



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

SUYANNE MONTEIRO DE ALMEIDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E FIBRAS DE SISAL**

Recife, PE
2021



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

SUYANNE MONTEIRO DE ALMEIDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E FIBRAS DE SISAL**

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

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof^a. Dr^a. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Recife, PE
2021

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

A447a Almeida, Suyanne Monteiro
Análise do comportamento do solo com adição de resíduos de construção e fibras de sisal. / Suyanne Monteiro Almeida. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2021.

130 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

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

1. Construção Civil. 2. Áreas de Risco. 3. Agregado Reciclado. 4. Resistência do Solo. I. Engenharia Civil - Dissertação. II. Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690.028

SUYANNE MONTEIRO DE ALMEIDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E FIBRAS DE SISAL**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora



Profa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco

Examinadores



Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Recife-PE
2021

DEDICATÓRIA

A Deus pela sua imensa misericórdia e amor.
Aos meus pais, Mário Ferreira e Silvana Monteiro, por
todo amor, sustento e apoio nas horas difíceis, e aos
meus irmãos, Augusto e Mário.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força e sustento que tem me concedido esse tempo, principalmente nas horas difíceis quando mais achei que não seria capaz, Ele acreditou em mim e na minha capacidade.

Aos meus pais que foram exemplos de gentileza e dedicação que tanto me incetivaram a concluir a pesquisa. Aos meus irmãos que me apoiaram em todos os momentos e acreditaram no meu potencial.

A minha orientadora do mestrado, professora Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette, por todo esforço e credibilidade depositados em mim, mesmo quando nem eu mesma acreditei, e por todo tempo dedicado às correções em busca de um trabalho bem executado.

Aos meus colegas da turma 2019.1 que fizeram parte dessa caminhada e auxiliaram para que tudo fosse menos complicado. Em especial, agradeço a Aléssia Albuquerque que foi minha grande dupla do mestrado, auxiliando na execução das etapas para conclusão da pesquisa.

A minha amiga e parceira nos ensaios laboratoriais, Claudenice da Silva, que me ajudou fielmente na execução dos ensaios, sendo parte fundamental para realização desses sonhos.

Aos meus amigos, que foram tão presentes na minha vida, principalmente no momento mais difícil, e me deram força para que a pesquisa fosse concluída e bem realizada.

A Universidade de Pernambuco (POLI-UPE) pelo apoio financeiro, concedendo minha bolsa de estudos que foi fundamental para a minha permanência e conclusão do mestrado mesmo em épocas tão difíceis.

Por fim, agradeço a todos os professores e colaboradores do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco que de alguma forma fizeram parte dessa conquista e me ajudaram durante o percurso.

RESUMO

A indústria da construção civil apresenta um papel fundamental para a economia do país, gerando empregos e fornecendo projetos de infraestrutura que melhoram a vida da sociedade. Apesar disso, a alta quantidade de resíduos gerados e o alto consumo de recursos naturais tem sido um dos grandes problemas ocasionados pelo setor, principalmente em grandes centros urbanos. Outro problema comum em grandes cidades é a ocupação irregular do solo em locais já considerados naturalmente áreas de risco, como as encostas. Nesse sentido, o objetivo do trabalho é avaliar o comportamento do solo de uma encosta localizada no município de Recife-PE, no bairro de Dois Unidos, após a adição de agregado reciclado e fibras de sisal. A área escolhida foi palco de um deslizamento de solo em julho de 2019 que acarretou na morte de um dos moradores do local, além de trazer inúmeros danos econômicos, ambientais e sociais para a área. Inicialmente, foi realizada a coleta dos materiais necessários para a execução da pesquisa. Em seguida, foi realizada a análise temporal do local verificando a influência da urbanização para o processo de estabilidade da encosta. Foram realizados ensaios de caracterização física, como granulometria, densidade real e limites de *Atterberg*; e ensaios de caracterização mecânica, como compactação e compressão simples para os compósitos formados por solo; solo e agregado; solo, fibra e agregado; e solo e fibra, além dos ensaios de caracterização química e mineralógica do solo e do agregado. Por fim, foi realizada a análise estatística com o objetivo de encontrar os teores ótimos de cada material. Com a análise temporal, foi verificado que a área referente a mancha urbana passou a ocupar 75% da área de estudo, ao passo que a área referente a vegetação reduziu 83,11% ao longo dos anos. Os ensaios de caracterização física mostraram que o solo da encosta corresponde a uma argila arenosa com baixa plasticidade. Os ensaios de compactação mostraram que o aumento do percentual de fibras reduziu a densidade seca máxima, enquanto que a umidade ótima das misturas aumentou. O maior valor de umidade ótima foi encontrado para a mistura de solo e fibra no teor de 0,50%. O ensaio de compressão simples foi realizado para os corpos de prova com idades de 7, 28 e 60 dias, em que o acréscimo de fibra no teor de 0,50% elevou a resistência do material em 36,60%, 69,10% e 58,70% quando comparadas ao solo natural, respectivamente. O valor máximo de resistência foi de 860,15 kPa para a mistura de solo e fibra (0,50%) aos 60 dias. A análise estatística apresentou como resultado o percentual de 16,16% para o resíduo e 0,50% para a fibra, com tempo de cura de 60 dias. Dessa forma, conclui-se que a adição de fibras de sisal e agregado reciclado no solo apresenta viabilidade técnica para uso como material de reforço.

Palavras-chave: Construção civil. Áreas de risco. Agregado reciclado. Resistência do solo.

ABSTRACT

The construction industry plays a fundamental role in the country's economy, generating jobs and providing infrastructure projects that improve society's life. Despite this, the high amount of waste generated and the high consumption of natural resources has been one of the major problems caused by the sector, especially in large urban centers. Another common problem in big cities is the irregular occupation of the land in places already considered naturally risky areas, such as slopes. In this sense, the objective of this work is to evaluate the soil behavior of a slope located in the city of Recife-PE, in the neighborhood of Dois Unidos, after the addition of recycled aggregate and sisal fibers. The chosen area was the scene of a landslide in July 2019 that resulted in the death of one of the local residents, in addition to causing numerous economic, environmental and social damages to the area. Initially, the necessary materials were collected to carry out the research. Then, a temporal analysis of the site was carried out, verifying the influence of urbanization on the slope stability process. Physical characterization tests were carried out, such as particle size, real density and Atterberg limits; and mechanical characterization tests, such as compaction and simple compression for the composites formed by soil; soil and aggregate; soil, fiber and aggregate; and soil and fiber, in addition to chemical and mineralogical soil and aggregate characterization tests. Finally, a statistical analysis was performed in order to find the optimal contents of each material. With the temporal analysis, it was verified that the area referring to the urban area started to occupy 75% of the study area, while the area referring to vegetation reduced 83.11% over the years. The physical characterization tests showed that the slope soil corresponds to a sandy clay with low plasticity. Compaction tests showed that increasing the percentage of fibers reduced the maximum dry density, while the optimum moisture content increased. The highest value of optimal moisture was found for the mixture of soil and fiber at a content of 0.50%. The simple compression test was performed for specimens aged 7, 28 and 60 days, in which the addition of fiber at 0.50% content increased the strength of the material by 36.60%, 69.10% and 58.70% when compared to natural soil, respectively. The maximum resistance value was 860.15 kPa for the soil and fiber mixture (0.50%) at 60 days. The statistical analysis resulted in a percentage of 16.16% for the residue and 0.50% for the fiber, with a curing time of 60 days. Thus, it is concluded that the addition of sisal fibers and recycled aggregate in the soil presents technical feasibility for use as a reinforcement material.

Keywords: Civil construction. Risk areas. Recycled aggregate. Soil resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Ocupação irregular de encostas em Recife-PE.	23
Figura 2 – Ocupação irregular de encostas em Niterói-RJ.....	24
Figura 3 – Classificação dos Resíduos da Construção Civil (RCC).	28
Figura 4 – Deposição irregular de resíduos.	28
Figura 5 – Deposição de RCC em encosta.	35
Figura 6 – Transmissão de cargas para o solo.	36
Figura 7 – Fibras de coco.	40
Figura 8 – Fibras de coco babaçu.	40
Figura 9 – Fibras de sisal.	41
Figura 10 – Fibras de curauá naturais cortadas (a) e desfibriladas (b).	43
Figura 11 – Execução de forro de gesso.	44
Figura 12 – Localização da área.	47
Figura 13 – Encosta de estudo.	48
Figura 14 – Vegetação da cidade do Recife-PE.	50
Figura 15 – Precipitações médias anuais entre os anos de 2009 e 2021 no município do Recife (Posto da Várzea e Santo Amaro).	51
Figura 16 – Precipitações médias mensais no ano de 2019 no município do Recife (Posto da Várzea e Santo Amaro).	52
Figura 17 – Mapa de solos da cidade do Recife-PE.	54
Figura 18 – Mapa geológico da cidade do Recife-PE.	56
Figura 19 – Rio Capibaribe.	57
Figura 20 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.	58
Figura 21 – Solo sendo coletado.	59
Figura 22 – Secagem do solo em laboratório.	60
Figura 23 – Solo sendo destorroado.	60
Figura 24 – Solo sendo homogeneizado.	60
Figura 25 – Agregado reciclado.	61
Figura 26 – Fibra de sisal utilizada.	62
Figura 27 – Fluxograma das relações entre os compósitos.	63
Figura 28 – Sedimentação do solo.	66
Figura 29 – Ensaio de densidade real.	66
Figura 30 – Extração do corpo de prova para retirada da umidade.	68

Figura 31 – Moldagem estática dos corpos de prova.	69
Figura 32 – Rompimento dos corpos de prova.	70
Figura 33 – Lupa binocular utilizada.	71
Figura 34 – Difratorômetro do ensaio.	72
Figura 35 – Percentuais das áreas para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.	77
Figura 36 – Uso e ocupação da área da encosta em 1975.	78
Figura 37 – Uso e ocupação da área da encosta em 1985.	79
Figura 38 – Uso e ocupação da área da encosta em 2009.	80
Figura 39 – Uso e ocupação da área da encosta em 2019.	81
Figura 40 – Diagrama de causa e efeito.	83
Figura 41 – Lançamento de esgoto diretamente no solo.	84
Figura 42 – Construções ao longo da encosta.	85
Figura 43 – Curva granulométrica do solo.	86
Figura 44 – Curvas de compactação do solo e do RCC.	90
Figura 45 – Curvas de compactação para as mistura de solo e RCC.	90
Figura 46 – Curvas de compactação das misturas de solo, resíduo e fibras.	91
Figura 47 – Curvas de compactação das misturas de solo e fibra.	92
Figura 48 – Gráfico comparativo dos compósitos de solo e RCC.	93
Figura 49 – Curvas de RCS para as misturas de solo e resíduo.	95
Figura 50 – Crescimento percentual da RCS dos compósitos de solo-RCC-fibra em relação ao solo natural.	97
Figura 51 – Curvas de RCS para as misturas de solo-RCC-fibra.	98
Figura 52 – Crescimento percentual da RCS dos compósitos de solo-fibra em relação ao solo natural.	100
Figura 53 – Curvas de RCS para as misturas de solo-fibra.	101
Figura 54 – Análise mineralógica do RCC com lupa binocular.	102
Figura 55 – Análise mineralógica do solo com a lupa binocular.	103
Figura 56 – Difratorograma de raio X do solo.	105
Figura 57 – Difratorograma de raio X do agregado reciclado.	105
Figura 58 – Superfície de resposta para o presente modelo.	112
Figura 59 – Box plot para as variações entre os resultados experimentais e os da modelagem.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de deposição irregular de RCC mapeados na Região Metropolitana do Recife (RMR).	29
Tabela 2 – Geração estimada de RCC/ano produzida por países da América, Ásia, Europa, África e Oceania.	33
Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de coco verde, juta e sisal.	41
Tabela 4 – Dados do uso e ocupação do solo para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.	76
Tabela 5 – Taxas de variação para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.	76
Tabela 6 – Granulometria dos compósitos.	86
Tabela 7 – Classificação dos materiais segundo o SUCS e a TRB.	88
Tabela 8 – Densidade real das amostras.	88
Tabela 9 – Limites de <i>Atterberg</i>	89
Tabela 10 – Umidades ótimas e pesos específicos dos materiais.	92
Tabela 11 – Valores de resistência à compressão simples das misturas.	93
Tabela 12 – Resistência para as misturas de solo, resíduo e fibra.	96
Tabela 13 – Resistência para as misturas de solo e fibra.	99
Tabela 14 – Dados da análise química para o solo e o agregado.	106
Tabela 15 – Resultado dos principais componentes da fluorescência de raio X.	108
Tabela 16 – Intervalo das variáveis de análise selecionadas.	109
Tabela 17 – Interações entre as variáveis independentes.	109
Tabela 18 – Análise das variáveis independentes obtidas pelo software.	110
Tabela 19 – Valores para otimização da resistência (RCS).	112

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMBITEC	Grupo de Pesquisa de Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IP	Índice de Plasticidade
LACC	Laboratório Avançado de Construção Civil
LAGESE	Laboratório de Geologia Sedimentar
LL	Limite de Liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
POLI	Escola Politécnica de Pernambuco
RCC	Resíduo da Construção Civil
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
RMR	Região Metropolitana de Recife
RPA	Região Político Administrativa
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UPE	Universidade de Pernambuco
URPVs	Unidade de Recebimento de Pequenos Volumes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Uso e ocupação do solo	20
2.2	Áreas de risco	24
2.3	Resíduos da Construção Civil (RCC)	27
2.3.1	<i>Aplicação dos resíduos</i>	29
2.3.2	<i>Geração de Resíduos da Construção Civil (RCC)</i>	31
2.3.3	<i>Impactos ambientais gerados pelo RCC</i>	34
2.4	Reforço do solo	35
2.4.1	<i>Reforço do solo com fibras sintéticas</i>	37
2.4.2	<i>Reforço do solo com fibras naturais</i>	38
2.5	Fibras de sisal	42
2.5.1	<i>Origem</i>	42
2.5.2	<i>Estrutura da fibra de sisal</i>	43
2.5.3	<i>Utilização das fibras de sisal</i>	43
2.6	Interação do solo com a fibra	44
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	47
3.1	Localização	47
3.2	Aspectos socioeconômicos	48
3.3	Aspectos fisiográficos do município	49
3.3.1	<i>Vegetação</i>	49
3.3.2	<i>Clima</i>	51
3.3.3	<i>Relevo</i>	52
3.3.4	<i>Solo</i>	53
3.3.5	<i>Geologia</i>	54
3.3.6	<i>Hidrografia</i>	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	58

4.1	Coleta de materiais e definição dos compósitos	59
4.1.1	<i>Solo</i>	59
4.1.2	<i>Agregado reciclado</i>	61
4.1.3	<i>Fibras de sisal</i>	62
4.1.4	<i>Compósitos de solo, agregado reciclado e fibras de sisal</i>	62
4.2	Análise temporal e diagrama de causa e efeito	63
4.3	Ensaio de caracterização física	65
4.3.1	<i>Granulometria</i>	65
4.3.2	<i>Densidade Real e Limites de Atterberg</i>	66
4.4	Ensaio de caracterização mecânica	67
4.4.1	<i>Compactação</i>	67
4.4.2	<i>Compressão simples</i>	68
4.5	Caracterização mineralógica e química	70
4.5.1	<i>Caracterização mineralógica</i>	70
4.5.2	<i>Caracterização química</i>	72
4.6	Análise estatística dos valores da Resistência à Compressão Simples	73
5	RESULTADOS	76
5.1	Análise temporal e digrama de causa e efeito	76
5.1.1	<i>Análise temporal</i>	76
5.1.1.1	<i>Dados do sensoriamento remoto</i>	76
5.1.1.2	<i>Análise temporal do uso e ocupação do solo</i>	82
5.1.2	<i>Diagrama de causa e efeito</i>	83
5.2	Caracterização física	85
5.2.1	<i>Granulometria</i>	85
5.2.2	<i>Densidade real e limites de Atterberg</i>	88
5.3	Caracterização mecânica	89
5.3.1	<i>Compactação</i>	89
5.3.2	<i>Resistência à Compressão Simples</i>	92
5.3.2.1	<i>Compósitos de solo-RCC</i>	93
5.3.2.2	<i>Compósitos de solo-RCC-fibra</i>	96
5.3.2.3	<i>Compósitos de solo-fibra</i>	99
5.4	Caracterização mineralógica e química	102
5.4.1	<i>Caracterizaçã mineralógica</i>	102
5.4.2	<i>Caracterização química</i>	106

5.5	Análise estatística	108
6	CONCLUSÃO	114
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS	118

1 INTRODUÇÃO

Diversas mudanças vêm ocorrendo nos diferentes setores da sociedade, incluindo os meios de produção e consumo. O avanço tecnológico e a inovação são fatores que impulsionam essas transformações, estando os mesmos associados ao desenvolvimento econômico (SANTOS, 2020). Para Yaras *et al.* (2021), a indústria de materiais do setor da construção civil representa um motor para a economia de muitos países, além de ser um pilar fundamental para o desenvolvimento da sociedade.

Dessa forma, a indústria da construção civil apresenta um papel fundamental para a economia de um país, sendo responsável por uma alta geração de empregos e por fornecer projetos de infraestrutura que facilitam a vida da sociedade (SILVA, 2017). A indústria da construção civil é um dos setores que mais contribuem para o crescimento e desenvolvimento econômico do país por exercer grande influência na economia e possuir vínculo com diversas áreas (VIEIRA; NOGUEIRA, 2018).

Entretanto, o setor é considerado um dos maiores responsáveis por gerar danos ambientais, devido ao alto consumo de matérias-primas e/ou a alta geração de resíduos atrelada a sua deposição irregular (MAGAGNIN FILHO, 2015). Cada elemento utilizado na construção civil apresenta características particulares, dificultando assim a identificação das perdas que ocorrem nesse setor, as quais são bem maiores quando comparadas às perdas de outros setores da economia (SIMONI *et al.*, 2015).

O avanço no setor da construção civil tende a contribuir para o aumento da geração de Resíduos da Construção Civil (RCC), seja pelo surgimento de novos empreendimentos ou pela execução de reformas e reparos (TAVARES *et al.*, 2018). Nos pontos de descarte desses resíduos, pode ocorrer a mistura dos mesmos com materiais de origem orgânica, atraindo vetores causadores de doenças, dificultando a reciclagem e trazendo problemas relacionados à saúde e ao bem-estar social (PAZ *et al.*, 2018)

Cada vez mais, os governos, as organizações e a sociedade civil vêm se preocupando com os impactos ambientais que o meio ambiente está sofrendo devido ao alto volume de resíduo produzido, que além de prejudicar a geração atual, pode também comprometer as gerações futuras. Sendo assim, o gerenciamento de resíduos vem se apresentando como uma

ferramenta cada vez mais presente nas discussões políticas, sociais, acadêmicas e ambientais, trazendo a gestão de resíduos numa posição de instrumento de planejamento urbanístico (SANTOS; MARCHESINI, 2018).

De acordo com Mohammed, Elkady e Abdel-gawwad (2021), a reutilização e reciclagem dos materiais representam um importante ferramenta para preservação ambiental e redução da carga em aterros sanitários. Dessa forma, é necessário desenvolver métodos eficientes que promovam a reciclagem desses resíduos, trazendo uma destinação ambientalmente correta para os mesmos, como a utilização para o reforço de solo.

Outra temática bastante relevante que vem preocupando a sociedade atual é a ocupação de ambientes mais vulneráveis, como topo de morros, fundo de vales e áreas suscetíveis ao alagamento, visto que essa ocupação gera situações de perigo, risco e desastre. Sendo assim, as cidades vivem um momento marcado pelo expressivo crescimento e adensamento demográfico, igualmente marcado pelas catástrofes induzidas ou geradas por fatores antrópicos (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A ocupação irregular de áreas consideradas de risco tem sido um dos grandes fatores que geram deslizamentos, acarretando em danos ambientais, econômicos e sociais, além de comprometer a própria vida dos moradores. Sendo assim, o reforço do solo com a adição de resíduos e fibras surge como uma alternativa para melhorar as características geotécnicas do terreno. A adição de fibras naturais ao solo melhora o funcionamento dos materiais, principalmente após o pico de compressão, porém devem ser usadas em teores adequados com o objetivo de manter a trabalhabilidade e fornecer ganho de resistência (Li *et al.*, 2022).

Dessa forma, fica evidente o papel relevante que a engenharia civil apresenta para a redução desses tipos de desastres naturais e para a diminuição e a destinação correta do resíduo gerado pela indústria da construção. Nesse sentido, diversas pesquisas vêm surgindo com o intuito de obter uma destinação ambientalmente correta para os Resíduos da Construção Civil (RCC), como a utilização dos mesmos para reforço de solo, melhorando as características geotécnicas do material e viabilizando a reciclagem dos resíduos.

1.1 Justificativa

O trabalho surgiu com o intuito de encontrar e viabilizar uma técnica de reforço de solo para uma encosta localizada no município de Recife-PE, mais precisamente no bairro de Dois Unidos na rua córrego do Curió, que sofreu um processo de deslizamento devido as fortes chuvas ocorridas em julho de 2019, ocasionando o falecimento de um dos moradores do local, além de trazer inúmeros danos econômicos e sociais (APRÍGIO, 2019).

O município do Recife corresponde a um dos principais centros urbanos da região Nordeste, apresentando uma economia marcada pelo setor terciário, incluindo serviços, comércio e administração pública. O bairro de Dois Unidos, local da encosta, pertence a Região Político Administrativa II – RPA 2, apresentando uma área territorial de 3,12 km² (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2021).

A utilização de agregado reciclado como reforço do solo foi escolhida com o intuito de promover uma destinação ambientalmente correta aos resíduos produzidos pela construção civil, em virtude do seu elevado quantitativo.

A utilização de fibras no solo é uma técnica utilizada para melhorar suas propriedades mecânicas e é empregada há bastante tempo pela humanidade, sendo esse um dos fatores que motivou a junção de fibras para formação dos compósitos analisados. Segundo Silveira (2018), o melhoramento do solo com a adição de fibras irá depender das características das fibras, como tipo de fibra e tamanho; e do solo, como tensão de confinamento e modo de carregamento.

As fibras normalmente empregadas como técnica de melhoramento de solo podem ser sintéticas, como as fibras de polipropileno e poliéster; e podem ser naturais, como as fibras de sisal e de coco. Comparando as fibras naturais com as sintéticas, é perceptível que as primeiras apresentam custo mais baixo, são de fácil obtenção, fácil manuseio, geram uma quantidade de resíduo menor, além de apresentar boas propriedades mecânicas (SILVEIRA, 2018).

Dessa forma, o presente trabalho busca contribuir para um melhor entendimento do comportamento do solo com adição de resíduo reciclado reforçado com fibras de sisal,

promovendo uma destinação ambientalmente correta aos resíduos gerados e uma melhor estabilização do solo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar o comportamento geotécnico do solo, através da adição de resíduos reciclados e fibras de sisal, em uma encosta localizada no município de Recife/PE.

1.2.2 Objetivos específicos

O presente trabalho apresenta como objetivos específicos os seguintes itens:

- Realizar a análise temporal do local onde o solo foi coletado para averiguar as modificações de cobertura que o solo sofreu, identificando as áreas referentes a mancha urbana, vegetação, solo exposto e sistema viário;
- Executar a caracterização física do solo e do agregado reciclado;
- Realizar a caracterização mecânica do solo, agregado reciclado e misturas;
- Verificar a composição química e mineralógica do agregado reciclado e do solo;
- Identificar estatisticamente o teor de composto mais adequado para a estabilização mecânica do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A busca por materiais sustentáveis que apresentem qualidade e custo reduzido, tem sido um dos grande desafios enfrentados pela construção civil nos últimos tempos. Sendo assim, muitas pesquisas estão surgindo, com o intuito de promover uma relação harmônica entre a engenharia e o meio ambiente, fornecendo novos materiais que promovam o desenvolvimento sustentável.

O uso de Resíduos da Construção Civil (RCC) incorporado ao solo é uma técnica que viabiliza a formação de um produto atrativo, que fornece qualidade e reduz os impactos ambientais gerados pelo excesso da geração desses resíduos e pelo seu descarte, muitas vezes, ineficiente. A junção de fibra e resíduo ao solo é uma prática bastante pesquisada, fornecendo a possibilidade de uma boa solução técnica.

Dessa maneira, serão apresentados os aspectos sobre a ocupação irregular de áreas de risco, definições, aplicações e impactos ambientais ocasionados pelos Resíduos da Construção Civil (RCC), assim como o uso e características de algumas fibras, inclusive a fibra de sisal utilizada para a pesquisa.

2.1 Uso e ocupação do solo

Nas últimas décadas, o Brasil passou por grandes transformações em seu espaço visual e físico. A urbanização se apresenta como parcela representativa dessas mudanças, em que é perceptível o deslocamento da sociedade para os grandes centros urbanos, normalmente buscando novas oportunidades de trabalho e qualidade de vida (OLIVEIRA; GIUDICE, 2017).

