implicações para a instabilidade de taludes de corte. **Revista Geociências**, vol. 38, no. 4, p. 1053–1066, 2019.

SOUZA, A. P. L. **Estudos geotécnicos e de estabilidade de taludes da encosta do Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe-PE**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, 2014.

SOUZA, J. L. **Morfodinâmica e processos superficiais das unidades de relevo da planície do Recife**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Pós Graduação em Geografia, Recife, 2013.

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**, vol. 20, no. 4, p. 261-280, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-8621202000040047>

SOUZA, W. M. de; AZEVEDO, P. V. de; ASSIS, J. M. O. de; SOBRAL, M. do C. Áreas de risco mais vulneráveis aos desastres decorrentes das chuvas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, no. 34, p. 79–94, 2014.

SOUZA, J. L.; CORRÊA, A. C. B.; GIRÃO, O. Compartimentação geomorfológica da planície do Recife, Pernambuco, Brasil. **Revista de Geografia (Recife)**. vol. 34, no. 1, 2017.

SULUGURU, A. K.. Experimental investigations on potential of brick-based building-derived materials for geotechnical applications. **Innovative Infrastructure Solutions**, vol. 5, no. 85, p. 1–11, 1 Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00336-5>.

SUN, S.; LIU, H.; SHI, C.; XU, L.; SUI, Y. Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Cemented Silty Sand: Laboratory Tests, Statistical Analysis and Microscopic Mechanism. **Applied Sciences**, vol. 13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13063493>.

SURYANI, I.; MUTIARA, R.; AR, S. H.; MUCHLISAH, N. Morphological, chemical, mineralogical properties and soil classifications in some toposequens of mamuju district west sulawesi. **Jurnal Ecosolum**, vol. 10, no. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20956/ecosolum.v10i2.18240>.

TA'NEGONBADI, B.; NOORZAD, R.; SHAKERY, P. Engineering properties of sand reinforced with plastic waste. **Scientia Iranica**, vol. 28, no. 3, p. 1212–1222, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24200/sci.2020.55886.4448>.

TANKO, A.; IJIMDIYA, T. S.; OSINUBI, K. J. Effect of Inclusion of Randomly Oriented Sisal Fibre on Some Geotechnical Properties of Lateritic Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 36, no. 5, p. 3203–3209, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0530-y>.

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. Longman Scientific & Technical, 2ed, 284p., London, 1994.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. In: TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B. de; SALDANHA, M. F. C. Capítulo 1 – pH do Solo. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, W.; TAIOLI, F.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, C. Decifrando a Terra. 1ª Edição, **Oficina de Textos**, São Paulo, SP, p. 623, 2000.

THOMA, A. C.; TASSINARI, D.; PRAT, B. V.; FERNANDES, J. S. C.; SILVA, A. C. Erodibilidade de Neossolo Litólico pelo ensaio de Inderbitzen modificado e eficiência de



blocos de solo-cimento para controle da erosão hídrica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, vol. 27, no. 3, p. 511–522, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210099>.

TRAN, K.Q; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Effect of Waste Cornsilk Fiber Reinforcement on Mechanical Properties of Soft Soils. **Transportation Geotechnics**, vol. 16, p.76-84, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>

TORIO-KAIMO, L. V.; DIEGO, A. M. S.; ALCANTARA, M. T. M. Unconfined compressive strength of clay reinforced with kerosene-treated coir fiber. **International Journal of GEOMATE**, vol. 18, no. 69, p. 97–103, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21660/2020.69.9295>.

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: 20 mar. 2022.

TURKANE S. D.; CHOUKSEY, S. K. Application of response surface method for optimization of stabilizer dosages in soil stabilization. **Innovative Infrastructure Solutions**, vol. 7, no. 106, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00704-9>

UNEP Annual Report 2010: United Nations Environment Programme; ISBN 9789280731491, 2011.

URS, Y.C.; NANJUNDA, K.N.; THEJAS, H.K. Effect of Glass and Coir Fiber on Geotechnical Properties of Clayey Soil. **International Journal of Advanced Science and Technology**, vol. 29, no. 3, p. 5212 – 5218, 2020.

USDA, Soil Survey Division Staff. Soil survey manual. Department of Agriculture Handbook 18, 2018.

VAKILI, A. H.; GHASEMI, J.; BIN SELAMAT, M. R.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S. Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, vol. 193, p. 405–415, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.213>.

VALIPOUR, M.; SHOURIJEH, P. T.; MOHAMMADINIA, A. Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. **Transportation Geotechnics**, vol. 27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>.

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, vol. 11, no. 8, p.1311, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma11081311>.

WEI, L.; CHAI, S. X.; ZHANG, H. Y.; SHI, Q. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. **Construction and Building Materials**, vol. 172, p. 300–308, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248>.

WHIFFIN, V. S.; VAN PAASSEN, L. A.; HARKES, M. P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. **Geomicrobiology Journal**, vol. 24, no. 5, p. 417–423, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490450701436505>.

YANG, D.; LIU, M.; ZHANG, Z.; YAO, P.; MA, Z. Properties and modification of sustainable foam concrete including eco-friendly recycled powder from concrete waste. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 16, p. e00826, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00826>.

YANG, K.-H.; WEI, S.-B.; ADILEHOU, W. M.; HO, H.-C. Fiber-reinforced internally unstable soil against suffusion failure. **Construction and Building Materials**, vol. 222, p. 458–473, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.142>.

YARBAŞI, N.; KALKAN, E. The Mechanical Performance of Clayey Soils Reinforced with Waste PET Fibers. **International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications**, vol. 2, no. 1, p. 19–26, 2020.

YOUSEFPOUR, N.; MEDINA CETINA, Z.; HERNANDEZ-MARTINEZ, F.G.; ALTABBAA, A. Stiffness and Strength of Stabilized Organic Soils—Part II/II: Parametric Analysis and Modeling with Machine Learning. **Geosciences**, Basel, vol. 11, no. 5, p. 218, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences11050218>.

YUAN, S.; YANG, B.; LIU, J.; CAO, B. Influence of fibers on desiccation cracks in sodic soil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, vol. 80, no. 4, p. 3207–3216, 2021. DOI: [doi.org/10.1007/s10064-021-02123-7](https://doi.org/10.1007/s10064-021-02123-7).

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>.

ZHAO, Y.; XIAO, Z.; FAN, C.; SHEN, W.; WANG, Q.; LIU, P. Comparative mechanical behaviors of four fiber-reinforced sand cemented by microbially induced carbonate precipitation. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, vol. 79, no. 6, p. 3075–3086, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01756-4>.

ZHOU L., LIU Y., LU J., ZHOU W., WANG H. Influence of recycled concrete powder (RCP) and recycled brick powder (RBP) on the physical/mechanical properties and durability of raw soil. **Coatings**. vol. 11, no. 12, p. 1475, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11121475>

ZHU Q., YUAN Y.-X., CHEN J.-H., FAN L., YANG H. Research on the high-temperature resistance of recycled aggregate concrete with iron tailing sand. **Construction and Building Material**. vol. 327, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126889>