A urbanização apresenta um conceito geográfico ligado ao crescimento das cidades e no conseqüente desenvolvimento da infraestrutura do local. Ao apropriar-se do território, a sociedade promove significativas mudanças no ambiente natural, retirando a vegetação original e ocasionando a impermeabilização do solo. O uso do solo representa uma união de atividades e organizações humanas ligadas ao modo de relacionamento com o meio ambiente, em que a cidade apresenta variadas formas de concentração e o solo urbano será disputado para inúmeros usos (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

O uso e a ocupação do solo alteram sensivelmente os processos biológicos e químicos do ambiente natural, sendo assim, a contaminação do ecossistema, resultante das atividades antrópicas, tem sido uma das principais preocupações ambientais dos últimos anos (MENEZES *et al.*, 2016). Nos dias atuais, é notório o aumento das ocorrências de desastres naturais que ocasionam prejuízos sociais, ambientais e econômicos.

O deslizamento de encosta é um desastre ambiental que apresenta como principal causa a ocupação desordenada em locais considerados como áreas de risco. A ocupação irregular e desordenada de encostas é responsável pelo surgimento de fatores que potencializam o escorregamento, como a retirada da vegetação original e a deposição irregular de resíduos sólidos (MANTOVANI, 2016).

A urbanização acelerada, principalmente em países desenvolvidos, traz um crescimento desordenado e mostra o quanto os espaços urbanos apresentam um cenário despreparado para absorver a demanda populacional nos requisitos básicos de infraestrutura. Isso leva a crer que o mercado imobiliário se apropria dos melhores setores nas cidades e acaba esquecendo de locais destinados à moradia popular (MANTOVANI, 2016).

Abrantes *et al.* (2018) analisou que as dinâmicas e padrões de uso e ocupação do solo são de extrema importância diante dos intensos e atuais debates sobre as matérias de alterações climáticas, desenvolvimento sustentável e preservação ambiental, visto que o solo é um recurso finito. A degradação do solo tem sido uma das questões mais criticadas e enfrentadas pela população mundial, já que este se apresenta como um recurso fundamental para a sustentação da humanidade.

Para Albuquerque (2016), pensar nos impactos socioambientais em áreas inapropriadas à ocupação do solo associados com a construção de moradias de baixo padrão construtivo passou a ser um projeto desafiador. Segundo a autora, existe uma grande dificuldade para a correção das falhas presentes nestes locais diante da falta de apoio governamental, em conjunto com o descaso populacional por continuar ignorando os riscos existentes nessas áreas.

A ocupação em áreas de encostas e margens de rios, por exemplo, geram impactos negativos diversos em virtude das modificações bruscas sofridas pela paisagem decorrente de

desmatamentos, exploração mineral, queimadas e construção de moradias que comprometem e até ultrapassam a capacidade de suporte do solo nessas regiões. Áreas de encostas são marcadas pela vulnerabilidade às situações de risco causadas pela ausência de infraestrutura urbana gerando danos à população local (ALBUQUERQUE, 2016).

A alternativa para contornar essa realidade seria baseada em medidas estruturais, através da manutenção de obras de contenção e orientação técnica para a realização dos serviços, e medidas não estruturais as quais envolvem a sensibilização e a conscientização da população através da educação ambiental.

A instabilidade de encostas representa o deslizamento de massa que ocorre, principalmente, no espaço urbano em locais de topografia acidentada, onde a ocupação antrópica desordenada e sem planejamento tem gerado desastres naturais cada vez mais expressivos, comprometendo a saúde, segurança e bem-estar da população local (SANTOS; FALCÃO; LIMA, 2020).

Em muitas cidades brasileiras, a ocorrência de deslizamentos destrutivos ocorre principalmente em períodos chuvosos, como resultado das alterações antrópicas e da estrutura geológica de solos, além da inclinação do terreno que em muitos casos se encontra acima de 45° e dos cortes e aterros realizados para fins construtivos (ALBUQUERQUE, 2016).

Segundo Mello (2018), as atuações antrópicas mais prejudiciais às encostas abrangem a remoção da cobertura vegetal, lançamento de esgoto sanitário diretamente no solo, execução inadequada de cortes e aterros, presença de fossas sanitárias e obstrução da drenagem natural potencializada pelo despejo de resíduos.

A instabilidade de encostas pode ser gerada devido a fatores como: infiltração no solo, em que a saturação reduz a coesão aparente e a tensão efetiva; elevação do lençol freático; surgimento de fluxos que ocasionam erosão; escoamento superficial, atuando como um agente de intemperismo, e a evaporação (MELLO, 2018).

Para Oliveira e Giudice (2017), a ação antrópica numa região de encosta está diretamente associada a processos erosivos, contaminação dos cursos d'água, assoreamento, deposição irregular de resíduos, construções irregulares e impermeabilização do solo. Dessa forma, essas

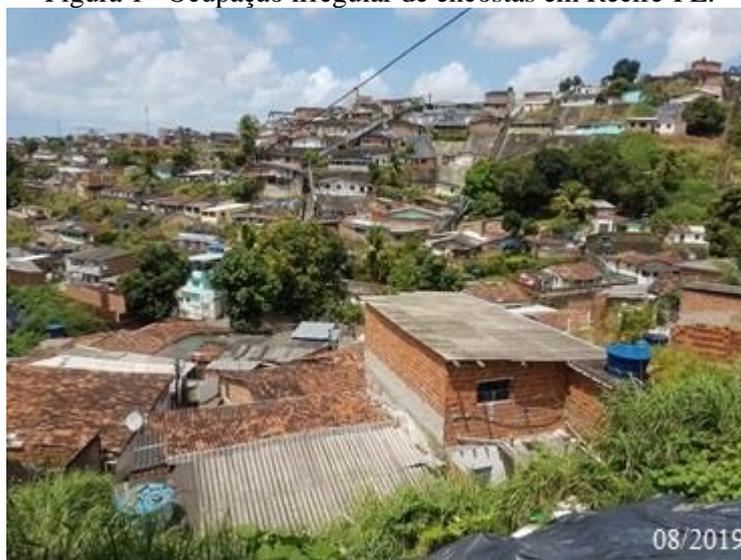
atividades podem afetar, de forma direta ou indireta, a estabilidade do talude, potencializando os riscos para a população do local.

Para reparar os danos ambientais ocasionados pela deposição de resíduos em locais inapropriados, é necessário um planejamento ambiental por iniciativa dos legisladores e governantes através da criação de políticas públicas com normas de combate aos problemas ambientais, associado aos projetos de conscientização social, a fim de reduzir o volume de material descartado em pontos impróprios (SANTOS *et al.*, 2017).

Além disso, de acordo com Nogueira *et al.* (2020), é necessário um planejamento territorial integrado, através de projetos e pesquisas que forneçam informações suficientes a respeito do meio físico e das suas correspondentes características geológico-geotécnicas que permitam a habitabilidade do local.

A ocupação irregular do solo pode ser encontrada em diversos estados brasileiros, como em Pernambuco na cidade do Recife, mostrada na Figura 1, e no estado do Rio de Janeiro na cidade de Niterói, conforme Figura 2.

Figura 1– Ocupação irregular de encostas em Recife-PE.



Fonte: A autora.

Figura 2 – Ocupação irregular de encostas em Niterói-RJ.



Fonte: Sousa (2018).

2.2 Áreas de risco

O conceito de risco está associado com a imprevisibilidade ou a probabilidade de algo acontecer, e que pode ser agravado por diversos fatores que ocasionem danos ou inconvenientes ao cenário. Dependendo da forma com a qual o homem se organiza no espaço, as situações de vulnerabilidade ou suscetibilidade sofrem variações, podendo ser agravadas dependendo da realidade de cada indivíduo (GIRÃO; RABELLO; ZANELLA, 2018).

De acordo com Zamponi (2014), o ambiente urbano do século atual é caracterizado pela alta densidade demográfica e por fatores socioambientais decorrentes dela, como a desigualdade de renda e da oferta de bens e serviços. Sendo assim, algumas regiões, como as encostas, acabam sendo ocupadas de maneira irregular trazendo risco tanto para os moradores do local quanto prejuízos para o sistema natural.

Zamponi (2014) mostrou que em grandes áreas urbanas brasileiras ocorre o processo de formação de espaços desiguais e conflitantes, em que diferentes classes sociais convivem em conjunto e estão expostas aos perigos decorrentes de uma área de risco. A pressão urbana sobre as encostas, realizada pelo próprio mercado imobiliário e pela expansão de loteamentos irregulares, potencializou os conflitos socioambientais na relação entre vegetação e mancha urbana, levando a uma situação de segregação socioambiental.

Esse também é um dos principais fatores relacionados com a redução da área de vegetação dos locais considerados como áreas de risco, ocasionando maior vulnerabilidade a desabamentos os quais podem gerar consequências catastróficas, principalmente quando potencializados pela chuva (SCHLEE, 2015). Os deslizamentos ou desabamentos de encostas representam um dos tipos de movimentos de massa que podem ser potencializados por diferentes fatores.

De acordo com Yu, Yang e Li (2019), a densidade populacional pode ser entendida como uma variável de controle que possibilitará uma melhor gestão ambiental, visto que as áreas com maior número populacional necessitam de ações governamentais mais fortes, visando a redução da poluição e da degradação ao meio ambiente.

Behling (2017) apresenta algumas causas internas, externas e intermediárias que podem ocasionar desastres naturais. Entre as causas internas o autor cita os efeitos das oscilações térmicas e a redução dos parâmetros de resistência ao intemperismo.

Para o autor, as mudanças na geometria do sistema, efeitos de vibrações, assim como, mudanças de inclinações das encostas aparecem como fatores externos que potencializam a ocorrência de deslizamentos, enquanto que a elevação do nível piezométrico, rebaixamento rápido do lençol freático, elevação da coluna de água e redução do efeito de coesão aparente do solo aparecem como causas intermediárias para as ocorrências desses movimentos.

Para Gerscovich (2016), a ação antrópica se apresenta como uma causa indutora para o aumento das tensões cisalhantes mobilizadas que acabam por deflagrar os movimentos de massa. Ações como execução de cortes com geometria incorreta (altura/inclinação); execução deficiente de aterros nos aspectos ligados a geometria e a compactação; e lançamentos de lixos nas encostas aparecem como os fatores que aumentam as tensões cisalhantes mobilizadas.

Já a redução da resistência ao cisalhamento do solo pode se dar em virtude da remoção da cobertura vegetal, lançamento e concentração de águas pluviais, e os vazamentos que ocorrem nas redes de abastecimento de água e esgoto, além da presença de fossas sépticas. A redução da resistência do solo em conjunto com o aumento das tensões cisalhantes mobilizadas

apresentam-se como as causas gerais que ocasionam os movimentos de massa (GERSCOVICH, 2016).

Em geral, a vegetação atua como um elemento de proteção do solo em diferentes aspectos, como nas mudanças bruscas de temperatura, na interceptação de precipitações reduzindo o volume de água para escoamento, e na função estrutural das suas raízes por servirem como reforço natural do solo. Sendo assim, a cobertura vegetal irá agir contra agentes erosivos que poderiam atuar sobre aquele local, reduzir o intemperismo e conferir uma maior estabilidade ao talude (GERSCOVICH, 2016).

Segundo Behling (2017), a geomorfologia é um fator fundamental quando se trata da instabilidade de uma encosta pois esta exerce importante influência para a previsão dos movimentos de massa. Alguns fatores referentes a geomorfologia são ressaltados pelo autor, como a hipsometria da encosta, forma do perfil geológico e plano de curvatura. A água aparece como um elemento de efeito significativo na forma de comportamento do solo, contribuindo assim para a perda de resistência do solo e para o aumento das tensões atuantes.

Mello (2018) afirma que o processo de instabilização de um solo em decorrência da atuação da água pode ocorrer por: infiltração, em que a tensão efetiva do solo e a coesão aparente reduzem devido a saturação do mesmo; elevação do lençol freático; surgimentos de fluxos internos que ocasionam a erosão no solo; variações do peso; aumento do escoamento superficial e evaporação. O clima também está bastante associado ao processo de movimentos de massa, contribuindo para elevação do processo de intemperismo que reduz consideravelmente a estabilidade do solo.

Carvalhais *et al.* (2019) relata que outros agravantes relacionados com a instabilidade das encostas são os cortes verticalizados que alteram o ângulo de repouso do talude, deposição irregular do material, resultante do corte do talude e execução de moradias sem planejamento nem projetos de drenagem, que acabam por reduzir a resistência do terreno. Além disso, vale ressaltar a falta de esgotamento sanitário que gera o lançamento do esgoto diretamente no solo, contribuindo para a redução da resistência do talude.

2.3 Resíduos da Construção Civil (RCC)

A resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA que dispõe sobre a gestão desses resíduos, conceitua os mesmos como:

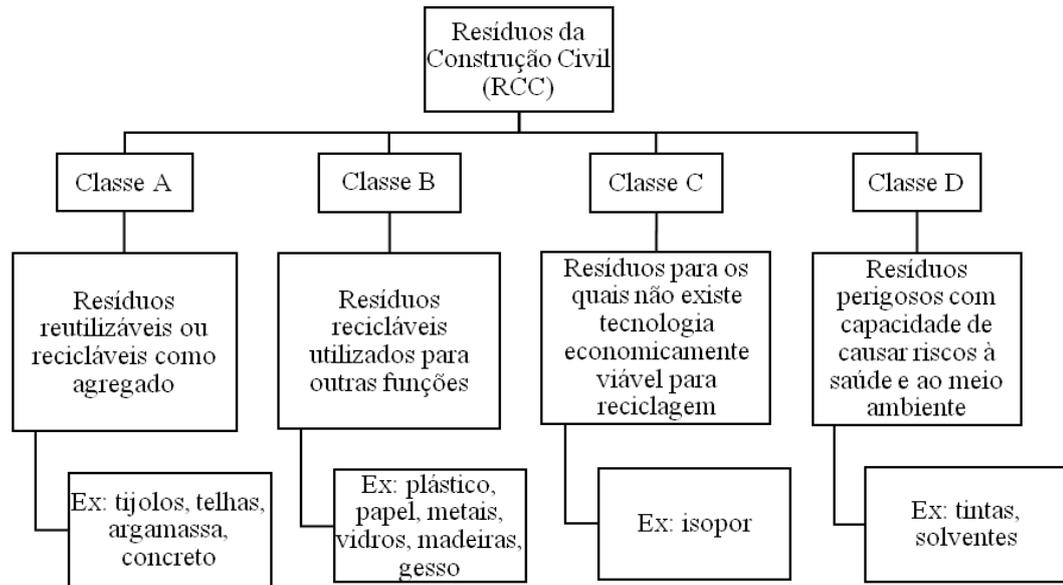
Resíduos da construção civil: são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, 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).

A Resolução Nº 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) traz também a classificação dos resíduos, como é indicado na Figura 3. Os resíduos reciclados utilizados como agregado pela construção civil são os resíduos classe A que podem ser originados por:

- Construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação além de solos provenientes de terraplenagem;
- Construção, demolição, reformas e reparos de edificações: materiais cerâmicos (blocos, telhas), argamassa e concreto;
- Processo de fabricação e demolição de peças pré-moldadas de concreto (tubos, blocos) produzidos no canteiro de obras (BRASIL, 2002).

Os Resíduos da Construção Civil (RCC) representam os materiais que são descartados oriundos de obras de infraestrutura, reforma e demolições. De acordo com suas características químicas são divididos em: materiais inertes, os quais dificilmente conseguem participar das reações químicas em circunstâncias normais, como concreto, solo, tijolos; e materiais não inertes, os quais podem ser envolvidos nas reações químicas em condições normais, como a madeira (WU; YU; SHEN, 2017).

Figura 3 – Classificação dos Resíduos da Construção Civil (RCC).



Fonte: Adaptado de Brasil (2002).

De acordo com Oliveira *et al.* (2016), um dos grandes problemas relacionados ao alto volume de RCC produzido é que na maioria das vezes esses materiais são depositados em locais irregulares, como é indicado na Figura 4, constituindo assim um grave problema para o ambiente natural e para a qualidade de vida da população. Uma das maiores dificuldades ligadas a essa temática é a reduzida quantidade de áreas próprias para serem utilizadas como aterro de Resíduos da Construção Civil (RCC), os quais são gerados durante a construção, manutenção e/ou demolição de estruturas (VELARDO *et al.*, 2021).

Figura 4 – Deposição irregular de resíduos.



Fonte: A autora.

O descarte do resíduo em locais inadequados é um problema mundial, trazendo uma série de impactos negativos, como a redução do poder econômico do local e a redução de áreas importantes para outros fins. Dessa forma, é necessário novos estudos que viabilizem a reciclagem desses materiais (YUAN, 2017).

Holanda (2018) realizou um mapeamento dos pontos de descarte inadequados de Resíduos da Construção Civil (RCC) na Região Metropolitana do Recife (RMR), com o auxílio de um software de gestão municipal de resíduos. Os resultados encontrados pela autora estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontos de deposição irregular de RCC mapeados na Região Metropolitana do Recife (RMR).

Município	Área urbanizada (km²)	Pontos de deposição inadequada
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).

Para Ximenes (2018), a implantação de Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes (URPVs) auxiliam na redução de descarte irregular de RCC, pois facilitam o transporte de resíduos, principalmente os de pequenas obras, contribuindo para a diminuição dos gastos públicos como coleta e limpeza urbana.

2.3.1 Aplicação dos resíduos

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 sua alta geração (BRASIL, 2002).

De acordo com Oliveira e Braga (2019), é possível utilizar agregados reciclados em aterros sanitários como material alternativo, atingindo um comportamento satisfatório nos aspectos de drenagem do sistema de cobertura final e das camadas.

Tam, Li e Wang (2015) afirmam que o melhor modelo de estratégia para a redução do RCC inclui a identificação das variáveis significantes, como tecnologias utilizadas no projeto, experiência de trabalho e treinamentos. Segundo Shui e Yu (2014), é possível produzir um material de construção pré-fabricado com a junção de cinzas volantes e resíduos reciclado de origem cimentícia, após passar por um tratamento de trituração, de moagem e térmico, atingindo valores de resistência altos, superiores a 60 MPa.

Para Portela *et al.* (2021), a substituição por resíduo e cal da parcela relacionada à dispersividade, em um solo dispersivo, possibilitará a estabilização do solo. Sendo assim, as misturas estudadas pela autora, em diferentes teores, apresentaram um aumento de resistência quando comparadas ao solo natural, sem comprometer a erodibilidade do solo.

Medidas simples de redução na produção de resíduos podem aumentar os lucros produzidos por uma empresa além de reduzir o impacto ambiental, como relata Gottsche e Kelly (2018). A pesquisa desenvolvida pelos autores, após a aplicação de medidas de gerenciamento de RCC em cinco obras, mostrou uma redução de 49% da despesa total destinada para o gerenciamento de resíduos, significando uma economia de 4,2% da margem de lucro médio assumido.

Apesar de ser uma alternativa economicamente viável e que ajuda a reduzir os impactos ambientais, a reciclagem de RCC ainda não é praticada como deveria. De acordo com Ouda *et al.* (2018), apenas 39,50% das empresas estudadas em sua pesquisa apresentaram plano de controle de poluição e apenas 13,60% dos resíduos produzidos nos canteiros de obra eram reciclados ou reutilizados anualmente.

O estudo realizado por Nascimento *et al.* (2021) verificou as propriedades do Resíduo da Construção Civil (RCC) no sistema de cobertura final de aterros sanitários, num solo de uma encosta localizada na Ilha de Itamaracá/PE. O autor concluiu que o resultado da adição de agregado reciclado no solo nos teores de 30% e 50% para uma argila de alta plasticidade, foi favorável para a finalidade solicitada.

Silva (2020) analisou a resistência dos compósitos após a adição de agregado reciclado e resíduo de madeira num solo localizado na Ilha de Itamaracá/PE. O autor concluiu que a adição de agregado reciclado ao solo aumentou a resistência à compressão simples para os períodos de cura de 7 e 28 dias, sendo o compósito com 30% de RCC e o compósito de solo e resíduo de madeira a 3% as misturas com melhores ganhos de resistência.

Já Santos (2020) verificou, para a mesma encosta estudada por Nascimento *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2021), a resistência do solo após adição de resíduo reciclado e fibras de coco babaçu. A autora concluiu que o melhor material ensaiado foi o compósito formado por 70% de solo, 29,5% de agregado reciclado e 0,5% de fibras de coco babaçu, por aumentar a resistência à compressão simples quando comparadas ao solo sem fibras e resíduo, atingindo um valor de 1230 kPa aos 120 dias.

Segundo Cordon, Cagnoni e Ferreira (2019), a reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCC) executada em qualquer fase da construção é fundamental para proporcionar o desenvolvimento sustentável no setor, contribuindo para redução do uso de recursos naturais e concordando com os requisitos dos mandatos de preservação ambiental.

Portanto, é necessário o desenvolvimento de novas pesquisas e métodos que potencializem a reciclagem e/ou reutilização desses resíduos em conjunto com a viabilidade econômica e a fiscalização pelos órgãos governamentais, visando a redução dos danos causados ao meio ambiente.

2.3.2 Geração de Resíduos da Construção Civil (RCC)

É possível observar a geração de resíduos em todas as fases do empreendimento, variando em volume e composição dependendo da etapa da obra. Segundo Bezerra (2015), os principais tipos de resíduos produzidos de acordo com a fase da obra são:

- Fundação: material rochoso, solo, resultantes de demolição;
- Estrutura: brita, argamassa, areia, concreto, madeira, tijolos;
- Acabamento: gesso, tintas, cerâmica, argamassa, tubulações de PVC, material de rejunte.

Ainda de acordo com o autor, as grandes cidades brasileiras apresentam uma deficiência em relação a existência de locais apropriados para a deposição de resíduos, os quais acabam sendo jogados em terrenos baldios, córregos, rios e ruas. A falta de organização no armazenamento de materiais e execução dos serviços nas obras acabam reduzindo a produtividade que influencia diretamente no aumento constante de RCC produzido (BEZERRA, 2015).

Paz (2014) identificou a geração e a composição de resíduos em 28 obras brasileiras, encontrando o valor máximo para a geração de RCC de 8298 toneladas e o valor mínimo de 484 toneladas, obtendo o índice médio de geração de resíduos por área construída de 125 kg/m². Durante a execução das obras, foi coletado também a quantidade de caçambas geradas, sendo o valor máximo de 1012 unidades e o valor mínimo de 59 unidades, obtendo uma média de 159 caçambas por obra.

O maior percentual de resíduo coletado nas obras, de acordo com a classe, é o resíduo classe A, ocupando cerca de 87% do percentual total de resíduos produzidos. A etapa de acabamento é a fase da obra que mais produz RCC, podendo ser explicada pelo período mais longo de execução, elevado desperdício de materiais de instalação elétrica e hidráulica, e por, normalmente, apresentar um cronograma mais comprometido com o que foi planejado (PAZ, 2014).

Na pesquisa desenvolvida por Pimentel (2013) em 18 obras na cidade de João Pessoa/PB, a quantidade total de RCC gerado entre os anos de 2000 e 2010 corresponde a um valor de 275.963,70 toneladas. A taxa de geração de resíduos classe A para as edificações analisadas pelo autor corresponde a um valor de 60,40 kg/m², em que boa parte do resíduo produzido, cerca de 42,20%, não chegou na usina de beneficiamento de resíduos da construção, mostrando que esses materiais podem estar sendo descartados em locais irregulares.

De acordo com Mália *et al.* (2013), são gerados mundialmente cerca de dois a três bilhões de resíduos por ano, dos quais 500 milhões são produzidos pela União Européia, apresentando uma média de geração anual de resíduo de 480 kg/hab/ano. No estudo realizado por Angulo *et al.* (2011) numa cidade no estado de São Paulo, foi mostrado que a geração média de resíduos gira em torno de 367 kg/hab/ano e apresenta correlação com o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH).

A Tabela 2 apresenta a quantidade de Resíduos de Construção e Civil - RCC em milhões de toneladas produzidas por ano por países da América, Ásia, Europa, África e Oceania.

Tabela 2 – Geração estimada de RCC/ano produzida por países da América, Ásia, Europa, África e Oceania.

País	Taxa em milhões de toneladas por ano	Continente
Estados Unidos	519	América
Brasil	70	América
Canadá	9	América
Holanda	25,71	Europa
Itália	39,65	Europa
Alemanha	201,3	Europa
Portugal	1,22	Europa
Espanha	27,7	Europa
Reino Unido	100,23	Europa
França	246,7	Europa
África do Sul	68	África
Nova Zelândia	4,52	Oceania
Australia	19	Oceania
China	1020	Ásia
India	530	Ásia
Japão	75,4	Ásia

Fonte: Adaptado de Akhtar e Sarmah (2018).

Segundo Silva (2020), a Tabela 2 mostra uma visão geral de como o mercado da construção civil tem caminhado de forma inadequada. Com os dados encontrados, é possível observar, segundo o autor, o quanto os valores variam mesmo se tratando de países do mesmo continente, em decorrência da aplicação de diferentes metodologias construtivas e diferentes materiais, além da situação econômica de cada país.

2.3.3 Impactos ambientais gerados pelo RCC

A Resolução nº 001 do CONAMA, de 23 de janeiro de 1986, define impacto ambiental como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais. (BRASIL, 1986, p. 2548).

A preocupação com o meio ambiente tem sido um dos temas mais debatidos atualmente, sendo um dos condicionantes para qualquer atividade visando a preservação e a manutenção dos recursos naturais. A construção civil é uma das indústrias mais importantes para o fomento das atividades do setor industrial, influenciando consideravelmente a economia do país (PINTO *et al.*, 2019).

Ao atender as demandas do homem, o setor da construção civil acaba por consumir diferentes produtos, gerando vários tipos de resíduos que muitas vezes são depositados em locais inadequados. Assim sendo, a utilização de recursos renováveis, a reciclagem e a redução da utilização de materiais não renováveis são instrumentos que tornam as ações humanas ao meio ambiente menos agressivas (PINTO *et al.*, 2019).

De acordo com Silva, Santos e Araújo (2017), os resíduos gerados nas obras podem ser reciclados e reutilizados no próprio canteiro, trazendo uma redução de custos, mesmo com o investimento inicial para compra de equipamentos de reciclagem, e preservando os recursos naturais. Dessa forma, os gastos iniciais podem ser visto como investimentos para a obtenção de resultados positivos com a reutilização dos resíduos e a redução no seu desperdício.

O impacto ambiental gerado pela construção civil pode ser observado na contaminação dos rios, poluição atmosférica, poluição visual, gerado principalmente pela alta geração e inadequada deposição desses resíduos. A deposição de RCC em locais impróprios pode ser observado na Figura 5, em que os resíduos foram lançados numa encosta localizada na cidade do Recife-PE, que sofreu um deslizamento no mês de julho/2019.

Figura 5 – Deposição de RCC em encosta.



Fonte: A autora.

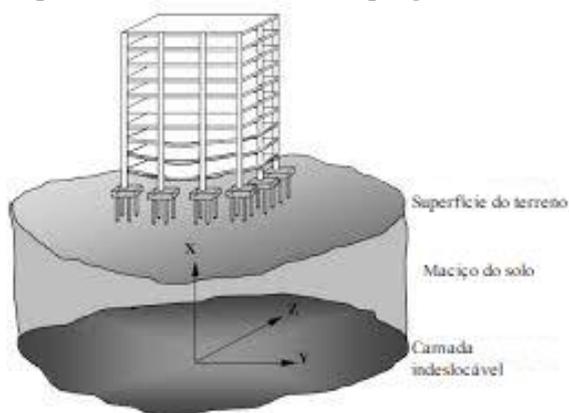
O agregado reciclado apresenta potencial para ser aplicado na construção civil, podendo ser utilizado em aterros, na fabricação de concreto não estrutural, argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos e blocos de vedação. Dessa forma, a utilização desses materiais representa uma redução do impacto ambiental por diminuir o consumo de recursos naturais e fornecer uma destinação ambientalmente correta (MACEDO, 2013).

2.4 Reforço do solo

O reforço do solo é uma técnica bastante antiga desenvolvida com o principal objetivo de modificar positivamente as características geomecânicas que o solo apresenta, melhorando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Sendo assim, o solo irá maximizar suas propriedades através de métodos mecânicos ou químicos, adequando o material para determinado uso (MOUSAVI; KARAMVAND, 2017).

Para Santos (2020), o solo é parte integrante e fundamental nas obras da engenharia civil, podendo ser empregado como material de construção. Além disso, o solo apresenta a função de suportar as cargas decorrentes da edificações (Figura 6), apresentando características que variam de acordo com o seu processo de origem, transporte e intemperismo.

Figura 6 – Transmissão de cargas para o solo.



Fonte: Antoniazzi (2011).

Existe um vasto número de métodos que objetivam a estabilização do solo, como por exemplo, a adição de estabilizante químico, correção granulométrica e compactação. A melhor solução a ser adotada dependerá do tipo de solo, da finalidade de aplicação do material, da viabilidade econômica e técnica, e por fim, das exigências apresentadas em projeto (BRITO; PARANHOS, 2017). Os reforços de solo são aplicados principalmente quando o solo não apresenta características geotécnicas satisfatórias para a execução de obras, como acontece em solos moles.

O reforço com geossintéticos tem sido uma técnica bastante empregada, possibilitando a melhoria da capacidade de carga do solo. Segundo Santos, Bello e Santos (2019), a utilização de geodrenos no solo mole proporciona uma redução significativa do recalque do solo e um aumento considerável da sua resistência. Em relação ao adensamento, os resultados obtidos pelos autores mostraram ser vantajosos em relação ao tempo esperado para que o grau de adensamento pretendido do solo fosse alcançado.

O reforço do solo utilizando fibras é uma técnica conhecida no âmbito da engenharia civil, existindo uma ampla variedade de fibras que podem ser utilizadas como reforço de materiais compósitos (MACEDO, 2013). A introdução de fibras ao solo tem o propósito de adicionar um material com resistência a tração elevada, aumentando a resistência do solo e reduzindo sua compressibilidade (MORANDINI; SCHNEIDER, 2017).

Para a aplicação correta de determinado tipo de fibra, é necessário conhecer alguns parâmetros do material, como durabilidade, vida útil, degradação, agentes de degradação e

mecanismo de degradação. Durabilidade pode ser conceituada como a capacidade de um material em manter seu desempenho durante sua vida útil, podendo ser alterada pelos agentes externos (MACEDO, 2013).

A vida útil do material pode ser entendida como o período de tempo em que o desempenho do elemento poderá ser considerado satisfatório. A degradação é o processo em que o elemento irá sofrer modificações que implicarão na perda de qualidade de material, alterando sua vida útil. Dessa forma, é importante conhecer os agentes e os mecanismos de degradação da fibra no solo, levando em consideração fatores físicos, químicos, biológicos e ambientais (PORTELA, 2019).

A utilização de fibras para o reforço de pavimentos, solos de reaterro, solos de fundação, estruturas de contenção e estabilização de solos tem se mostrado eficaz e competitiva, principalmente nos casos de estabilização de taludes e no aumento da resistência de solos submetidos a esforços altos. Em geral, as fibras podem ser classificadas em naturais, sintéticas, minerais e metálicas (SILVEIRA, 2019).

2.4.1 Reforço do solo com fibras sintéticas

A técnica de reforçar o solo utilizando fibras está inserida na tecnologia dos materiais compósitos. O material compósito é formado pela união de dois ou mais materiais com propriedades diferentes de forma a se complementarem. Sendo assim, os compósitos são formados por uma fase chamada matriz, por exemplo, solo e concreto, e a outra fase que seria o reforço propriamente dito, como fibras, papéis, isopor, entre outros (SILVEIRA, 2018).

Existe uma variedade de fibras sintéticas que podem ser utilizadas para reforço de solos, como as fibras de polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida, que irão apresentar propriedades físicas, químicas e mecânicas de acordo com o material componente e com o seu processo de fabricação. Vale ressaltar que a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço é fundamental para a definição do tipo de fibra a se usar (SILVEIRA, 2018).

Jan-E-Alam *et al.* (2018) afirmam que o reforço do solo com fibras de nylon consiste num método que aumenta a resistência do solo e reduz sua deformabilidade, e pode ser utilizado, principalmente, em projeto de rodovias. Ainda segundo os autores, a utilização de fibras de

nylon aumenta o CBR (*California Bearing Ratio*) do solo com a utilização da densidade seca máxima e umidade ótima obtidos com os ensaios de compactação.

Li e Senetakis (2018) analisaram a aplicação de fibras de polipropileno em dois tipos distintos de areia, revelando uma redução na densidade máxima do compósito com o aumento do percentual de fibras. Segundo os autores, a inclusão de fibras de polipropileno no solo auxilia o processo de transmissão das cargas normais através dos grãos de areia e fornece um efeito positivo com relação as deformações que os materiais apresentaram, possibilitando assim sua aplicação direta em terrenos sísmicos.

Os materiais poliméricos são utilizados e descartados em alta escala atualmente, prejudicando o meio ambiente, por isso, é necessário o desenvolvimento de métodos sustentáveis de reutilização desses materiais. Uma das formas de reciclagem é a utilização desses materiais em conjunto com cimento para projetos de reforço em solos moles, como bases e sub-bases de pavimentos. A utilização de fibras poliméricas no solo pode melhorar significativamente a resistência à compressão e a ductilidade de argilas moles, proporcionando assim uma nova abordagem para o tratamento de materiais poliméricos descartados (CHEN *et al.*, 2015).

Segundo Silveira (2019), a utilização de fibras poliméricas num solo de matriz arenosa possibilitou o aumento da resistência uniaxial do solo, sendo encontrado os valores de 1,5% e 20 mm para o teor ótimo e o comprimento ótimo de uso no solo para esse tipo de fibra. Ainda segundo a autora, os valores de resistência ao cisalhamento do solo também apresentaram melhoras, seja na coesão ou no ângulo de atrito.

2.4.2 Reforço do solo com fibras naturais

As fibras vegetais são elementos naturais por possuírem uma alta quantidade de fibras individuais unidas por lamelas médias. Cada fibra individual é composta por quatro principais partes, sendo elas: parede primária, parede secundária, parede terciária e lúmen. As fibras vegetais podem se diferenciar uma das outras por determinadas características como número de fibras individuais, espessura das paredes, quantidade de lúmens, área transversal, conferindo assim, diferentes resistências mecânicas quando incorporadas ao solo (FERREIRA *et al.*, 2017).

A necessidade de preservação do meio ambiente, fez com que as buscas pelo uso de matérias oriundas de fontes renováveis no setor da construção civil aumentassem. Sendo assim, o uso de materiais compósitos com a adição de resíduos de construção, industriais e agrícolas, em conjunto com fibras naturais, vem aumentando (SANTOS, 2020).

As fibras de origem vegetal foram os primeiros tipo de fibras a serem utilizadas com reforço para materiais de construção, apresentando nas folhas a principal fonte de origem das fibras de maior interesse para a área geotécnica (CARVALHO, 2019). Estes compósitos reforçados com fibras vegetais dependem de diversos fatores, que irão influenciar na sua aplicação e desempenho, inclusive em relação as características desejadas para o compósito.

Alguns fatores considerados relevantes quando se trata de reforço do solo com fibras vegetais são: geometria; comprimento e diâmetro da fibra, promovendo uma maior ou menor contribuição para a ancoragem da fibra à matriz; resistência a tração, e módulo de elasticidade (CARVALHO, 2019). Alguns exemplos de fibras naturais que podem ser utilizadas como reforço de solo são as fibras de sisal, curauá e coco.

A inclusão de fibras de coco, mostradas na Figura 7, em solos argilosos compactados pode melhorar seu comportamento geotécnico que inicialmente não possua as condições necessárias para a estabilidade de obras de engenharia (OLIVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2019). Estes autores mostraram que a adição de fibras de coco no solo em diferentes percentuais, elevou a umidade ótima do solo e reduziu sua densidade seca máxima. Em relação a condutividade hidráulica, a pesquisa mostrou que não ocorreram alterações significativas para a utilização de até 1% de fibra ao solo.

Santos (2020) analisou o uso de fibras de coco babaçu (Figura 8) e agregado reciclado incorporados a um solo localizado na Ilha de Itamaracá/PE. Com a pesquisa, a autora concluiu que a adição de RCC e fibras ao solo apresentou ganhos de resistência à compressão simples aos 120 dias, quando comparados com o solo natural, tornando a técnica efetiva quanto as propriedades mecânicas do solo.

Figura 7 – Fibras de coco.



Fonte: Renato (2013).

Figura 8 – Fibras de coco babaçu.



Fonte: Santos (2020).

Santos, Fontes e Lima (2017) revelaram que o alto consumo de recursos não renováveis, em conjunto com a elevada geração de resíduos sólidos, vem incentivando a procura por materiais sustentáveis que possam ser utilizados na indústria da construção civil.

Os autores estudaram a inclusão de Resíduos da Construção Civil (RCC) com fibras de sisal, apresentadas na Figura 9, para a produção de materiais cimentícios que mostraram bons resultados para a resistência à compressão, apesar do aumento na porosidade, indicando que o uso de agregado reciclado e fibras de sisal em teores elevados (4% e 6%) conservaram ou até melhoraram as propriedades dos materiais cimentícios desenvolvidos.

Figura 9 – Fibras de sisal.



Fonte: A autora.

A determinação das propriedades físicas e químicas das fibras naturais são determinantes para sua aplicação, seja na engenharia ou em outra área (Gowthaman, Nakashima e Kawasaki, 2018). A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas e mecânicas, relatadas pelos autores, referentes as fibras de coco verde, juta e sisal.

Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de coco verde, juta e sisal.

Fibra	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm³)	Alongamento na ruptura (%)	Absorção de umidade (%)
Coco verde	100 - 225	3 - 6	1,39 - 1,52	12 - 51,40	130 - 180
Juta	393 - 860	10 - 30	1,30 - 1,45	1,50 - 1,80	12
Sisal	400 - 700	9 - 20	0,70 - 1,33	3,64 - 13	56 - 230

Fonte: Adaptado de Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018).

As fibras naturais apresentam em sua composição celulose, lignina e hemicelulose, em que cada elemento desses será responsável por determinada característica das fibras. O teor de lignina está ligado à resistência fornecida pela fibra, enquanto que a celulose/hemicelulose estará ligada à rigidez (GOWTHAMAN; NAKASHIMA; KAWASAKI, 2018).

Para Silva (2020), uma análise mais aprofundada da composição química das fibras naturais fornecerá uma melhor aplicabilidade desse material como reforço do solo, tornando então a análise química fundamental para a aplicação de fibras em materiais compósitos.

2.5 Fibras de sisal

O sisal (*Agave sisalana Perrine*) é uma espécie de planta típica da região do semiárido, apresentando grande resistência à seca e bastante utilizada para extração das fibras das suas folhas (CARNEIRO *et al.*, 2014). Segundo Martin *et al.* (2009), a fibra de sisal é a principal fibra dura produzida no mundo, correspondendo a cerca de 70% da produção comercial das fibras deste tipo.

O sisal é uma planta cultivada principalmente na região Nordeste do Brasil, sendo um importante fator para a fixação de trabalhadores nessa região do país, fornecendo renda e emprego (MARTIN *et al.*, 2009). As fibras de sisal apresentam função estrutural por fornecerem sustentação e rigidez às folhas, possuindo alinhamento longitudinal ao longo do comprimento da folha. As fibras encontradas podem ser fibras mecânicas, fibras de xilema ou fibras de fita, sendo as fibras mecânicas as que apresentam maior número e maior importância comercial (LEOCÁDIO, 2005).

As fibras de sisal podem ser empregadas do solo com o intuito de melhorar a capacidade de suporte, principalmente, em solos argilosos (WU *et al.*, 2018). Sood e Dwivedi (2017) analisaram as propriedades químicas apresentadas por essas fibras, concluindo que os teores de lignina variam de 8% a 11%, os teores de celulose variam de 67% a 78% e os teores de hemicelulose variam de 10% a 14,22%.

2.5.1 Origem

O cultivo de sisal teve início no México, antes mesmo da chegada dos europeus, concentrando-se, principalmente, em regiões tropicais e subtropicais (GHAVAMI; TOLÊDO FILHO; BARBOSA, 1999). Entre os séculos XVIII e XIX, o cultivo de sisal foi iniciado nos continentes asiático e africano em virtude da capacidade da planta em se adaptar a condições climáticas e ecológicas diversas, como nas condições de calor do Quênia e nas condições tropicais do Brasil e Havai (ANANDJIWALA; JOHN, 2010).

O Brasil está entre os maiores produtores de sisal, com cultivo concentrado mais na região Nordeste do país, nos estados da Bahia e Paraíba (MARTIN *et al.*, 2009). A adaptação da planta de sisal ocorre em função do tipo de espécie, cultura, clima, qualidade do solo,

condições ecológicas, apresentando um período de vida variando entre 7 e 15 anos dependendo dos fatores aos quais são expostas (ANANDJIWALA; JOHN, 2010).

2.5.2 Estrutura da fibra de sisal

As fibras naturais apresentam estruturas semelhantes, diferenciando entre si devido as características de área interna dos lúmens, número e tamanho de células de fibra, espessura das paredes celulares, número de lúmens e área total. As características estruturais de cada fibra, como seção transversal, proporcionam diferentes resultados para a resistência a tração que podem ser relacionados com sua morfologia (FIDELIS *et al.*, 2013).

De acordo com Fidelis *et al.* (2013), a redução da área interna dos lúmens e o aumento da espessura da parede celular secundária, proporcionam uma elevação na resistência à tração e no módulo de Young das fibras. Sendo assim, as fibras de sisal apresentam uma menor probabilidade de apresentarem falhas quando comparadas a outras fibras naturais, como a fibra de curauá (Figura 10).

Figura 10 – Fibras de curauá naturais cortadas (a) e desfibriladas (b).



Fonte: Adaptado de Libera Junior (2019).

2.5.3 Utilização das fibras de sisal

O sisal representa uma fibra que pode ser utilizada em diversas áreas, apresentando as vantagens por possuir um baixo custo, ser biodegradável e não tóxica. As fibras de sisal são utilizadas para a fabricação de diversos elementos artesanais para decoração e também na fabricação de cordas, sacos e barbantes, formando uma atividade econômica que absorve um

grande número de trabalhadores e auxilia da fixação do homem no campo (PEREIRA *et al.*, 2016).

Na indústria da construção civil, as fibras de sisal podem ser utilizadas para diversos fins, como execução de elementos de gesso e reforço de solo. O uso de sisal na execução de forros de gesso, é fundamental para as etapas de fixação das placas e elementos nas paredes, no teto e entre si, conforme Figura 11. As fibras de sisal também podem ser utilizadas para reforço do solo, apresentando resultados de resistência favoráveis, como é relatado nos trabalhos de Tanko, Ijimdiya e Osinubi (2018), Silveira (2018) e Leocádio (2005).

Figura 11 – Execução de forro de gesso.



Fonte: A autora.

2.6 Interação do solo com a fibra

A maioria dos estudos realizados na área de interação do solo com as fibras se concentrou em comparar o comportamento dos solos não reforçados e dos solos reforçados, em relação aos aspectos de resistência e deformabilidade (SILVEIRA, 2018). Desta maneira, existe uma grande complexidade nos fatores que afetam as características dos compósitos, proporcionando a aplicabilidade para uma determinada área e para a outra não.

Alguns autores relatam mudanças que a adição de fibras ao solo pode proporcionar, alterando as características de compactação, deformabilidade, surgimento de fissuras, resistência do solo à compressão, resistência do solo ao cisalhamento, entre outras. Os principais parâmetros

obtidos no ensaio de compactação são a densidade seca máxima do material e a umidade ótima, possibilitando a execução da compactação em campo.

Macedo (2013) analisou a utilização de fibras de polipropileno e agregado reciclado ao solo, obtendo valores favoráveis para sua aplicação na pavimentação. As umidades ótimas dos compósitos com adição de fibras e agregado reciclado, com ou sem cimento, aumentaram para os teores de 50% e 75% de RCC em 4,4% e 16,2%, respectivamente. Já os valores de densidade seca máxima do material reduziu para os três teores de agregado reciclado analisados com a pesquisa (25%, 50% e 75%).

Leocádio (2005) relata que o acréscimo do teor de fibras vegetais ao solo proporcionou um aumento na densidade seca máxima dos compósitos até um certo limite, vindo esse valor a reduzir depois de um tempo. Em relação a umidade ótima, o autor observou um acréscimo com a adição de fibras ao solo.

Tanko, Ijimdiya e Osinubi (2018) adicionaram fibras de sisal em solo laterítico, encontrando como resultado a redução da densidade seca máxima do material. Desta forma, o sisal passou a ocupar um maior espaço dentro da matriz do solo, gerando uma redução da densidade do material.

Tanko, Ijimdiya e Osinubi (2018) mostraram que a adição de sisal no solo proporcionou um aumento de resistência de 164 kN/m² no solo laterítico natural para 494 kN/m² no solo laterítico reforçado com 0,75% de fibra de sisal com comprimentos de 3,5 cm, após passar por um período de cura de 7 dias. Assim, as fibras possuem bom comportamento para esforços de tração, contribuindo para tornar mais favorável a interação solo-fibra.

Para Macedo (2013), a adição de fibras de polipropileno ao solo aumentou os valores de resistência à compressão simples em todos os teores de agregado reciclado. Os maiores valores de aumento ocorreram após o período de 28 dias de cura com teor de agregado reciclado de 50%, sendo o compósito com 0,75% de fibras, o material que apresentou melhor resistência à compressão com valor de 2,60 MPa.

A utilização de materiais reciclados para a construção civil necessita de incentivos e de tecnologias sustentáveis para obter a qualidade dos produtos e a redução de custos, atentando sempre para a preservação do meio ambiente.

O teor ideal de fibra a ser utilizado para reforço de solo depende de diversas características deste material, como comprimento, resistência à tração, módulo de elasticidade, diâmetro e composição química. Li *et al.* (2016) analisaram os teores de fibras de polipropileno em 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4%, encontrando valores favoráveis de resistência para os teores entre 0,2% e 0,3%, sendo estes os teores ideais obtidos pela pesquisa para a adição de fibra no solo.

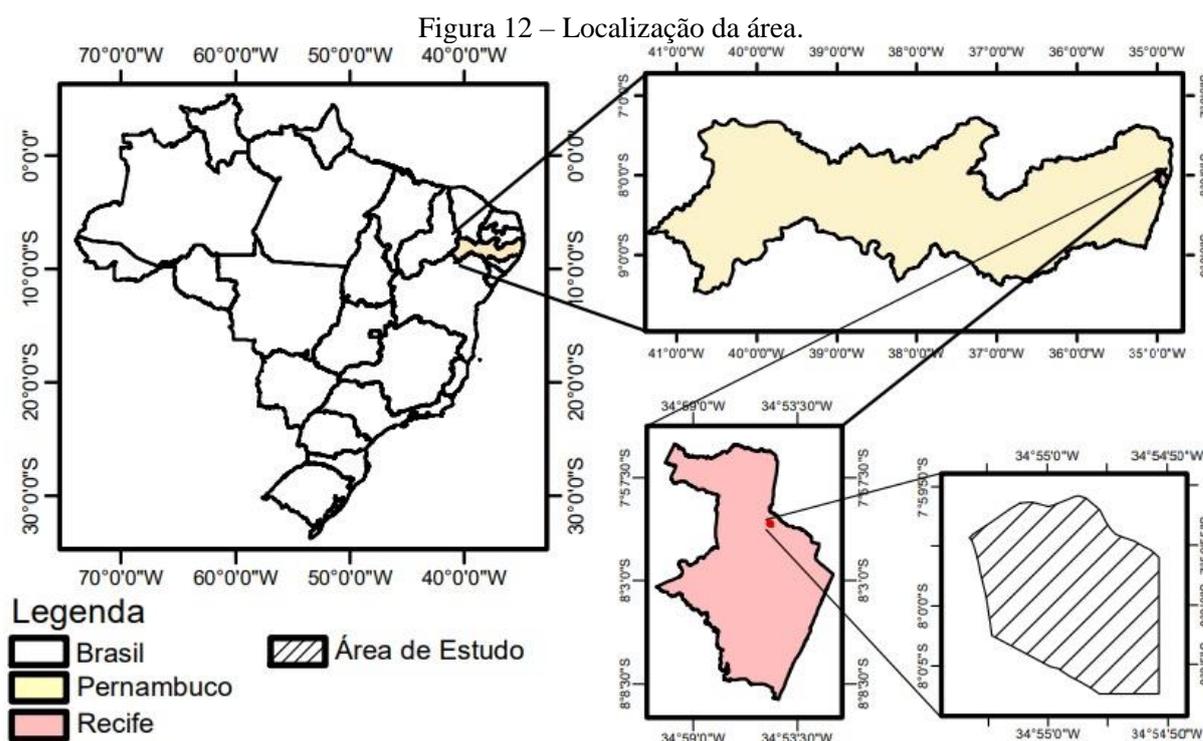
Para Silveira (2019), o aumento da resistência do solo após a introdução das fibras é dado pelo aparecimento de um intercepto de coesão aparente ou através do aumento do ângulo de atrito do material. Além disso, as fibras tendem a oferecer maior resistência e maior ductibilidade ao material, dependendo da aderência que ocorre entre a fibra e a matriz.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

As informações nesse tópico estão relacionadas à caracterização da área de coleta do solo, incluindo sua localização, características socioeconômicas e aspectos gerais sobre as características fisiográficas do município.

3.1 Localização

A área selecionada para estudo está localizada no município de Recife/PE, no bairro de Dois Unidos, nas coordenadas $7^{\circ} 59' 52''$ S e $34^{\circ} 54' 57''$ W, na rua córrego do curió, e faz parte da Região Político Administrativa II – RPA 2, conforme Figura 12. O bairro de Dois Unidos apresenta uma área com cerca de 3,12 km² e 32.805 habitantes (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2021).



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do software Qgis.

A origem do Recife teve início no século XVI, onde uma estreita faixa de área protegida por arrecifes, tornou-se uma cidade portuária em virtude das suas características físicas favoráveis. A cidade do Recife é a capital do estado de Pernambuco e apresenta uma área territorial de 218,846 km², com uma população estimada de 1.661.017 pessoas para o ano de

2021, apresentando densidade demográfica de 7.039,64 hab/km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA –IBGE, 2021).

A encosta estudada, apresentada na Figura 13, sofreu um deslizamento em julho de 2019, acarretando na morte de um dos moradores do local além de trazer diversos prejuízos econômicos (APRÍGIO, 2019). A ocupação irregular é bastante evidente na encosta, potencializando o risco de novos acidentes.

Figura 13 – Encosta de estudo.



Fonte: A autora.

3.2 Aspectos socioeconômicos

Recife representa um dos principais centros urbanos do Nordeste, apresentando uma economia dominada principalmente pelo setor terciário, incluindo serviços, comércio e administração pública. A cidade também concentra uma parte significativa do setor da construção civil e da indústria da transformação. Recife é responsável pela maior parte das exportações de conhecimento e tecnologias para empreendimentos (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2021).

O salário médio mensal, no ano de 2019 era de 3,3 salários mínimos, em que cerca de 38,1% da população apresentava rendimento mensal de até meio salário mínimo. Em relação a saúde, a taxa de mortalidade infantil é de 11,5 para 1000 nascidos vivos, apresentando uma redução

considerável ao longo do tempo. Em relação ao território, 69,2% dos domicílios apresentam sistema de esgotamento sanitário adequado, 60,5% dos domicílios urbanos apresentam vias públicas com arborização e 49,6% dos domicílios urbanos em vias públicas apresentam urbanização adequada (IBGE, 2021).

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) da cidade do Recife é de 0,772 para o ano de 2010. Entre os anos de 2000 e 2010, os serviços que mais cresceram dentro do município foram a educação, a longevidade e a renda. A proporção de crianças do ensino fundamental frequentando escolas entre os anos de 2000 e 2010 cresceu 46,88%, assim como também cresceu o percentual de jovens com ensino médio completo (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2021).

3.3 Aspectos fisiográficos do município

3.3.1 Vegetação

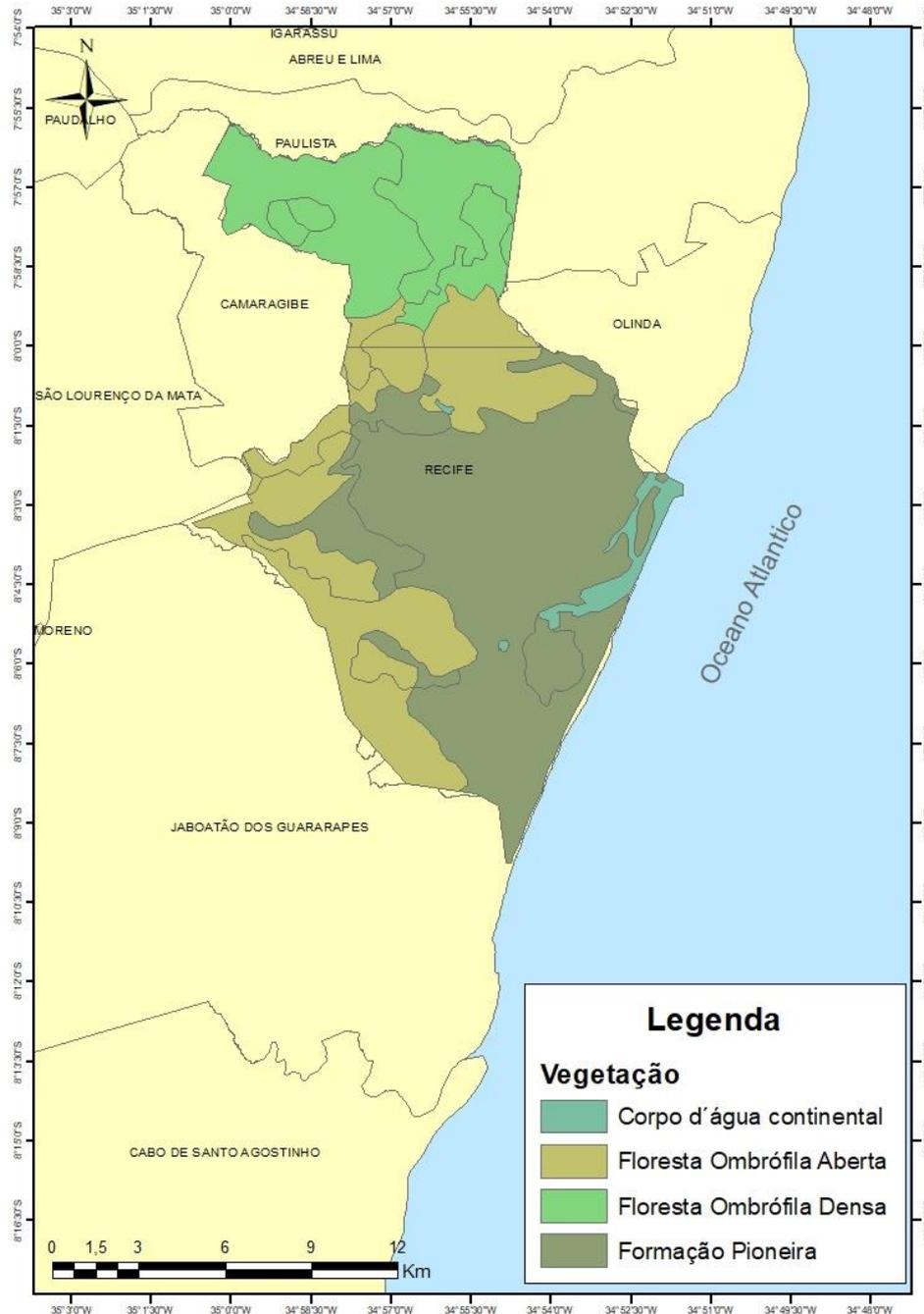
A vegetação da cidade do Recife é constituída principalmente pela Mata Atlântica, Campos de Várzea, Restinga e Mangues, os quais se encontram bastante devastados em virtude dos aterros e extração ilegal da madeira. A vegetação do mangue representa um ecossistema com grande importância ecológica e ambiental, sendo uma das regiões mais produtivas por levar matéria orgânica para regiões estuarinas e servir de fonte de renda para boa parte da população (BARBOSA, 2010).

A área pertencente a Mata Atlântica e seus ecossistemas tem sido aos poucos ocupada, transformada e em alguns pontos, preservada. Sendo assim, três tipos de áreas têm apresentado maior predominância na cidade: áreas recobertas com vegetação preservada; áreas com vegetação em simbiose, resultado de uma ocupação significativa; e pequenos pontos isolados de vegetação que ocupam o espaço urbano (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2012).

A política ambiental da cidade do Recife apresenta um conjunto de diretrizes e instrumentos que visam a preservação do aspecto paisagístico. Dentro das unidades de conservação do Recife, pode-se citar o parque natural municipal dos manguezais, situado na porção sul da cidade com um aspecto essencialmente aquático; a Mata da Várzea e a reserva ecológica de

Dois Unidos, onde se encontra a vegetação Mata Atlântica com área superior a 50 hectares (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2012). A figura 14 apresenta os aspectos da vegetação da cidade do Recife/PE.

Figura 14 – Vegetação da cidade do Recife-PE.



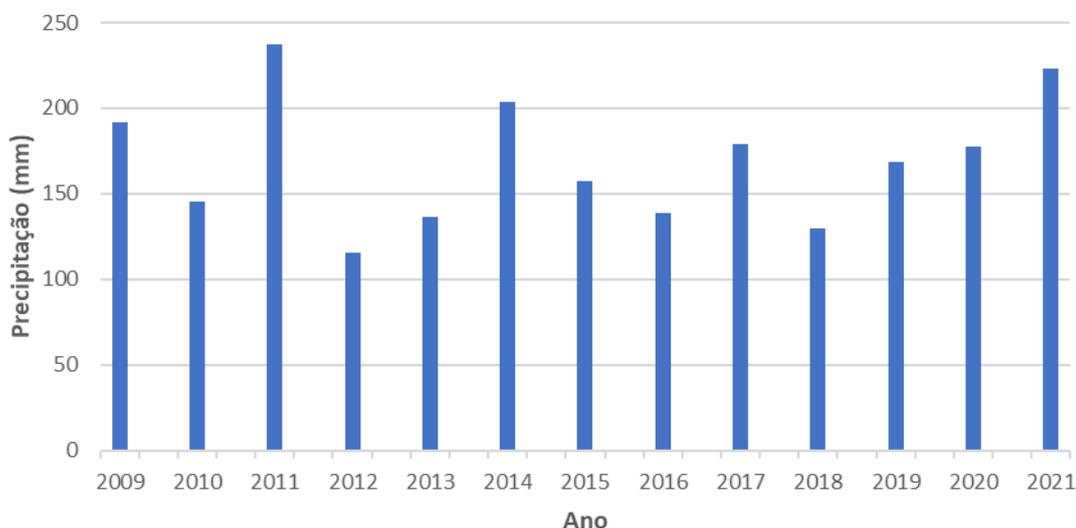
Fonte: Adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020).

3.3.2 Clima

A cidade do Recife apresenta clima tropical quente úmido com média anual de 25,4°C, com um regime de chuvas caracterizado por dois períodos diferentes: um de chuva na época do outono-inverno e outro de seca nos meses de setembro a fevereiro (BARROS; LOMBARDO, 2013). Sendo assim, o clima por ser compreendido como tropical chuvoso de verão seco, em que a precipitação da chuva afeta os processos erosivos por promover o carreamento de materiais (PORTELA, 2019).

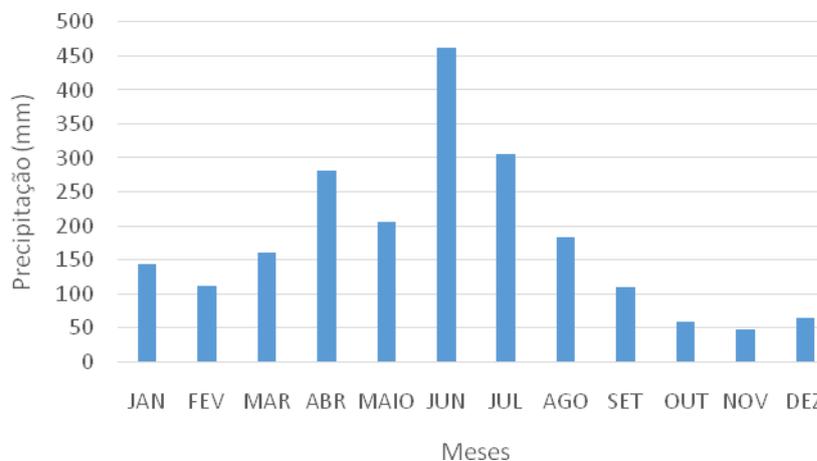
Na Figura 15 é apresentada a precipitação média anual da cidade do Recife entre os anos de 2009 e 2021 e na Figura 16 é mostrado a precipitação média mensal para o ano de 2019 (ano que ocorreu o deslizamento) entre os meses de janeiro e dezembro, sendo notório o alto índice pluviométrico entre os meses de abril e agosto, contribuindo para redução da resistência do solo e aumento dos riscos de deslizamentos de encostas.

Figura 15 – Precipitações médias anuais entre os anos de 2009 e 2021 no município do Recife (Posto da Várzea e Santo Amaro).



Fonte: Adaptado da Agência Pernambucana de Águas e Clima– APAC (2021b).

Figura 16 – Precipitações médias mensais no ano de 2019 no município do Recife (Posto da Várzea e Santo Amaro).



Fonte: Adaptado da Agência Pernambucana de Águas e Clima– APAC (2021b).

3.3.3 Relevo

Recife é formado por uma planície integrante das bacias sedimentares costeiras do estado de Pernambuco e Paraíba. Ao norte, o município é limitado por colinas e morros da Formação Barreiras, Planície Flúvio-lagunar e afloramentos da Formação Gramame, e ao sul, a cidade é marcada principalmente por sedimentos aluviais e Formação Barreiras. Ao leste, a cidade é limitada pelo oceano Atlântico e ao oeste, é formada pelo planalto Litorâneo Rebaixado e afloramentos da Formação Barreiras (SOUZA, 2013).

Os locais mais interiores da planície do Recife é marcado pela presença de Terraços Fluviais e meandros preenchidos por sedimentos. Nos Mangues é registrado a ocorrência de depósitos de textura silico-argilosa com matéria orgânica, e nas planícies de inundação é verificado a presença de depósitos aluvionares, com granulometria variada formado por argilas, siltes e areais (SOUZA, 2013).

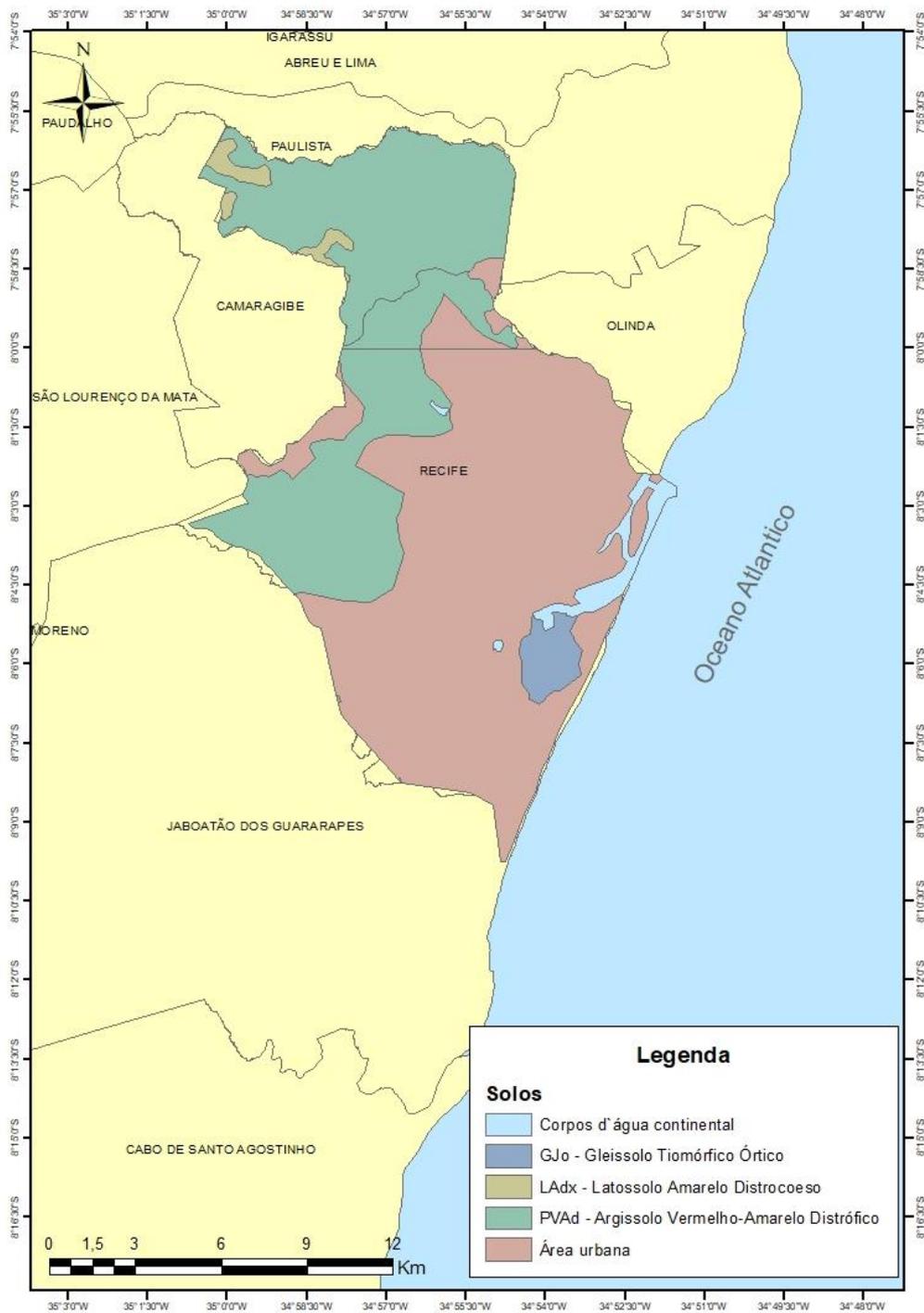
As planícies costeiras abrangem uma área significativa do estado de Pernambuco compreendendo um conjunto de ambientes de deposição fluvio-marinha, em que os padrões de relevo são marcados por extensos manguezais; praias arenosas e terraços marinhos; e os recifes de arenito, que caracterizam o litoral pernambucano (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

3.3.4 Solo

O município é marcado pela presença de argissolos amarelos, latossolos e gleissolos, conforme é apresentado na Figura 17. Os argissolos compreendem uma classe de solo que apresenta uma ampla variabilidade de características físicas, químicas e mineralógicas, podendo variar suas cores em: amarelo, vermelho-amarelo, vermelha e acinzentada (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

Os latossolos são solos normalmente profundos que apresentam alto grau de intemperismo e uniformidade no conjunto de características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. A textura pode variar de média a muito argilosa e as cores podem ser amarela, vermelho-amarela, vermelha e acinzentadas. Os gleissolos são classes de solos hidromórficos, típicos de ambientes de várzea, podendo apresentar a cor azulada, esverdeada ou acinzentadas (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

Figura 17 – Mapa de solos da cidade do Recife-PE.



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

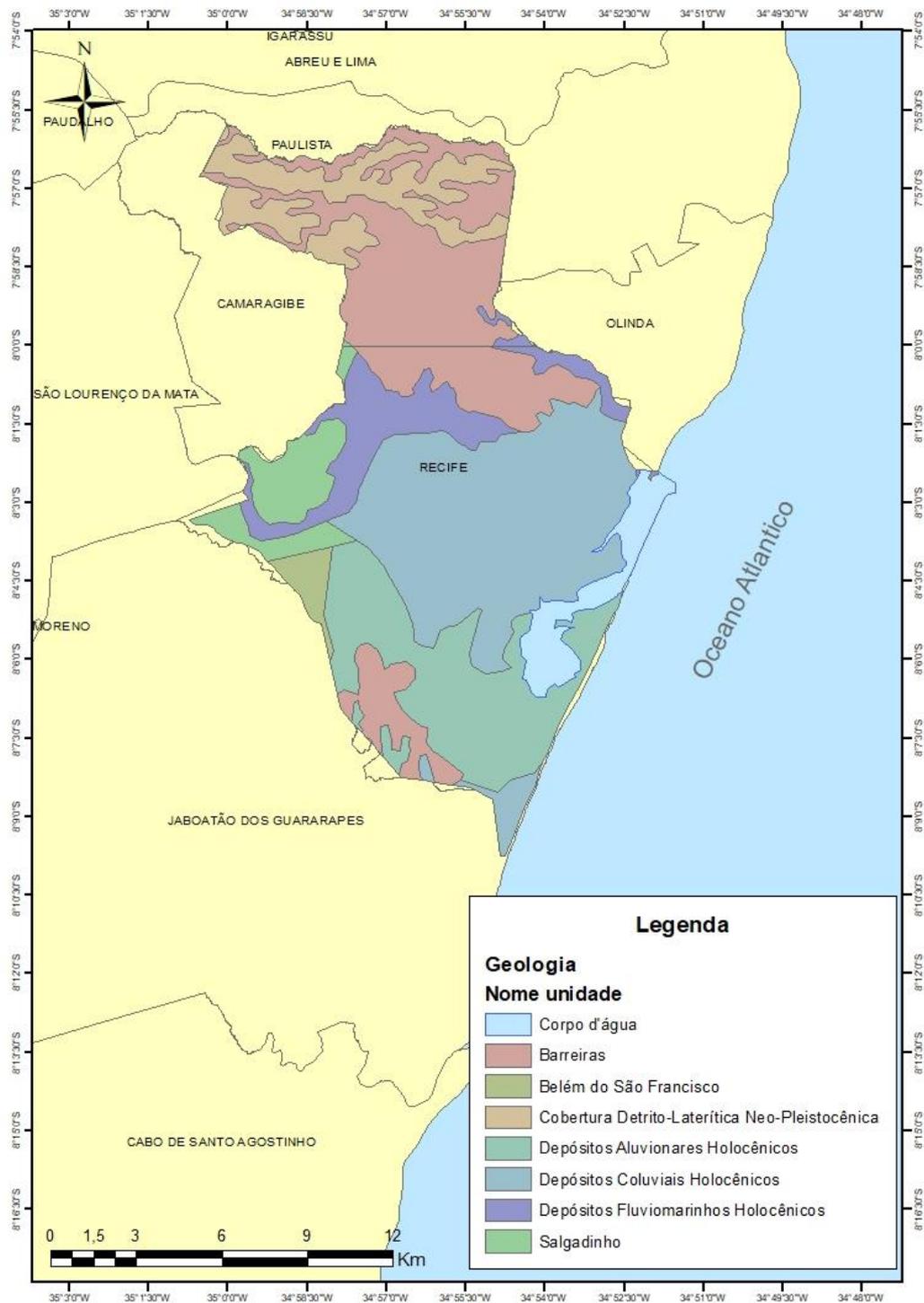
3.3.5 Geologia

A geologia da planície do Recife é marcada principalmente pelo Embasamento Cristalino Pré-Cambriano, pelos sedimentos da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco - Paraíba, sedimentos Quaternários e sedimentos Terciários da Formação Barreiras. A bacia

Pernambuco – Paraíba está localizada na faixa marginal atlântica e apresenta sedimentos Mesozóicos (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014). A Figura 18 mostra os aspectos geológicos da cidade do Recife/PE.

A bacia sedimentar da Paraíba ocupa a porção norte do estado de Pernambuco, passando pela cidade do Recife até ao norte de João Pessoa/PB e encontra-se assentada sobre rochas Pré-Cambrianas com sedimentos dispostos em camadas sub-horizontais. A bacia de Pernambuco corresponde a uma feição geológica gerada durante os processos tectônicos que ocasionaram a fragmentação dos continentes sul-americano e africano, assentadas também sobre rochas Pré-Cambrianas, contendo dois grandes grupos definidos por rochas sedimentares e por sedimentos inconsolidados (TORRES; PFALTZGRAFF, 2014).

Figura 18 – Mapa geológico da cidade do Recife-PE.



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

3.3.6 Hidrografia

A hidrografia da área de estudo é caracterizada principalmente pela Bacia do Rio Capibaribe e pela bacia dos pequenos rios litorâneos 2 – GL2, limitando-se ao norte pelo o Rio Capibaribe, e ao sul, pela a bacia do Rio Ipojuca. O Rio Capibaribe está localizado na Unidade de

Planejamento Hídrico UP2, entre 07° 41' 20'' e 08° 19' 30'' de latitude sul e 34° 51' 00'' e 36° 41' 58'' de longitude oeste (APAC, 2021a).

A bacia do Rio Capibaribe apresenta uma área com 7.454,88 km², abrangendo 42 municípios do estado de Pernambuco, podendo alguns estarem totalmente inseridos na bacia, como o município de Glória de Goitá e Passira, ou possuir sede na bacia como Recife e Camaragibe. O Rio Capibaribe, apresentado na Figura 19, percola por vários centros urbanos e serve de corpo receptor de resíduos industriais e domésticos. O regime fluvial do rio é intermitente no seu alto e baixo curso, tornando-se perene no seu baixo curso (APAC, 2021a).

O Rio Capibaribe possui as nascentes no Planalto da Borborema, entre os municípios de Poção e Jataúba. Próxima a Região Metropolitana do Recife (RMR), o rio 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 19 – Rio Capibaribe.



Fonte: A autora.

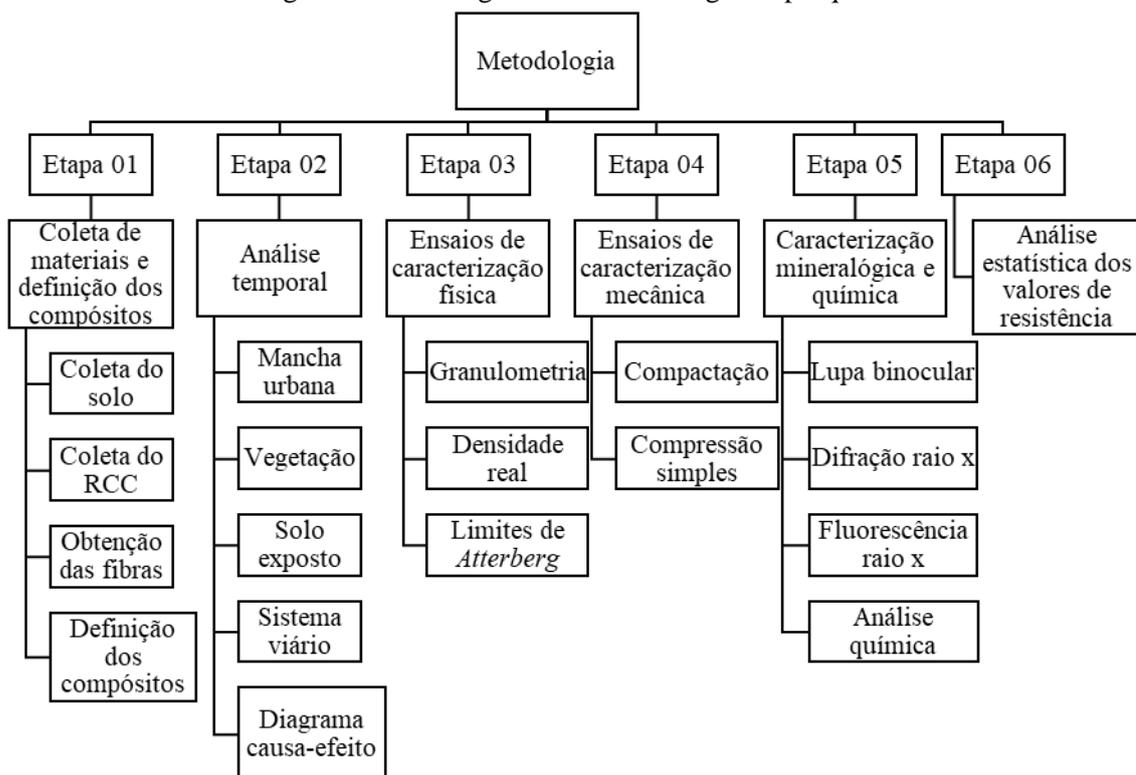
A bacia hidrográfica dos pequenos rios interiores 2 – GL2 está inserida na Unidade de Planejamento Hídrico UP21, localizada entre 08° 55' 30'' e 09° 05' 12'' de latitude sul e 37° 20' 31'' e 37° 32' 52'' de longitude oeste. O GL2 apresenta uma área com 159,73 km² que corresponde a 0,16% da área total do estado de Pernambuco. A bacia GL2 é composta por diversas nascentes do riacho Capim, afluente na margem esquerda pelo Rio São Francisco. Dentre os riachos que destacam-se na bacia, pode-se citar o riacho Trapiche e o riacho do Mel (APAC, 2021a).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os materiais e o programa experimental que foi desenvolvido para a realização da pesquisa, sendo dividida em seis etapas: coleta do material na área de estudo escolhida; análise temporal das tipologias de mancha urbana, solo exposto, vegetação e sistema viário da área, além de um diagrama de causa e efeito; ensaios de caracterização física; ensaios de caracterização mecânica, caracterização mineralógica e química, e por fim, a análise estatística.

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) e no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC), conforme mostra o fluxograma da Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.



Fonte: A autora.

4.1 Coleta de materiais e definição dos compósitos

4.1.1 Solo

O solo foi coletado numa encosta localizada no Município de Recife-PE, no bairro de Dois Unidos, no Córrego do Curió (Figura 21). A encosta foi palco de um deslizamento de massa, que acarretou no falecimento de um dos moradores, além de trazer danos econômicos para a localidade, sendo este um dos fatores que influenciou significativamente para a escolha do local (APRÍGIO, 2019).

Foram coletados cerca de 150 kg de material, que passaram por uma secagem prévia até atingir a umidade higroscópica, apesentado na Figura 22, no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC). Em seguida o solo foi destorroado e homogeneizado adequadamente (Figura 23 e Figura 24), conforme é solicitado pela NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2016).

Vale ressaltar que o material foi coletado conforme as especificações da NBR 9604 (ABNT, 2016). As amostras coletadas foram deformadas pois para a execução dos ensaios laboratoriais, foi necessário a mistura e homogeneização dos materiais para a obtenção dos compósitos estudados.

Figura 21 – Solo sendo coletado.



Fonte: A autora.

Figura 22 – Secagem do solo em laboratório.



Fonte: A autora.

Figura 23 – Solo sendo destorroado.



Fonte: A autora.

Figura 24 – Solo sendo homogeneizado.



Fonte: A autora.

4.1.2 Agregado reciclado

O agregado reciclado coletado é formado por resíduos classe A. Foram coletados cerca de 250 kg de agregado reciclado beneficiado, que foi armazenado no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC). O Resíduo da Construção Civil (RCC), apresentado na Figura 25, foi obtido na Usina de Beneficiamento de Resíduos da Construção Civil – Ciclo Ambiental, localizada no município de Camaragibe-PE.

A ciclo ambiental é uma empresa que oferece ao setor da construção civil a infraestrutura, para a reciclagem de entulhos públicos e privados, garantindo a preservação do meio ambiente e sustentabilidade econômica para o setor. Entre os benefícios que a reciclagem de RCC traz, pode-se citar a redução do custo de produção, diminuição da contaminação ao meio ambiente e a redução de gastos com a gestão dos resíduos.

Ao passar pelo processo de britagem, o resíduo reduz sua dimensão e passa por um sistema de peneiras mecânicas, que separam os agregados de acordo com seu tamanho comercial. Atualmente a usina produz brita nº 25 e nº 19, areia grossa e refugo. O armazenamento do material é realizado no próprio pátio da usina, sendo organizados de acordo com sua granulometria para posterior aplicação.

Figura 25 – Agregado reciclado.



Fonte: A autora.

4.1.3 Fibras de sisal

A fibra de sisal foi coletada numa empresa de gesso localizada na cidade de Recife-PE, no bairro de Boa Viagem, sendo beneficiada manualmente. O comprimento da fibra utilizado foi de 30 mm (Figura 26) e os teores adotados para a pesquisa foram de 0,25% e 0,50%.

O sisal foi obtido em tiras para facilitar o processo de produção das fibras. As fibras de sisal apresentam importante papel para a do meio ambiente, e para o desenvolvimento sustentável da sociedade, sendo matéria prima para a produção de diversos materiais como bolsas, cordas e tapetes.

Figura 26 – Fibra de sisal utilizada.



Fonte: A autora.

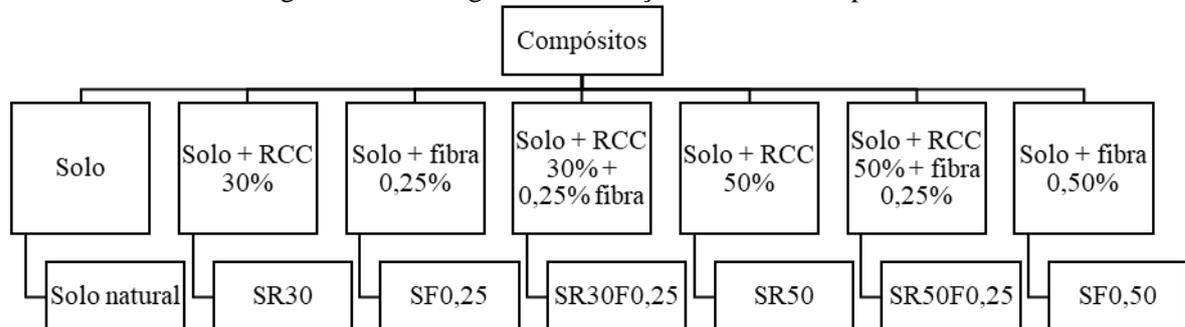
4.1.4 Compósitos de solo, agregado reciclado e fibras de sisal

As amostras estudadas foram preparadas de acordo com a NBT 6457 (ABNT, 2016), a qual relata o método de preparação dos materiais para os ensaios de granulometria, densidade real dos grãos, limites de *Atterberg*, compactação, entre outros.

Os compósitos foram formados pela junção de solo, agregado reciclado e fibras de sisal. O percentual encontrado após uma vasta revisão bibliográfica em diferentes artigos levaram à utilização de fibra nos teores de 0,25% e 0,50% e à utilização de agregado reciclado incorporado ao solo no teor de 30% e 50%. Vale ressaltar que serão analisados os compósitos

formados por solo; solo e agregado; solo, agregado e fibra; e solo e fibra, conforme o fluxograma apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma das relações entre os compósitos.



Fonte: A autora.

4.2 Análise temporal e diagrama de causa e efeito

A análise temporal revelou as características da dinâmica de ocupação da encosta e permitiu um estudo mais preciso sobre a influência dessa ocupação no mecanismo de estabilidade do solo no local. Dessa forma, é possível avaliar e verificar a evolução do uso e ocupação do solo ao longo desses anos, atentando principalmente para existência de um aumento da degradação ambiental do local.

A análise temporal foi realizada através da elaboração de mapas, com as áreas de quatro tipologias de coberturas encontradas, sendo elas: área de vegetação, correspondente aos locais com copas de árvores, gramados ou plantas; área de solo exposto, correspondente as áreas sem vegetação ou construção; área de mancha urbana, correspondente aos locais que apresentam moradias ou superfícies cimentadas que contribuem para o aumento do escoamento superficial do solo em virtude da redução da capacidade de infiltração; e sistema viário, representando as estradas do local.

As ortofotocartas foram coletadas junto a Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco – CONDEPE/FIDEM, na escala de 1:10.000, com curvas de nível equidistantes em 5 metros, para os anos de 1975 e 1985. Com o auxílio do *Google Earth*, foram obtidas as imagens da área de estudo para os anos de 2009 e 2019.

A vetorização das imagens foi realizada através do software livre QGIS versão 10.14, que representa uma multiplataforma do Sistema de Informação Geográfica (SIG). O software possibilita a visualização, edição e análise dos dados, criando mapas com várias camadas através de diferentes projeções (SILVA, 2020).

Após a análise temporal, foi realizada a construção das redes de interações para a região analisada, permitindo a identificação dos impactos ambientais diretos e indiretos e suas inter-relações. Para Ariza e Araújo Neto (2010), o método de redes de interação apresenta como principal vantagem o melhor entendimento dos impactos secundários que afetam a área, além de permitir a introdução de parâmetros estatísticos que possibilitam a estimativa de possíveis modificações futuras no local.

Sendo assim, um diagrama de causa e efeito, conhecido também como Diagrama de Ishikawa, foi construído a partir das informações encontradas na fundamentação teórica da pesquisa e na própria área da encosta, representando as cadeias de impactos relacionadas com suas possíveis causas.

Os indicadores ambientais analisados foram: (1) redução da cobertura vegetal; (2) ausência de rede sanitária; (3) tipos de ocupação; (4) adensamento populacional. Cada indicador analisado foi adaptado para a área em questão. Algumas visitas ao local foram necessárias para uma melhor análise dos fatores que potencializam o risco de deslizamento, além da visualização da existência de processos erosivos que comprometem a estabilidade da encosta.

Após a construção das interações, o grau de risco de cada indicador foi classificado em relação ao favorecimento do processo de deslizamento da encosta. A classificação do grau de risco foi realizada através dos parâmetros relatados por Santos (2012), em que:

- Grau baixo – Não há risco notório de acidentes geotécnicos ou hidráulicos localizados, não exigindo intervenções específicas de estabilização geotécnica;
- Grau médio – Há risco de acidentes geotécnicos ou hidráulicos de pequeno e médio porte;
- Grau alto – Há risco de acidentes geotécnicos ou hidráulicos graves.

4.3 Ensaios de caracterização física

Após o procedimento de preparação dos materiais, foram realizados ensaios de caracterização física para o solo, para o Resíduo da Construção Civil (RCC) e para os compósitos resultantes da junção desses materiais. Os ensaios de caracterização física foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica de Pernambuco.

Os ensaios realizados foram: granulometria, densidade real e limites de *Atterberg* (limite de liquidez e limite de plasticidade) segundo as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.3.1 *Granulometria*

A determinação da composição granulométrica do solo, do agregado reciclado e dos compósitos SR30 e SR50 foi realizada segundo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2017), possibilitando a identificação dos percentuais de argila, silte, areia e pedregulho de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Para todas as amostras foi utilizada a sedimentação, permitindo a identificação da parte fina do material (Figura 28). O solo, o agregado reciclado e os compósitos formados pela junção desses materiais foram classificados de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e com o *Transportation Research Board* – TRB.

O TRB tem sido aplicado principalmente para a classificação de solos utilizados na construção de pavimentos, sendo divididos em grupos identificados pelos símbolos A-1 a A-8, dependendo da qualidade do material.

Figura 28 – Sedimentação do solo.



Fonte: A autora.

4.3.2 Densidade real e Limites de Atterberg

A massa específica do solo, resíduos e compósitos SR30 e SR50 foi determinada pelas recomendações de execução de ensaio apresentadas na NBR 6458 (ABNT, 2016). Para a realização dos ensaios, foi utilizado picnômetro e bomba à vácuo, conforme é mostrado na Figura 29.

Os limites obtidos foram os limites de liquidez e limites de plasticidade para o solo e para as misturas de solo com agregado reciclado. O primeiro foi determinado de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016) enquanto segundo seguiu as diretrizes da NBR 7180 (ABNT, 2016).

Figura 29 – Ensaio de densidade real.



Fonte: A autora.

4.4 Ensaio de caracterização mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) e no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) na Escola Politécnica de Pernambuco. Todos os compósitos relatados na pesquisa, resultantes da junção de solo, resíduo e fibras, foram ensaiados.

Os ensaios realizados compreendem compactação do solo, com o objetivo de obter os parâmetros de umidade ótima e densidade seca máxima; e a resistência à compressão simples, obtendo a capacidade de carga no solo, que permitirá analisar de forma mais eficaz o comportamento do solo após a adição de agregado reciclado e fibras de sisal. Os ensaios foram executados conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.4.1 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado segundo as diretrizes na NBR 7182 (ABNT, 2016), apresentando como finalidade a obtenção do peso específico aparente máximo e a umidade ótima para as misturas analisadas.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com reuso do material, sendo moldados seis corpos de prova para cada mistura, totalizando 42 corpos de prova. A execução do ensaio envolve as seguintes fases: pesagem dos materiais de acordo com os teores ensaiados; mistura e moldagem dos corpos prova.

Para a moldagem dos corpos de prova, foi utilizado a energia de Proctor Normal, sendo utilizado o cilindro pequeno, com aplicação de 26 golpes ao longo de 3 camadas. A umidade de cada mistura foi obtida da porção central do corpo de prova, após a extração do mesmo (Figura 30). O ensaio foi realizado para o solo; solo e fibras; solo e agregado reciclado; e solo, agregado e fibra.

Para a compactação das misturas com fibras, foi adicionado inicialmente ao solo, o agregado reciclado e a água, e após a homogeneização, foi adicionado a fibra. A opção por esse tipo de

mistura se deu em decorrência da fibra desenvolver uma tensão superficial em contato com a água, fazendo com que elas se grudem uma com as outras (MACEDO, 2013).

Figura 30 – Extração do corpo de prova para retirada da umidade.



Fonte: A autora.

4.4.2 Compressão simples

O ensaio de compressão simples seguiu as diretrizes estabelecidas na NBR 12770 (ABNT, 1992), apresentando como objetivo a determinação da resistência à compressão, simples ou não confinada, de corpos de prova de solos coesivos através da aplicação de uma carga axial com controle de deformação.

O ensaio de compactação forneceu os dados necessários para a moldagem dos corpos de prova da compressão simples, identificando a quantidade de água necessária para que os corpos de prova alcançassem a resistência máxima. As misturas foram realizadas colocando no recipiente cada material de acordo com seu percentual e só então foi adicionada a água.

Após a mistura, o compósito formado foi dividido em três partes iguais, devidamente pesadas, e envolvidas num papel alumínio, sendo armazenadas num recipiente de isopor, com o objetivo de evitar a perda de umidade para o ambiente. A moldagem dos corpos de prova foi realizada de maneira estática, sendo o material colocado em três camadas num cilindro com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (Figura 31).

Figura 31 – Moldagem estática dos corpos de prova.



Fonte: A autora.

Para facilitar a desmoldagem, foi aplicado vaselina na parte interna do cilindro com auxílio de um pincel. Durante o processo de moldagem, foi realizada a escarificação entre uma camada e outra com o intuito de melhorar a interação entre as camadas. Vale ressaltar que a umidade foi retirada da mistura antes do processo de moldagem, através da média obtida entre duas cápsulas colocadas em estufa por um período de vinte e quatro horas.

Após a moldagem, os corpos de prova foram pesados e foi anotado seus diâmetros e suas alturas. Os corpos de prova moldados tiveram que atender as seguintes exigências:

- Diâmetro de $50 \pm 0,5$ mm e altura de 100 ± 1 mm;
- Teor de umidade de $\pm 3,0$ %;
- Grau de compactação de 97% a 103%, obtido pelo valor da massa específica aparente seca após a moldagem dividido pela massa específica seca definida inicialmente.

Os corpos de prova que não atenderam a esses requisitos foram descartados. Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados numa câmara úmida até atingirem o tempo de cura de 7, 28 e 60 dias. Em seguida, os corpos de prova foram levados de forma devida para o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Universidade de Pernambuco, para a realização do ensaio de resistência à compressão simples através de uma prensa da marca Emic, a uma velocidade de 1mm/min e modelo DL 30.000 (Figura 32).

Figura 32 – Rompimento dos corpos de prova.



Fonte: A autora.

4.5 Caracterização mineralógica e química

Neste tópico serão abordados os aspectos relacionados à metodologia para obtenção dos resultados da caracterização mineralógica e química. Os ensaios realizados foram a lupa binocular, difração de raio X, fluorescência de raio X e a análise química.

4.5.1 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE) do departamento de geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em Caruaru/PE. Os ensaios realizados nessa etapa foram o ensaio de lupa binocular, que permitiu uma melhor análise da fração de areia do solo e do RCC, e o ensaio de difração de raio X, identificando as partículas mais finas do solo e do resíduo.

Segundo Macedo (2013), o conhecimento da parte mineralógica do solo permite uma melhor compreensão a respeito do comportamento do solo nos aspectos de plasticidade, expansibilidade e resistência do material. A fração de argila é um importante fator que influencia no potencial de alteração dos atributos físicos do solo (GARCIA, 2015).

A análise mineralógica da fração de areia do solo, foi realizada no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE) do departamento de geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As amostras de solo e agregado foram lavadas de modo a eliminar as partículas finas do solo (menores que 0,075 mm), secas em estufa a 100°C e armazenadas em sacos. Cada amostra foi caracterizada através da observação visual e identificação de propriedades minerais em estereomicroscópico ZEISS A1 (lupa binocular) (Figura 33).

Figura 33 – Lupa binocular utilizada.



Fonte: A autora.

As frações finas do solo e do RCC foram identificadas através da difração de raio X (DRX), realizada na Universidade Federal de Pernambuco da cidade de Caruaru/PE. As amostras foram analisadas sob a forma de pó natural e não orientado, passadas na peneiras 200, com difratômetro da marca Rigaku (MiniFlex600) (Figura 34), com radiação K-alfa do cobre, executado com voltagem de 40kV e amperagem de 30 mA, operando com velocidade de 2 graus/min e intervalo 2θ de 5 a 70 graus.

A difratometria de raio X (DRX) permite a identificação da estrutura de substâncias cristalinas, sejam elas sintéticas ou naturais, orgânicas ou inorgânicas, sendo essencial para a caracterização mineralógica dos argilominerais presentes nas frações mais finas do solo como argilas e siltes. A análise mineralógica por DRX tem como princípio a natureza regular das redes cristalinas do minerais, e a propriedade dos raios X se difratarem em fase após a incidência em planos cristalinos sob um ângulo específico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Figura 34 – Difratorômetro do ensaio.



Fonte: A autora.

4.5.2 Caracterização química

As análises químicas foram realizadas com o objetivo de identificar informações relativas ao complexo sortivo do solo e do resíduo, soma de bases trocáveis, capacidade de troca catiônica e o percentual de saturação das bases, em que foram obtidos os teores de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), alumínio (Al) e magnésio (Mg).

A análise química do solo foi realizada na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) no departamento de agronomia, seguindo as diretrizes do Manual de Métodos de Análises de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A análise química dos materiais permite identificar os fatores limitantes de seus recursos, associando a quantidade de elementos no solo com o aumento da sua fertilidade e produtividade (NASSER *et al.*, 2021).

Com o objetivo de caracterizar os demais elementos do solo, foi realizado o ensaio de fluorescência de raios X. A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica que permite identificar os óxidos presentes na amostra de solo de forma quantitativa, estabelecendo as proporções de elementos como SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , MnO , Cr_2O_3 , K_2O e Fe_2O_3 (NASCIMENTO, 2019). O ensaio foi realizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE).

Para a execução do ensaio, as amostras foram passadas na peneira 0,075 mm e foram secas em estufa a 110°C. A amostra de solo foi analisada em uma Fluorescência de raio X portátil modelo NITON XL3t (Thermo Scientific) pertencente ao Laboratório de Geoquímica Aplicada ao Petróleo (LGAP-LAGESE-UFPE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com tempo de leitura de 300s. Os valores obtidos foram expressos em percentual na forma de óxidos, com 95% de confiabilidade.

4.6 Análise estatística dos valores da Resistência à Compressão Simples

Para que haja uma intervenção adequada no solo visando a melhoria da resistência, é necessário um estudo mais aprofundado em relação aos teores que deverão ser incorporados ao solo, ou seja, é fundamental encontrar uma solução que vise a otimização dos materiais utilizados. Para Güllü e Fedakar (2017), a modelagem estatística é o melhor caminho para se encontrar o teor adequado de cada material, principalmente quando é visado a redução de custo e tempo.

Ainda segundo os autores, em pesquisas de estabilização de solo utilizando a moldagem de corpos de prova com materiais em diferentes teores, a metodologia de análise estatística que mais se destaca é a *Response Surface Methodology* (RSM). Essa metodologia visa a obtenção da composição mais adequada através dos resultados obtidos durante o processo de ensaios laboratoriais e ajuda a tomar decisões mais satisfatórias para a estabilização dos solos (GÜNEYISI *et al.*, 2014).

A metodologia RSM consiste num conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas que visam a otimização de projetos e pode ser usada em diferentes áreas, apesar do seu crescimento em estudos de otimização de solos (GÜNEYISI *et al.*, 2014; WANG; CHENG; TAN, 2018; WANG *et al.*, 2021). Para os autores Myres, Montgomery e Anderson-Cook (2009), o método tem o objetivo de avaliar o efeito que as variáveis independentes podem ocasionar em uma variável de saída ou dependente.

A metodologia RSM representa uma técnica muito utilizada em pesquisas experimentais e visa obter a eficiência do sistema e a otimização dos dados fornecidos (GELIS; AKYUREK, 2021). Na análise estatística, é possível verificar a contribuição de cada variável independente e a forma como ela pode ser alterada no processo (YU; BATHURST, 2017).

O estudo realizado por Bashir, Naeem e Niazi (2010) sobre a otimização da remoção de nitrogênio amoniacal em aterros, aplicou o RSM para avaliar os efeitos das variáveis do processo e suas respectivas interações para a obtenção das condições ideais. Na pesquisa desenvolvida por Hosseini *et al.* (2019) a respeito da contaminação do solo em decorrência de vazamentos de produtos derivados do petróleo, a metodologia RSM foi utilizada para analisar os dados e encontrar as equações comportamentais do processo.

De acordo com Amiri *et al.* (2022), a análise das propriedades mecânicas é de alta importância para otimização dos teores dos materiais. No modelo desenvolvido nessa pesquisa, a variável dependente utilizada foi a resistência à compressão simples, obtida através dos ensaios laboratoriais, e a forma geral das variáveis independentes foi identificada após a análise dos parâmetros utilizados no estudo, obtendo como resultado os teores de RCC, fibras de sisal e tempo de cura (TC).

As relações entre as variáveis independentes foram obtidas através da análise de variância, realização de testes de distribuição probabilística dos dados e verificação da influência dessas variáveis no valor da resistência à compressão simples (SCHOEFS; LE; LANATA, 2013). O Valor-P representa o nível de significância de cada uma das variáveis independentes e não deverá ser maior que 0,05 realizada a verificação (DELOUCH; ULBRICH, 2007; SILVA *et al.*, 2021).

Após a verificação do Valor-P, é observada a diferença entre R^2 ajustado e o R^2 previsto, devendo esse valor não ser maior que 20% (DELOUCH; ULBRICH, 2007). Sendo assim, a modelagem matemática poderá tomar forma pelo estabelecimento das relações entre as variáveis independentes e a variável dependente, identificando a qualidade do ajuste desse modelo, para então prever a tendência de resultados satisfatórios do método para as variáveis em questão (GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017). Toda a análise estatística foi realizada com o auxílio do *Minitab Statistical Software* (versão 19.0).

A última etapa da análise estatística consistiu na verificação da adequação do modelo. Sendo assim, foi verificada, através de um diagrama de caixa ou box plot, a variabilidade e o desvio-padrão dos dados. O diagrama de caixa ou box plot é uma forma gráfica de visualizar a distribuição dos dados, permitindo identificar o valor máximo, mínimo, o primeiro quartil, a

mediana e o terceiro quartil de uma série de dados, além de valores discrepantes do conjunto de informações, denominados de *outliers*.

A presença de uma caixa mais achatada indica uma menor variabilidade e um menor desvio-padrão dos dados. O gráfico box plot oferece informações sobre a média, mediana, amplitude, dispersão e assimetria do conjunto de dados. Quanto maior for a amplitude da série, maior será a variação dos dados (VALLADARES NETO *et al.*, 2017).

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados em laboratório, assim como, suas respectivas análises. Os resultados mostrados se referem à análise temporal e aos ensaios de caracterização física, mecânica, química e mineralógica, além da análise estatística.

5.1 Análise temporal e diagrama de causa e efeito

5.1.1 Análise temporal

5.1.1.1 Dados do sensoriamento remoto

Na Tabela 4 é apresentada a descrição relativa da distribuição espacial e dos resultados quantitativos da análise temporal para a encosta localizada no município de Recife/PE, para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019. A Tabela 5 revela as taxas de variação de cada cobertura ao longo dos anos. As tipologias analisadas foram: (1) Solo exposto, (2) mancha urbana, (3) vegetação e (4) sistema viário.

Para a obtenção dos resultados apresentados, foi necessário a realização da restituição das ortofotocartas para os anos em questão, utilizando o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS 2000), sendo esse o novo sistema de referência para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Tabela 4 – Dados do uso e ocupação do solo para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.

Classe	Área (m ²)				% da área de estudo			
	1975	1985	2009	2019	1975	1985	2009	2019
Solo exposto	10000	10400	-	7400	5,55	5,78	0	4,11
Mancha Urbana	-	-	116300	135000	-	-	64,61	75,00
Vegetação	163400	166500	54600	27600	90,78	92,50	30,34	15,33
Sistema viário	6600	3100	9100	10000	3,67	1,72	5,05	5,56
Total	180000	180000	180000	180000	100	100	100	100

Fonte: Elaborado a partir de CONDEPE/FIDEM (2019).

Tabela 5 – Taxas de variação para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.

Classe	Taxas de variação (%)			
	1975-1985	1985-2009	2009-2019	1975-2019
Solo exposto	(+) 4,00	-	-	(-) 26,00

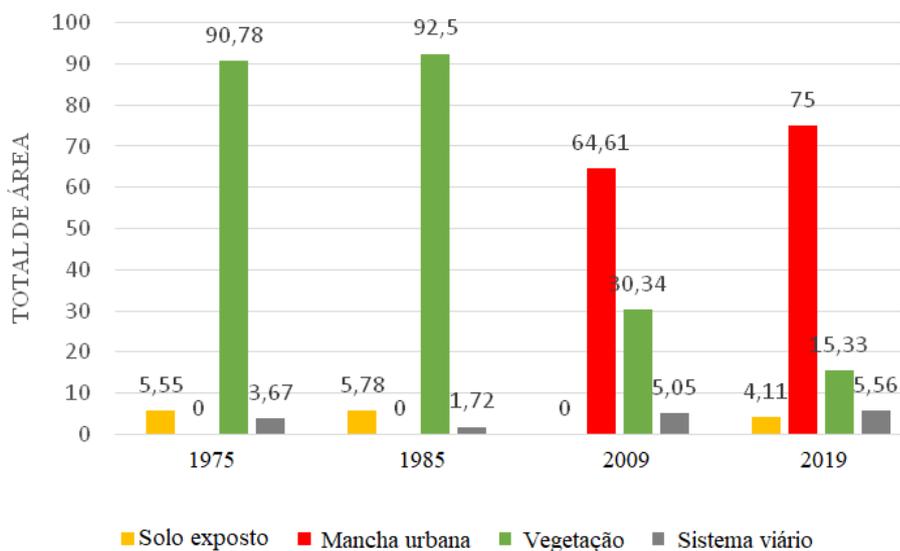
Tabela 5 – Taxas de variação para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.
(continuação)

Classe	Taxas de variação (%)			
	1975-1985	1985-2009	2009-2019	1975-2019
Mancha urbana	-	-	(+) 16,08%	-
Vegetação	(+) 1,90	(-) 67,21	(-) 49,45	(-) 83,11
Sistema viário	(-) 53,03	(+) 193,55	(+) 9,89	(+) 51,52

Fonte: A autora.

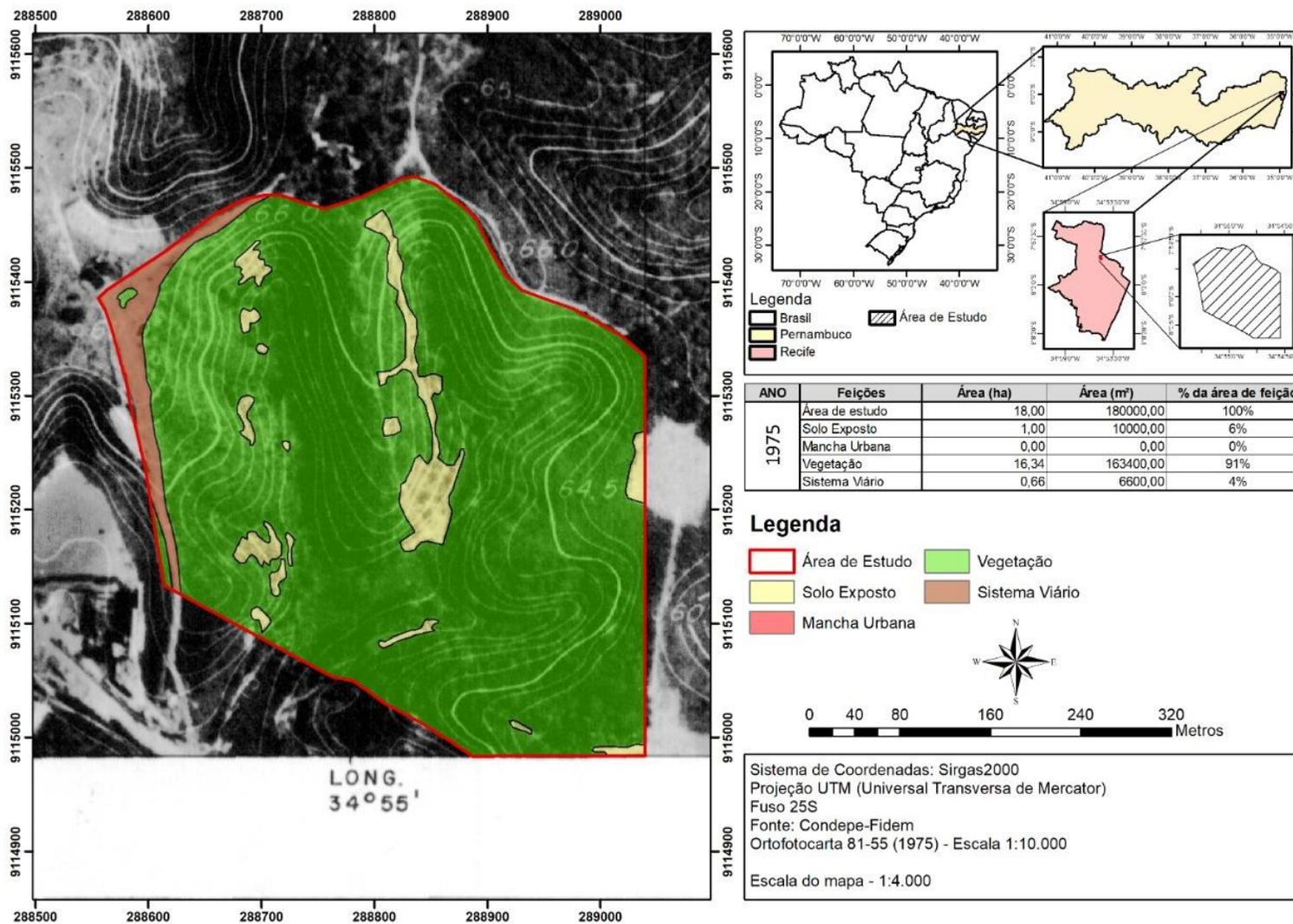
A Figura 35 apresenta o percentual ocupado por cada tipologia ao longo dos anos. Com a análise temporal, foi verificado que a área referente a mancha urbana passou a ocupar 75% da área de estudo em 2019, ao passo que a área referente a vegetação reduziu 83,11% ao longo dos anos, fatores que potencializam o risco de desastres naturais. As Figuras 36, 37, 38 e 39 apresentam o resultado do sensoriamento remoto.

Figura 35 – Percentuais das áreas para os anos de 1975, 1985, 2009 e 2019.



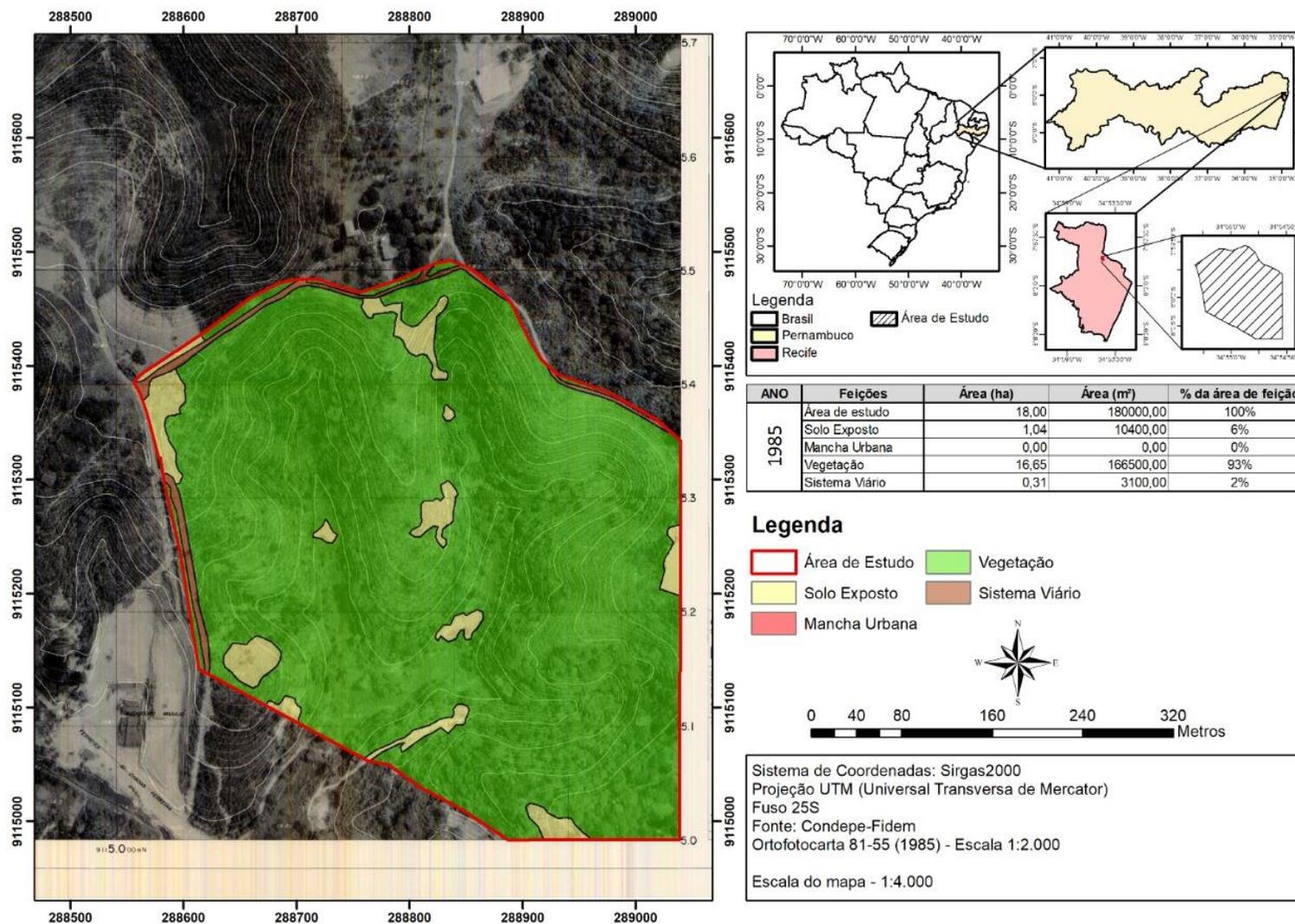
Fonte: A autora.

Figura 36 – Uso e ocupação da área da encosta em 1975.



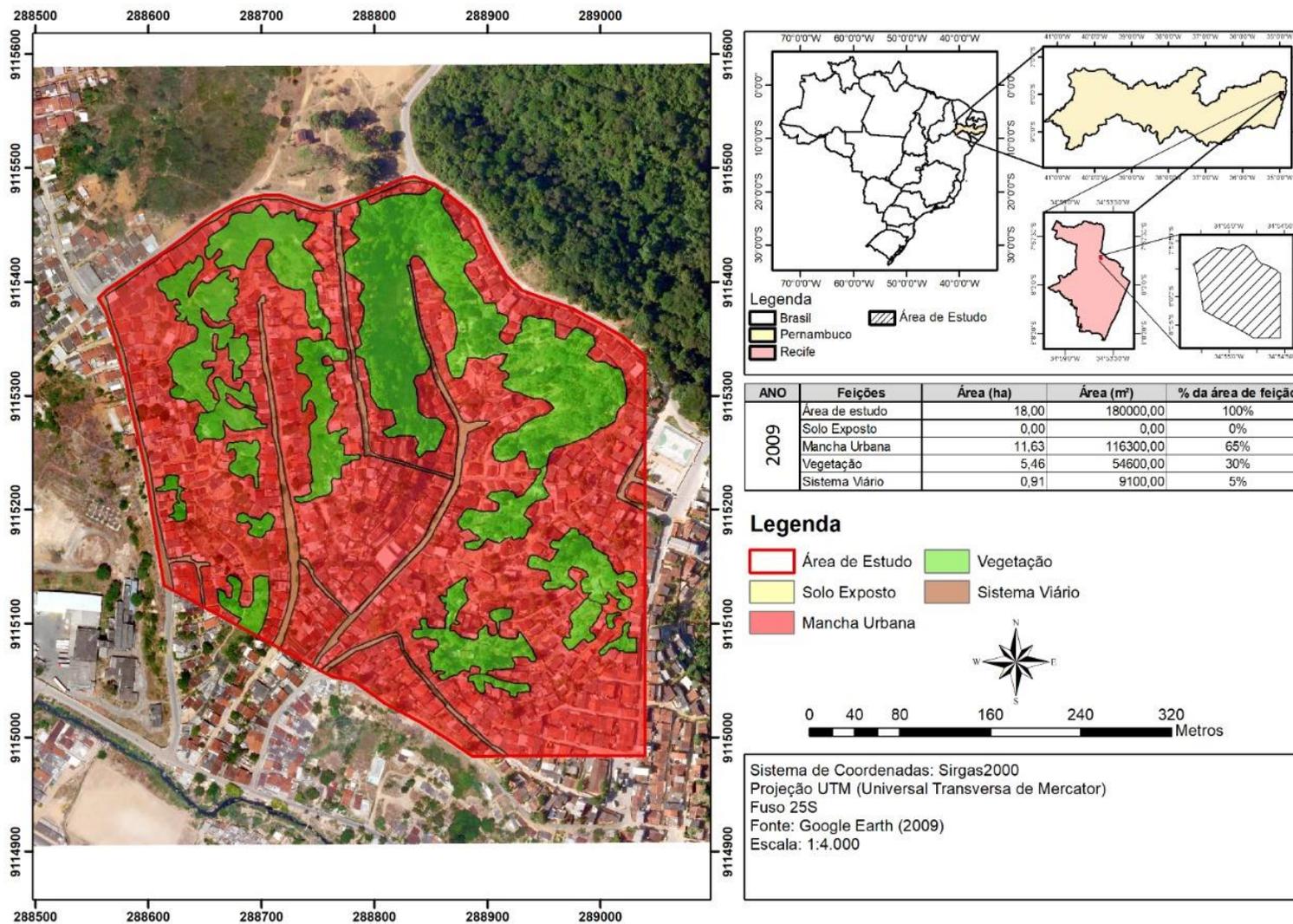
Fonte: A autora.

Figura 37 – Uso e ocupação da área da encosta em 1985.



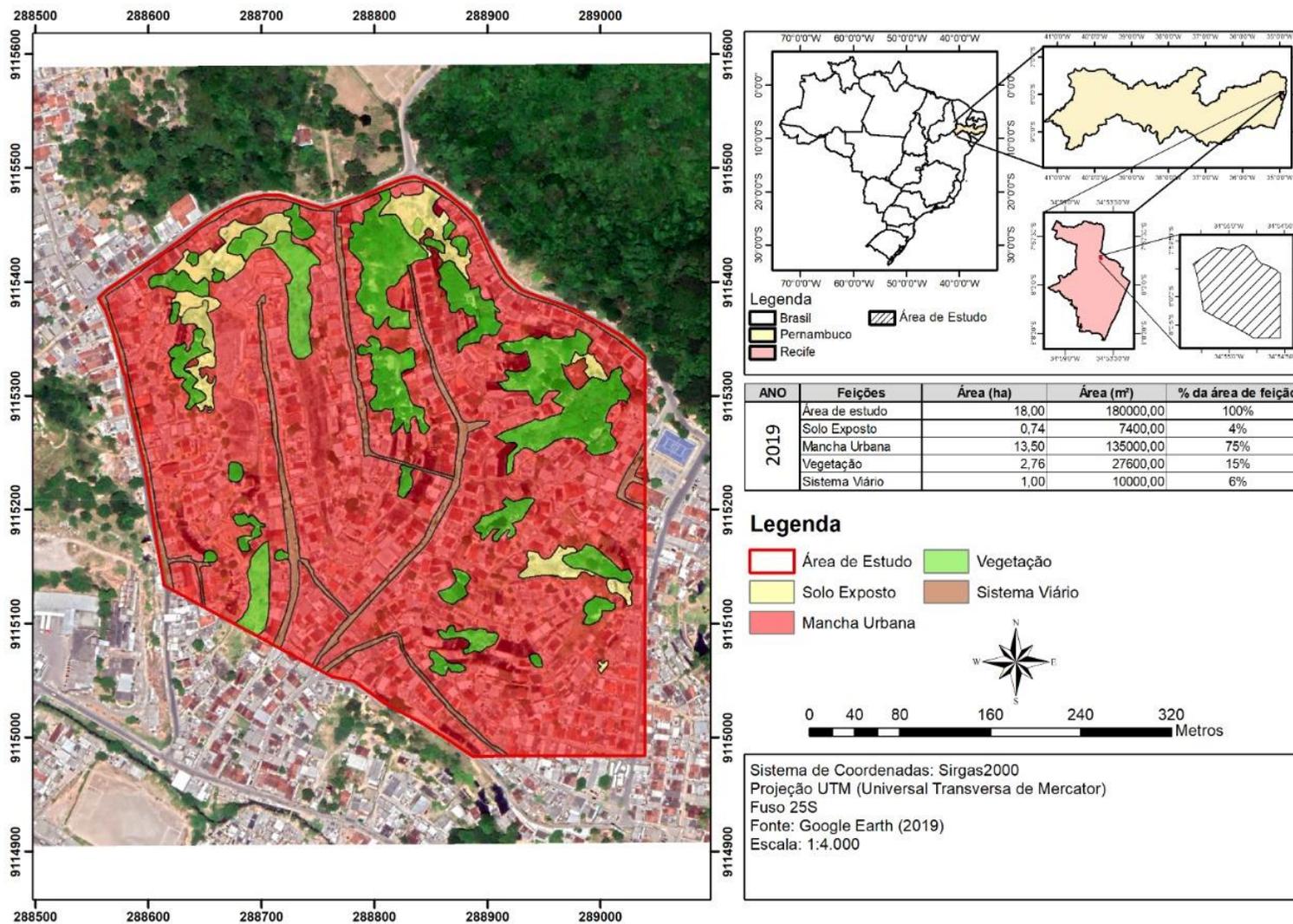
Fonte: A autora.

Figura 38 – Uso e ocupação da área da encosta em 2009.



Fonte: A autora.

Figura 39 – Uso e ocupação da área da encosta em 2019.



Fonte: A autora.

5.1.1.2 Análise temporal do uso e ocupação do solo

É perceptível a modificação na área correspondente a mancha urbana ao longo desses 45 anos de estudo. No ano de 1975 a tipologia de mancha urbana praticamente não existia na área analisada. Entretanto, esse percentual chega em 2019 ao valor de 75%, correspondendo a 3/4 do total da área analisada.

Esse fator está relacionado à modificação espacial inserida ao longo dos anos na área em questão, promovendo a redução da vegetação e a criação de novas construções que aumentam as áreas impermeabilizadas do local. Entre os anos de 1975 e 2019 é observado um aumento tanto no percentual de mancha urbana, que passa a ocupar 75% da área de estudo, quanto no percentual do sistema viário. Esse fator pode ser explicado pela necessidade de criação de novas rotas de acesso para locomoção de pessoas e bens à medida que a urbanização cresce.

A área correspondente a mancha urbana apresentou um aumento ao longo dos anos, chegando a marca de 135000 m² da área em estudo e entre os anos de 2009 e 2019 o aumento do percentual de mancha urbana foi de 16,08%. A área de solo exposto apresentava um total de 10000 m² no ano de 1975, enquanto que no ano de 2019 esse valor foi de 7400 m², mostrando uma redução de 26% da área correspondente a essa tipologia.

A vegetação foi uma das tipologias mais afetadas pelo tempo, reduzindo em 83,11% ao longo dos anos entre 1975 e 2019. A vegetação corresponde a um fator relevante no processo de estabilização de uma encosta, representando um instrumento de proteção contra a incidência direta da chuva sobre o terreno que eleva o escoamento superficial, além de suas raízes servirem como um reforço natural do solo.

A redução alarmante na tipologia de vegetação ocorreu entre os anos de 1985 e 2009, alcançando a marca de 67,21%, o que gera uma maior preocupação em relação a formação de áreas de risco. O sistema viário apresentou um aumento de 51,52% entre os anos de 1975 e 2019, contribuindo para o aumento das áreas impermeabilizadas do local.

De acordo com Santos (2020), o uso e a ocupação do solo de forma desordenada, em decorrência do aumento populacional, podem ser consequências de um planejamento urbano e de uma gestão pública deficientes, incapazes de absorver o incremento populacional ao longo

dos anos, impossibilitando o oferecimento de uma infraestrutura básica para os novos aglomerados. Dessa forma, novos assentamentos irregulares acabam surgindo ao passo que a degradação ambiental e redução da biodiversidade aumentam.

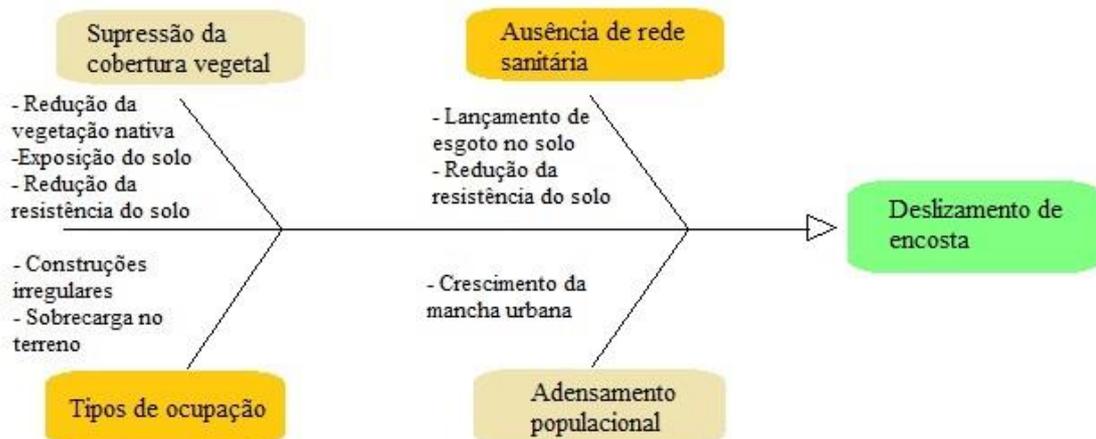
5.1.2 Diagrama de causa e efeito

A elaboração do diagrama de causa e efeito possibilitou a avaliação da relação entre as fontes geradoras de impactos e seus respectivos indicadores ambientais, conforme Figura 40. Na área de estudo, o deslizamento de encostas foi o impacto ambiental/final analisado, relatando diversas causas que podem potencializar o risco da sua ocorrência.

Para cada indicador ambiental foram relatadas consequências atreladas. Como resultado, foi obtido que o indicador ambiental “supressão vegetal” apresentou como principais consequências a redução da vegetação nativa, o aumento do solo exposto e a redução da resistência ao cisalhamento do solo. Já para o indicador “ausência de rede sanitária” as consequências foram o lançamento de esgoto diretamente ao solo e a redução da resistência ao cisalhamento.

Para o indicador ambiental “tipos de ocupação” as consequências mais relevantes foram as construções irregulares sobre a encosta e a sobrecarga no terreno. Já para o indicador “adensamento populacional” a principal consequência pode ser o crescimento da área de mancha urbana no local.

Figura 40 – Diagrama de causa e efeito.



Fonte: A autora

Foi verificado a presença de processos erosivos que aumentam o risco de de deslizamento da encosta, em que cada impacto ambiental analisado contribui para que o processo ocorra. A supressão da cobertura vegetal aumenta a área desprotegida do solo, reduzindo sua resistência, aumentando a incidência de deslizamentos. Para a encosta analisada, a supressão da cobertura vegetal apresentou grau de risco médio, já que a vegetação ainda ocupa uma área considerável no ponto onde ocorreu o deslizamento.

A ausência de rede sanitária aumenta o volume de esgoto, que é lançado diretamente ao solo, reduzindo a resistência do mesmo. Foi verificado que boa parte das casas lançam o esgoto diretamente ao solo, sem nenhum tipo de cuidado, fazendo com que o indicador ambiental “ausência de rede sanitária” apresente uma classificação de alto grau de risco para a área (Figura 41).

Figura 41 – Lançamento de esgoto diretamente no solo.



Fonte: A autora.

Na área foi observado a presença de construções ao longo do talude, em locais considerados de alto risco, em que é possível verificar a ausência de um planejamento urbanístico (Figura 42). Dessa forma, as construções na encosta elevam a sobrecarga do terreno, contribuindo para o aumento das tensões mobilizantes do solo, tornando o indicador “tipos de ocupação” um indicador de alto risco para o local.

Figura 42 – Construções ao longo da encosta.



Fonte: A autora.

O adensamento populacional também pode ser verificado no local, representado pelo aumento no percentual de mancha urbana ao longo do tempo. No ponto onde ocorreu o deslizamento, a presença de construções se torna menos densa do que em outros pontos ao redor da encosta. Sendo assim, o adensamento populacional é considerado um indicador ambiental de médio risco para o local estudado.

5.2 Caracterização física

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios de granulometria, densidade real e limites de *Atterberg* (limites de plasticidade e liquidez). As misturas analisadas foram o solo natural, o resíduo, a mistura SR30 e a mistura SR50.

5.2.1 Granulometria

A análise granulometria foi realizada para o solo, para o RCC, e para os compósitos formados pela junção de RCC (30%) e solo (SR30), e RCC (50%) e solo (SR50). As curvas obtidas com os ensaios estão apresentadas na Figura 43. Os percentuais de cada fração granulométrica referentes aos compósitos estudados estão descritos na Tabela 6.

Figura 43 – Curva granulométrica do solo.

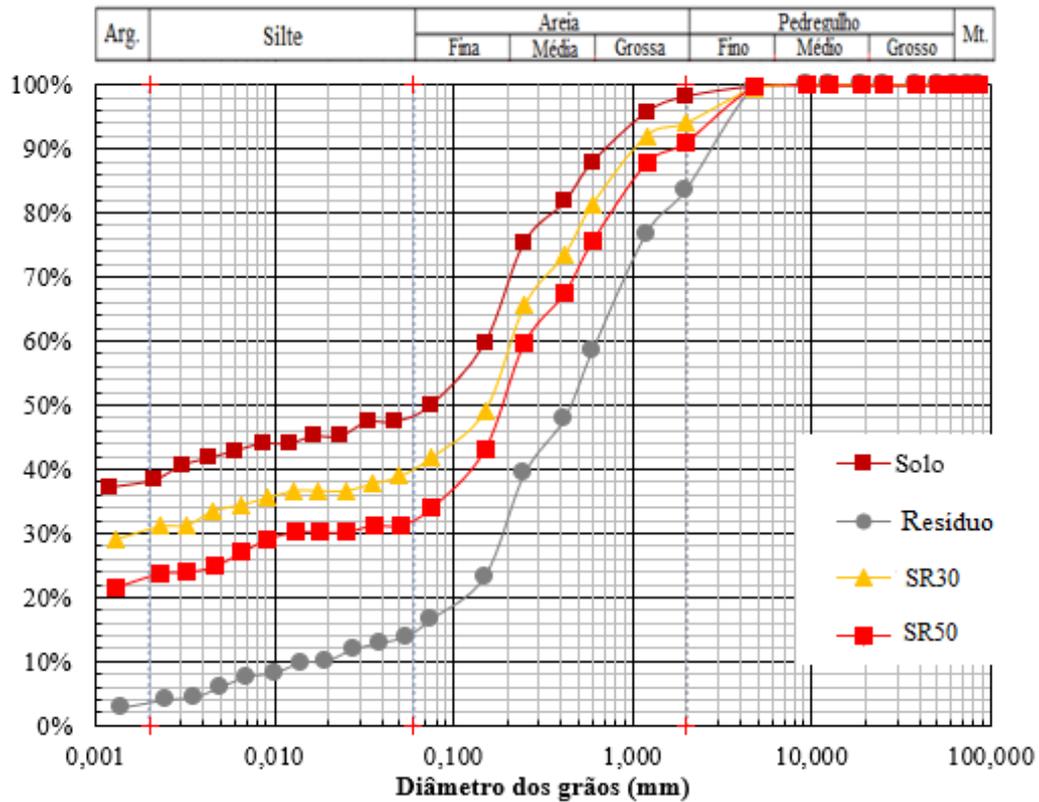


Tabela 6 – Granulometria dos compósitos.

Material	Frações do solo (%)				Relação silte/argila
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	
Solo	38,30	9,70	50,26	1,74	0,25
SR30	31,12	8,88	54,02	5,98	0,28
SR50	23,50	8,50	59,09	8,91	0,36
Resíduo	3,50	10,60	69,51	16,39	3,03

Fonte: A autora.

O solo apresentou fração predominante de areia, apresentando um valor de 50,26%, seguido pelos percentuais de argila e silte, com 38,30% e 1,74%, respectivamente. O material formado por solo e 30% de RCC (SR30) apresentou fração predominante de areia (54,02%), seguido pelos teores de 31,12% de argila, 8,88% de silte e 5,98% de pedregulho. A mistura formada por solo e 50% de RCC (SR50) mostrou teor predominante de areia no valor de 59,09%, teor de argila de 23,50%, teor de silte de 8,50% e teor de pedregulho de 8,91%.

O resíduo utilizado apresentou teor predominantemente arenoso (69,51%), seguido por uma fração de pedregulhos de 16,39% e um reduzido teor de argila (3,50%) e silte (10,60%). Com os resultados mostrados, é possível identificar que o acréscimo no teor de agregado reciclado

nas misturas aumentou o teor de areia e reduziu a fração argilosa dos materiais. O percentual de pedregulho também aumentou com o acréscimo de resíduo.

A relação silte/argila para o solo foi de 0,25, indicando um maior grau de intemperismo para o solo, já que, segundo Santos e Zaroni (2019), quanto menor a relação silte/argila, maior será o grau de intemperismo sofrido pelo solo, indicando uma maior incidência de processos erosivos. Essa relação é reduzida ao adicionar o resíduo nas misturas, favorecendo a redução do processo de erosão acarretado ao solo.

O coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) não foram encontrados para o solo, nem para as misturas formadas por solo e agregado reciclado, já que não foi possível a identificação do diâmetro efetivo do solo, que corresponde ao diâmetro na peneira para o qual 10% das partículas da amostra passariam, conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995). Apenas o resíduo apresentou coeficientes de uniformidade e de curvatura nos valores de $C_u = 32$ e $C_c = 2,67$.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo é considerado como CL, que significa uma argila arenosa com baixa plasticidade, devido a presença de mais de 50% de material passante na peneira nº 200 e limite de liquidez abaixo de 50. As misturas de solo e agregado reciclado (SR30 e SR50) apresentaram classificação pelo SUCS, como uma areia argilosa – SC, enquanto o agregado reciclado foi classificado como uma areia bem graduada – SW.

A classificação pelo *Transportation Research Board* – TRB também foi obtida em função da granulometria do solo e dos limites de consistência. Segundo a classificação pelo TRB, o solo encontrado pertence ao grupo A-6, representado por solos argilosos que apresentam mau comportamento quando empregados como subleitos de pavimentos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, 2006).

As outras misturas formadas por solo e agregado também foram classificadas segundo o TRB, apresentando um resultado que classifica a mistura de solo e 30% de agregado (SR30), solo e 50% de agregado (SR50) e o agregado reciclado (resíduo) como pertencentes ao grupo A-4 (solos siltosos), A-2-4 (pedregulhos e areias siltosas ou argilosas) e A-1-b (fragmentos de pedras, pedregulhos e areia), respectivamente.

O agregado reciclado e a mistura formada por solo e agregado no teor de 50% apresentaram comportamento de excelente a bom para utilização como subleito em pavimentação, enquanto que o material formado por solo e 30% de agregado reciclado apresentou um comportamento de regular a mau para a mesma finalidade.

Com isso, é possível perceber que o acréscimo de resíduo nas misturas melhoram o comportamento das mesmas para utilização em subleitos de rodovias. A Tabela 7 mostra o resultado da classificação segundo o SUCS e a TRB das amostras para complementação da análise.

Tabela 7 – Classificação dos materiais segundo o SUCS e a TRB.

Misturas	Classificação SUCS	Classificação TRB
Solo natural	Argila arenosa – CL	Argila (A-6)
SR30	Areia argilosa – SC	Solos siltosos (A-4)
SR50	Areia argilosa – SC	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas (A-2-4)
Resíduo	Areia bem graduada – SW	Fragmentos de pedra, pedregulhos e areias (A-1-b)

Fonte: A autora.

5.2.2 Densidade real e limites de Atterberg

A densidade real obtida para as amostras ensaiadas variou entre 2,68 g/cm³ e 2,48 g/cm³, conforme Tabela 8, apresentando valores próximos aos encontrados por Santos (2020), Nascimento (2019), Portela (2019) e Macedo (2013). Os resultados encontrados para os limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade) estão apresentados na Tabela 9, assim como sua classificação.

Tabela 8 – Densidade real das amostras.

Amostra	Densidade Real (g/cm³)
Solo natural	2,68
SR30	2,61
SR50	2,59

Tabela 8 – Densidade real das amostras. (continuação)

Amostra	Densidade Real (g/cm³)
Resíduo	2,48

Fonte: A autora.

Tabela 9 – Limites de *Atterberg*.

Amostra	LL (%)	LP(%)	IP (%)	Classificação
Solo natural	40,13	21,50	18,63	Altamente plástico
SR30	31,72	21,73	9,99	Medianamente plástico
SR50	28,21	19,69	8,52	Medianamente plástico
Resíduo	-	-	-	-

Fonte: A autora.

5.3 Caracterização mecânica

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes aos ensaios de compactação e de compressão simples para todas as misturas analisadas na pesquisa, formadas por solo, agregado reciclado e fibras de sisal em diferentes teores.

5.3.1 Compactação

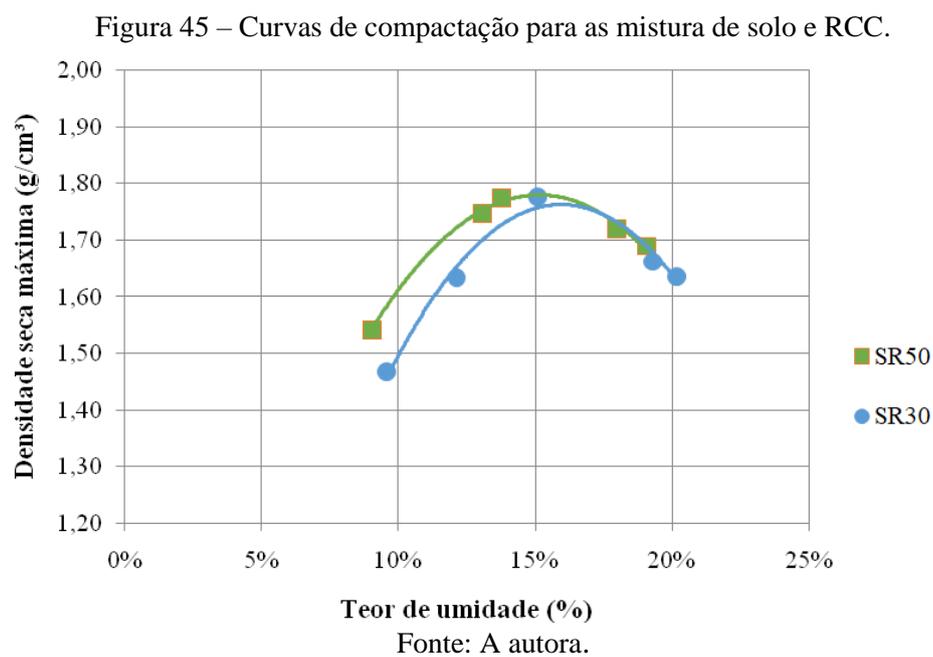
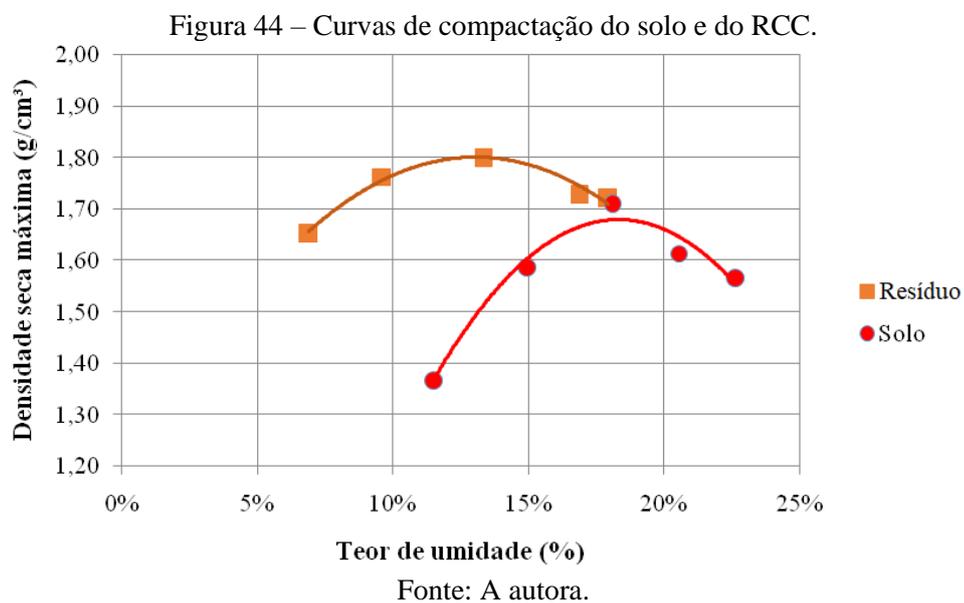
O ensaio de compactação foi realizado segundo as instruções da NBR 7182 (ABNT, 2016), obtendo como resultado a umidade ótima e o peso específico aparente máximo das misturas analisadas.

Segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016), a curva de compactação é obtida a partir de cinco pontos, sendo dois pontos no ramo seco, um ponto próximo a umidade ótima e dois pontos no ramo úmido do gráfico. A Figura 44 mostra as curvas de compactação obtidas nos ensaios para as amostras de solo e agregado reciclado. O solo apresentou umidade ótima de 18,35% e densidade seca máxima de 1,680 g/cm³, enquanto que o agregado apresentou umidade ótima de 13,23% e densidade seca máxima de 1,790 g/cm³.

A Figura 45 apresenta as curvas obtidas para os compósitos formados por solo e agregado reciclado nos teores de 30% e 50% (SR30 e SR50), mostrando uma redução na umidade

ótima de 15,93% para 15,16% após o aumento no percentual de resíduo. A densidade seca máxima apresentou um aumento de 1,763 g/cm³ para 1,780 g/cm³ após o acréscimo de resíduo de 30% para 50%.

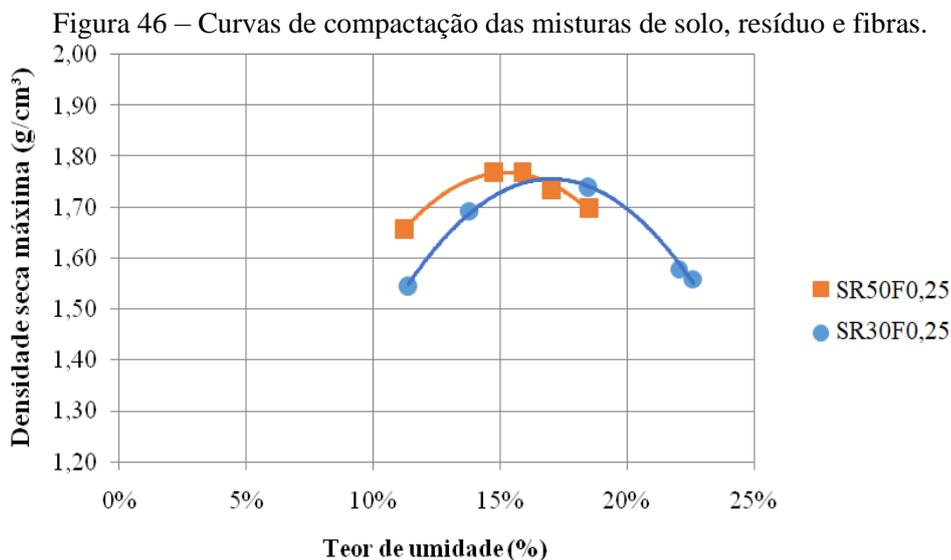
Os resultados apresentados colaboram para a conclusão que a presença de materiais granulares, quando compactados, fornecem maiores pesos específicos e menores umidades ótimas. Dessa forma, é possível obter uma melhor acomodação das partículas, gerando materiais mais compactos, resistentes e duráveis (MACEDO, 2013).

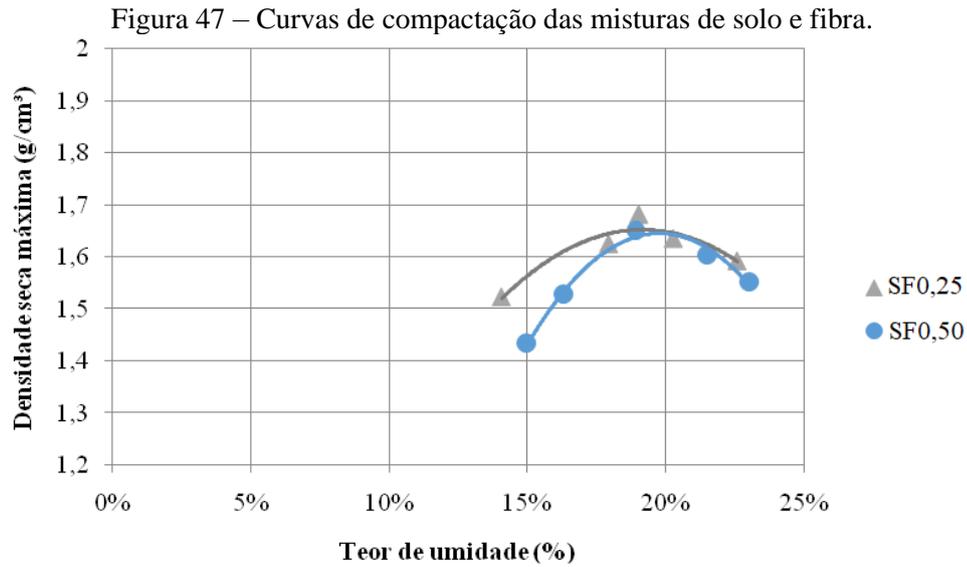


As misturas formadas por solo, agregado reciclado nos teores de 30% e 50% e fibra no teor de 0,25% (SR30F0,25 e SR50F0,25), apresentaram valores de umidade ótima de 17,01% e 15,24% e valores de peso específico de 1,756 g/cm³ e 1,767 g/cm³ (Figura 46), respectivamente. As misturas formadas por solo e fibra nos teores de 0,25% e 0,50% (SF0,25 e SF0,50), mostraram resultados de umidade ótima de 19,16% e 19,78% e valores de densidade seca máxima de 1,653 g/cm³ e 1,645 g/cm³, respectivamente (Figura 47).

É possível observar uma redução na densidade seca máxima e um aumento na umidade ótima do material após o aumento do teor de fibras para as misturas. Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade da fibra em se amontoar no solo, formando conglomerados de solo e fibra, dificultando o processo de homogeneização da mistura e retendo a água no material (LIMA *et al.*, 2016). A redução na densidade máxima do material pode ser explicada pelo menor peso específico apresentado pelas fibras.

A adição de agregado reciclado ao solo aumentou a densidade seca máxima da mistura e reduziu a umidade ótima. Comportamento semelhante pode ser encontrado nos trabalhos de Santos (2020), Silva (2020), Lima *et al.* (2016) e Macedo (2013).





A Tabela 10 abaixo mostra as umidades ótimas e os pesos específicos das curvas obtidas para cada mistura ensaiada.

Tabela 10 – Umidades ótimas e pesos específicos dos materiais.

Materiais	Wot (%)	γ_s (g/cm³)
Solo natural	18,35	1,680
SR30	15,93	1,763
SR50	15,16	1,780
SR30F0,25	17,01	1,756
SR50F0,25	15,24	1,767
SF0,25	19,16	1,653
SF0,50	19,78	1,645
Resíduo	13,23	1,790

Fonte: A autora.

5.3.2 Resistência à Compressão Simples

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foi realizado com o objetivo de obter as curvas de tensão (kPa) x deformação axial (mm), determinando com comportamento médio dos compósitos. Os ensaios de resistência foram realizados para as idades de 7, 28 e 60 dias. Vale ressaltar que a deformação máxima aplicada a todos os corpos de prova (CP) foi de 15 mm. A Tabela 11 apresenta os valores de resistência encontrados com o ensaio de acordo com o período de cura.

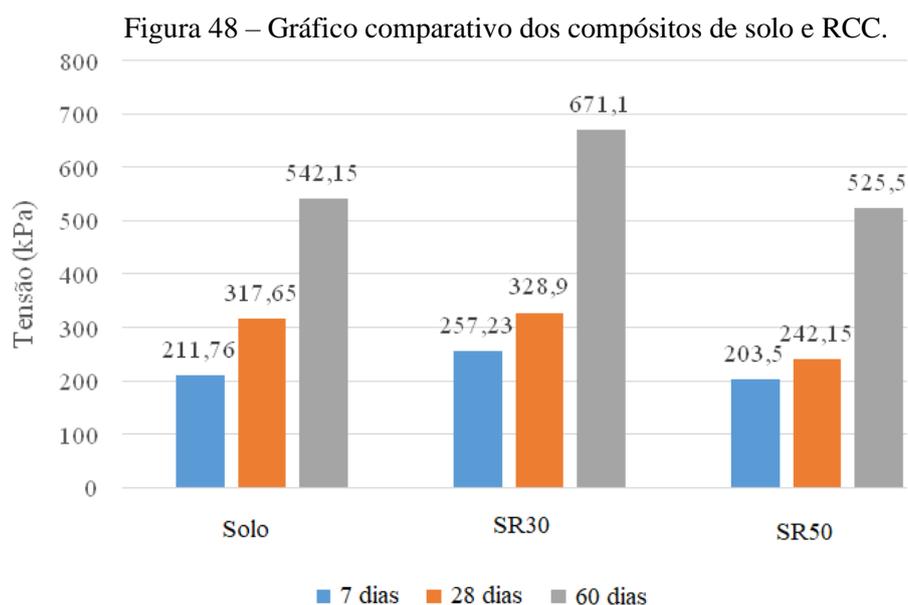
Tabela 11 – Valores de resistência à compressão simples das misturas.

Amostra	7 dias (kPa)	28 dias (kPa)	60 dias (kPa)
Solo	211,76	317,65	542,15
SR30	257,23	328,90	671,10
SR50	203,50	242,15	525,50
SR30F0,25	268,03	342,60	702,35
SR50F0,25	228,75	322,34	578,75
SF0,25	278,22	396,50	724,50
SF0,50	289,15	537,10	860,15

Fonte: A autora.

5.3.2.1 Compósitos de solo-RCC

A Figura 48 mostra o comportamento para os compósitos formados por solo e solo e agregado nos teores de 30% e 50% (SR30 e SR50) de acordo com o tempo de cura de 7, 28 e 60 dias.



Fonte: A autora.

O compósito formado apenas por solo apresentou uma deformação maior antes da ruptura, quando comparado com as misturas de solo e resíduo. A resistência do solo aos 28 dias apresentou um acréscimo de 50% em relação ao solo no período de cura de 7 dias.

Para os períodos de cura de 28 e 60 dias, foi observado um aumento de resistência em todos os compósitos em relação ao tempo de cura de 7 dias, em que a mistura formada por solo e agregado a 30% apresentou um acréscimo de 27,9% e 161% para os períodos de cura de 28 e 60 dias, respectivamente, quando comparadas com as misturas de 7 dias. O compósito formado por solo e agregado com teor de 50% apresentou acréscimo de resistência de 19% e

158% para os períodos de cura de 28 e 60 dias, respectivamente, quando comparadas aos compósitos de 7 dias.

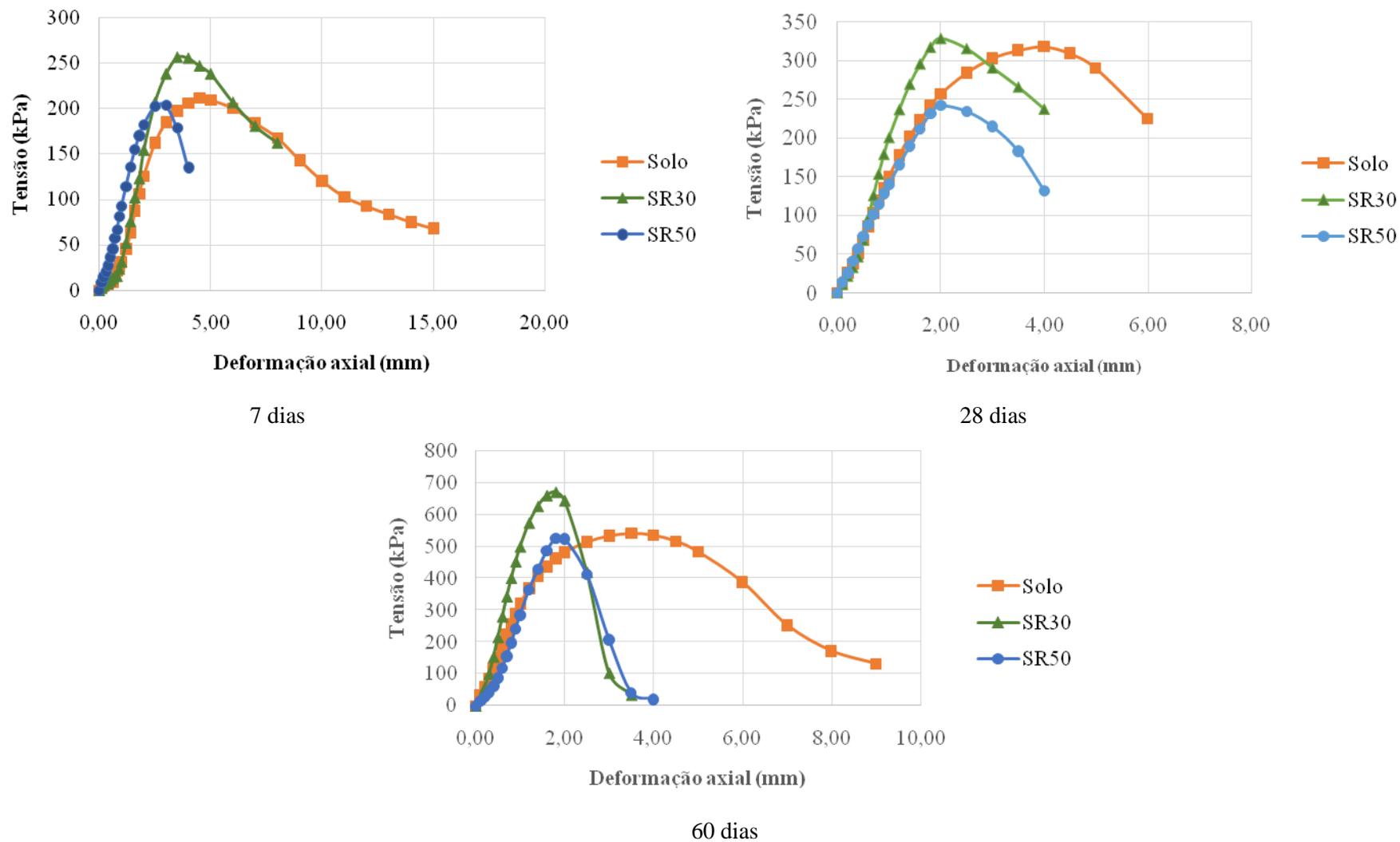
De acordo com Nascimento (2019), o solo é caracterizado como uma pozolana natural, fator que confere ao material aumento de resistência ao longo do tempo. Na incorporação de RCC ao solo, foi observado um aumento de resistência para o teor de 30% em todas as idades estudadas, enquanto que para o teor de 50%, houve redução de resistência para todos os períodos de cura. Em todos os compósitos analisados, o período de cura de 60 dias foi o que apresentou a maior resistência, quando comparado às idades anteriores para o mesmo tipo de mistura.

De acordo com Silva (2020), a incorporação de materiais granulares ao solo permite uma melhor conformação entre as partículas, fazendo com que a matriz estrutural dos materiais adquira maior compacidade, além de permitir a redução da deformação e conferir um comportamento de ruptura frágil. A Figura 49 apresenta as curvas de resistência encontradas para os compósitos de solo e resíduo e seus respectivos períodos de cura.

É possível perceber que todas as misturas apresentaram pontos de pico de tensão aos 7, 28 e 60 dias. Após a incorporação de resíduo, os materiais apresentaram comportamento mais frágil, quando comparadas ao solo natural, o qual apresentou deformação maior antes do rompimento, indicando um comportamento mais dúctil. Para Santos (2020), o aumento no período de cura dos compósitos é recomendado para que a pozolana presente no RCC reaja com a água e permita uma melhor cimentação do material.

Desta maneira, a mistura que apresentou maior resistência foi a composta por agregado no teor de 30% no período de cura de 60 dias (SR30), com resistência de 671,10 kPa, enquanto que a adição de agregado ao solo no teor de 50% reduziu a resistência dos materiais quando comparada ao solo natural.

Figura 49 – Curvas de RCS para as misturas de solo e resíduo.



Fonte: A autora.

5.3.2.2 Compósitos de solo-RCC-fibra

Os valores de Resistência à Compressão Simples (RCS) máxima encontrados para os compósitos com solo, resíduo e fibra apresentaram um crescimento ao longo dos tempos de cura, sendo a mistura de solo, 30% de agregado e 0,25% de fibra (SR30F0,25) a que apresentou a melhor resistência. Na Tabela 12 é apresentado os valores de resistência para as misturas de acordo com o período de cura.

Tabela 12 – Resistência para as misturas de solo, resíduo e fibra.

Amostra	7 dias (kPa)	28 dias (kPa)	60 dias (kPa)
Solo	211,76	317,65	542,15
SR30F0,25	268,03	342,60	702,35
SR50F0,25	228,75	322,34	578,75

Fonte: A autora.

Aos 7 dias de cura, a RCS dos compósitos com agregado e fibra foi superior a resistência do solo natural em 26,60% para a mistura SR30F0,25 e em 8% para a mistura SR50F0,25. Comportamento semelhante pode ser verificado para as misturas com período de cura de 28 e 60 dias, apresentando aumento percentual em relação ao solo natural de 7,90% e 29,60%, respectivamente, para a mistura SR30F0,25, e aumento de 1,50% (28 dias) e 6,80% (60 dias) em relação ao solo natural para a mistura SR50F0,25.

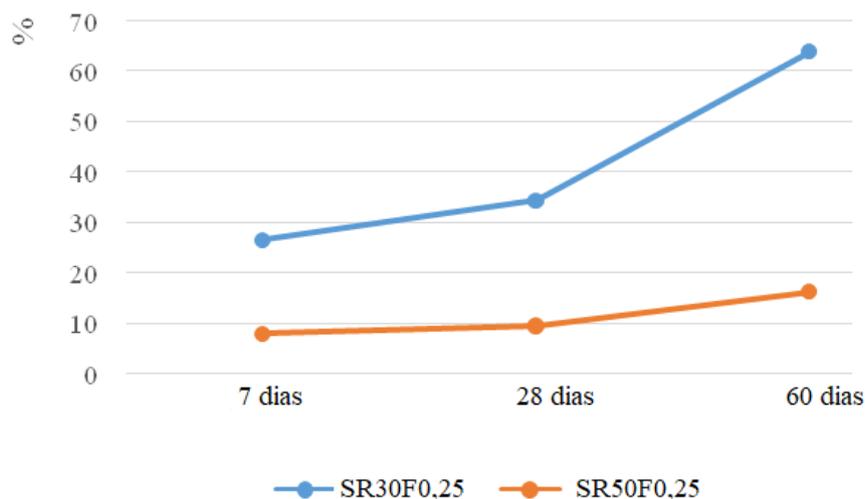
A maior resistência encontrada para os compósitos analisados neste tópico foi de 702,35 kPa referente a mistura de solo, agregado com teor de 30% e fibra com teor de 0,25% (SR30F0,25) aos 60 dias. Essa mistura apresentou acréscimo de resistência de 29,60%, quando comparadas ao solo natural no mesmo tempo de cura. O acréscimo de resíduo nas mistura de solo, resíduo e fibra apresentados acima provocou um decréscimo de resistência.

Para a mistura SR30F0,25, o acréscimo de resistência em relação ao solo para o mesmo tempo de cura de 7, 28 e 60 dias foi de 26,6%, 7,8% e 29,6%, respectivamente. Para a mistura SR50F0,25, o acréscimo de resistência em relação ao solo natural para o mesmo período de cura de 7, 28 e 60 dias foi de 8%, 1,5% e 6,8%. Esses dados podem ser melhor observados na Figura 50.

Os melhores ganhos de resistência correspondem a mistura SR30F0,25, enquanto a mistura SR50F0,25 apresentou menores ganhos de resistência. De uma forma geral, o acréscimo de

fibra ao solo provocou uma melhora do material, quando comparados aos compósitos sem fibra. Resultados semelhantes podem ser encontrados nas pesquisas de Silva (2020), Santos (2020) e Oliveira (2011).

Figura 50 – Crescimento percentual da RCS dos compósitos de solo-RCC-fibra em relação ao solo natural.

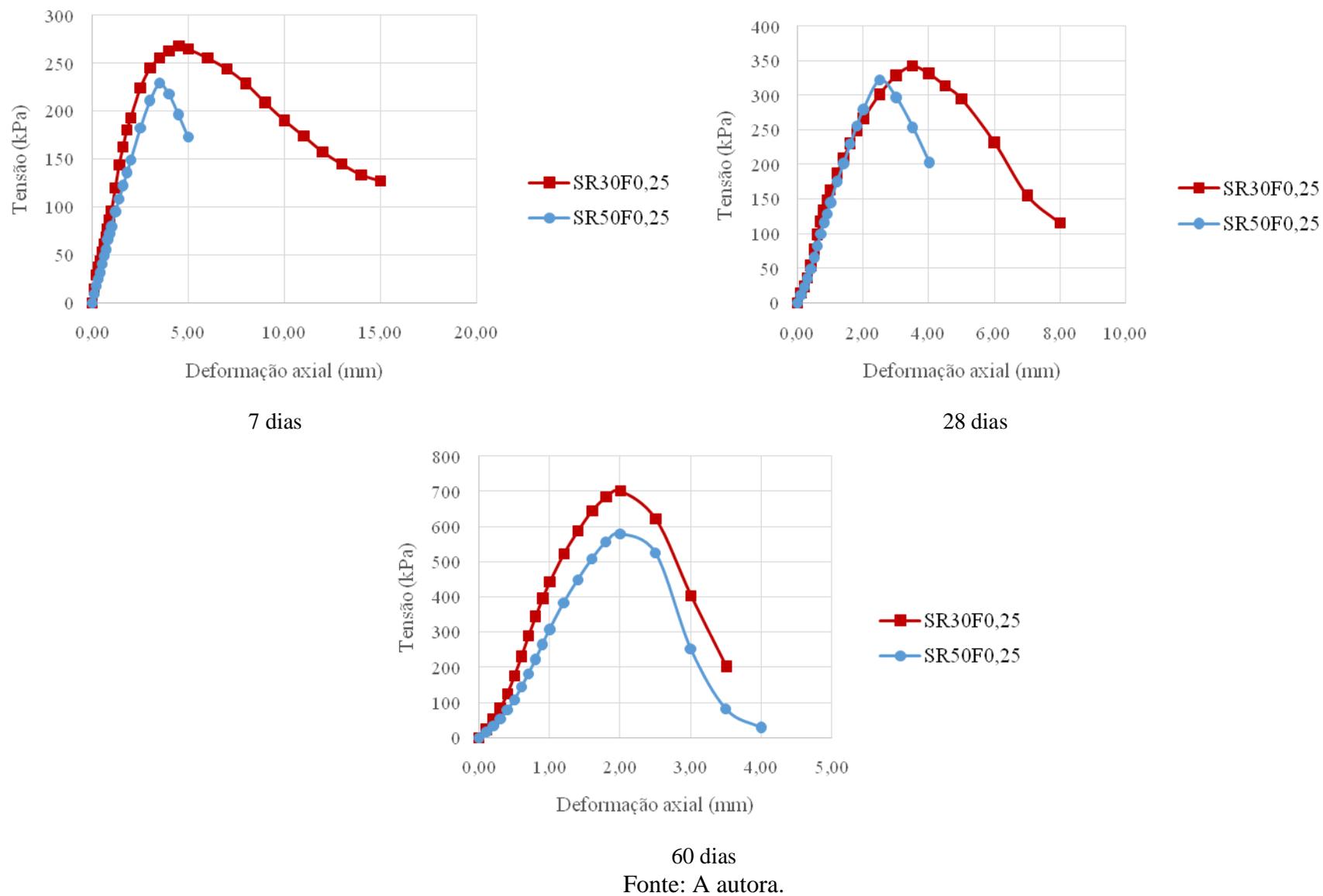


Fonte: A autora.

As curvas de tensão/deformação dos compósitos analisados para cada tempo de cura podem ser analisados na Figura 51. As curvas apresentaram picos de tensão para os períodos de cura estudados. O material com maior percentual de agregado reciclado apresentou uma menor deformação antes da ruptura, indicando um material mais frágil. O acréscimo de fibra proporcionou uma maior ductibilidade aos compósitos quando comparadas com os compósitos sem fibra.

De uma forma geral, o compósito com resíduo a 30% e fibra (SR30F0,25) apresentou um melhor comportamento em relação ao solo natural, às misturas de solo e resíduo e ao compósito SR50F0,25, apresentando maior ganho percentual de resistência no período de cura de 60 dias.

Figura 51 – Curvas de RCS para as misturas de solo-RCC-fibra.



5.3.2.3 Compósitos de solo-fibra

As misturas formadas por solo e fibra apresentaram melhores comportamentos, com Resistências à Compressão Simples maiores que todos os outros compósitos, para todos os períodos de cura analisados. A Tabela 13 revela os valores de resistências obtidos para as misturas de solo e fibra em cada período de cura

Tabela 13 – Resistência para as misturas de solo e fibra.

Amostra	7 dias (kPa)	28 dias (kPa)	60 dias (kPa)
Solo	211,76	317,65	542,15
SF0,25	278,22	396,50	724,50
SF0,50	289,15	537,10	860,15

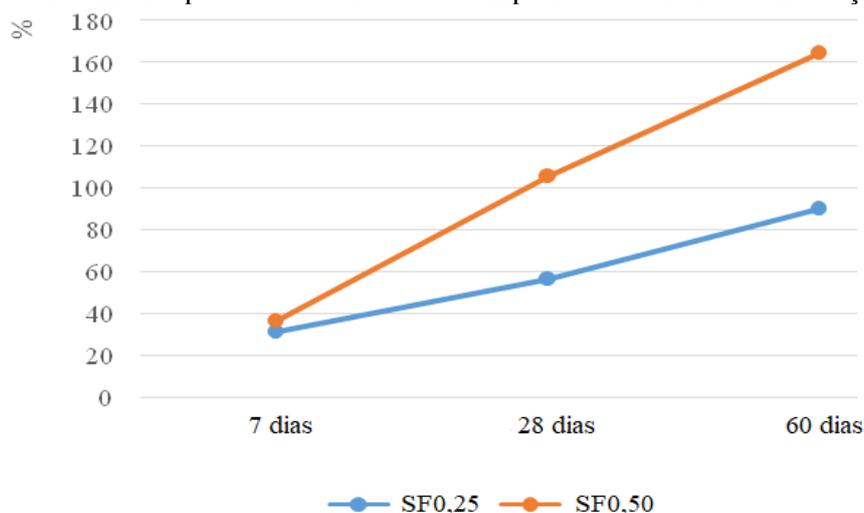
Fonte: A autora.

O compósito formado por solo e fibra a 0,50% foi o que apresentou a maior resistência entre todas as amostras, com o valor de 860,15 kPa aos 60 dias e acréscimo de resistência de 58,70% em relação ao solo natural. A mistura SF0,25 apresentou acréscimo percentual de 31,40%, 25% e 33,60% quando comparadas ao solo natural para os períodos de cura de 7, 28 e 60 dias, respectivamente.

A mistura SF0,50 apontou um incremento percentual na resistência dos materiais de 36,60%, 69,10% e 58,70%, quando comparadas ao solo natural para os períodos de cura de 7, 28 e 60 dias, respectivamente (Figura 52). Diante disso, é possível observar que o acréscimo percentual obtido com a adição de fibras no solo, para todos os períodos de cura, apresentou resultado relevante, o qual pode indicar uma boa alternativa para maximizar as propriedades geotécnicas.

Comparando a resistência dos compósitos SF0,25 e SF0,50, é observado que o percentual de fibras de 0,50% proporcionou um maior aumento de resistência para as idades de 7, 28 e 60 dias, com valores percentuais de 4%, 35,5% e 18,70%, respectivamente. As idades que apresentaram um maior incremento de resistência foram as de 28 e 60 dias.

Figura 52 – Crescimento percentual da RCS dos compósitos de solo-fibra em relação ao solo natural.



Fonte: A autora.

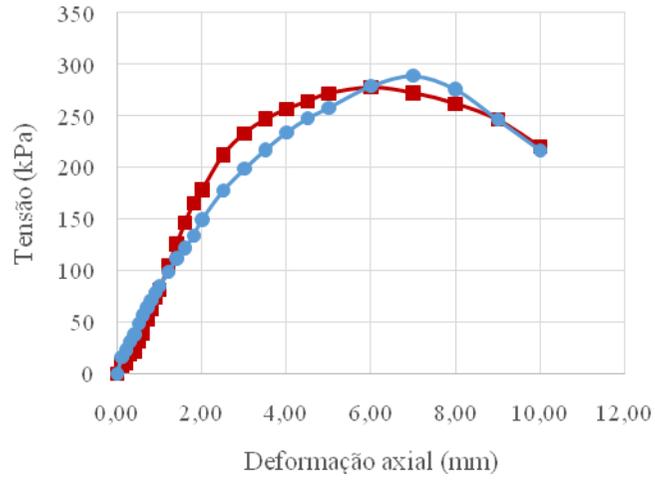
A Figura 53 mostra as curvas de tensão/deformação para as misturas de solo e fibras nas idades estudadas. É possível observar que o acréscimo de fibras no solo permitiu uma maior ductibilidade aos materiais, fazendo com que haja uma maior deformação antes do rompimento. As deformações chegaram na ordem dos 7 mm antes do rompimento.

O comportamento dúctil é mais desejado nos processos de estabilização de encostas, por fornecer uma maior percepção sobre as situações de risco e permitir ações mais efetivas, evitando que desastres naturais atinjam maiores proporções.

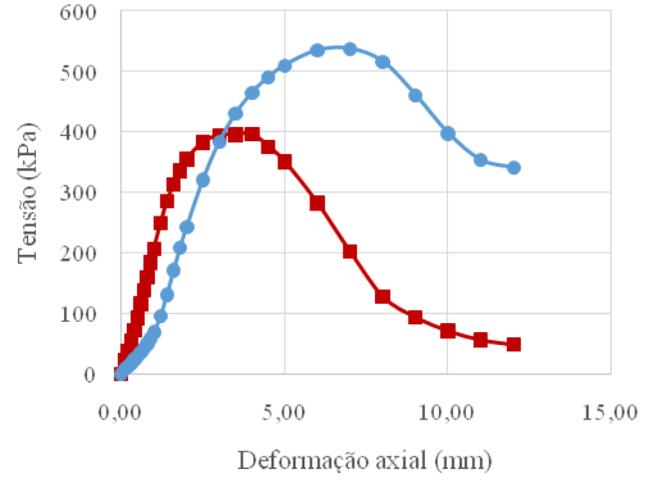
De uma forma geral, o acréscimo de fibras no solo permitiu um aumento de resistência ao longo do tempo, fato que pode ser observado em outros trabalhos como o de Silva (2021), o de Santos (2020) e o de Macedo (2013). As curvas de RCS das misturas apresentaram picos de tensão, e em seguida passaram a reduzir seus valores.

A adição de fibras ao solo, de uma forma geral, forneceu um maior aumento percentual de resistência do que a adição do agregado reciclado, já que a mistura SR50 apresentou redução de resistência quando comparada ao solo natural para os períodos de cura analisados, enquanto que as misturas com fibra apresentaram um acréscimo de resistência em todas as idades.

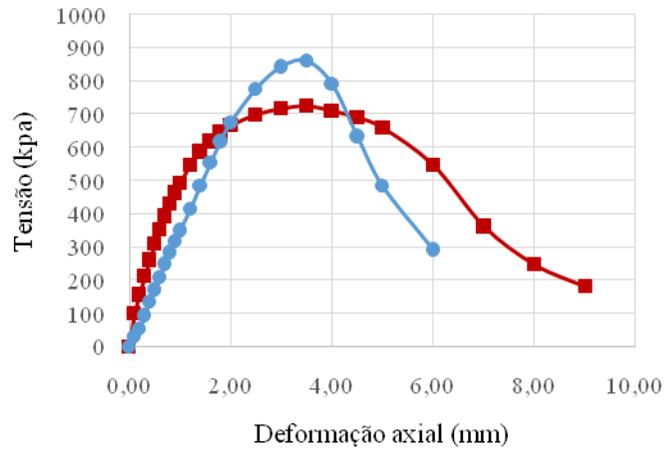
Figura 53 – Curvas de RCS para as misturas de solo-fibra.



7 dias



28 dias



60 dias

Fonte: A autora.

As misturas com solo e fibra foram as que apresentaram as maiores resistências e maiores ductibilidades entre os compósitos analisados. Já o compósito de solo e resíduo a 50% (SR50) foi o que apresentou os menores valores de resistência entre as amostras.

5.4 Caracterização mineralógica e química

Esse tópico irá abordar os resultados da caracterização mineralógica e química, incluindo os ensaios de lupa binocular, difração raio X, fluorescência de raio X e a análise química. Os ensaios foram realizados na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

5.4.1 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica do solo e do agregado reciclado foi realizada por meio da lupa binocular e da difração de raio X (DRX). Foi observado através da lupa a presença de minerais como o feldspato, caulinita, goetita, hematita, ilmenita e quartzo no RCC (Figura 54). Para o solo, foi identificado a presença de minerais como quartzo, goetita, hematita, ilmenita e turmalina (Figura 55).

Figura 54 – Análise mineralógica do RCC com lupa binocular.



Fonte: A autora.

Figura 55 – Análise mineralógica do solo com a lupa binocular.



Fonte: A autora.

O conhecimento das propriedades dos diferentes minerais no solo representa uma ferramenta fundamental para avaliação de processos relacionados ao intemperismo e de processos ligados à evolução do solo, detectando sua influência nas propriedades físicas, químicas e férteis do solo (SOUSA, 2015).

Os feldspatos são classificados como minerais primários, os quais são fontes diretas de nutrição das plantas, e constituem um material de formação do solo, presente na fração de areia. Esses minerais fornecem uma maior resistência aos processos de intemperismo, e representam uma importante fonte de potássio no solo, além de atuarem como materiais formadores da argila (MOTA *et al.*, 2007; SOUSA, 2015).

Um maior teor de quartzo na amostra indica um comportamento mais arenoso do solo (PORTELA, 2019) e pode ser resultante das areias presentes no concreto e na argamassa utilizada no resíduo (NASCIMENTO, 2019). Para Earle (2019), o quartzo representa um material não reativo e bastante resistente ao intemperismo, conferindo uma maior estabilidade à estrutura do solo.

Segundo Sousa (2015), o quartzo é considerado um mineral primário que representa fonte direta de nutrientes para as plantas, além de ser fonte de formação da sílica, a qual favorece o surgimento da caulinita no solo. De acordo com Pereira *et al.* (2020), materiais ricos em SiO_2 , como o quartzo e os feldspatos, são chamados de minerais félsicos, apresentando cor clara e originando os solos de textura arenosa, com baixa fertilidade e amarelados.

Para Nascimento (2019), a caulinita é o principal constituinte do mineral caulim que foi encontrado no agregado reciclado, revelando a presença de materiais cerâmicos no material. A caulinita é um mineral encontrado principalmente na fração argilosa do solo e representa uma importante fonte de potássio para as plantas. Altos teores de caulinita no solo podem indicar que a área sofreu intemperismo (SOUSA, 2015).

Sendo assim, o predomínio da caulinita se dá principalmente em ambientes com clima de altas temperaturas, alta umidade e boa drenagem, favorecendo o intemperismo. A caulinita representa um mineral associado a grandes concentrações de óxidos de ferro e de alumínio, e é considerada um material relativamente estável no solo, com baixa Capacidade de Troca de Cátions (CTC) (PEREIRA *et al.*, 2020).

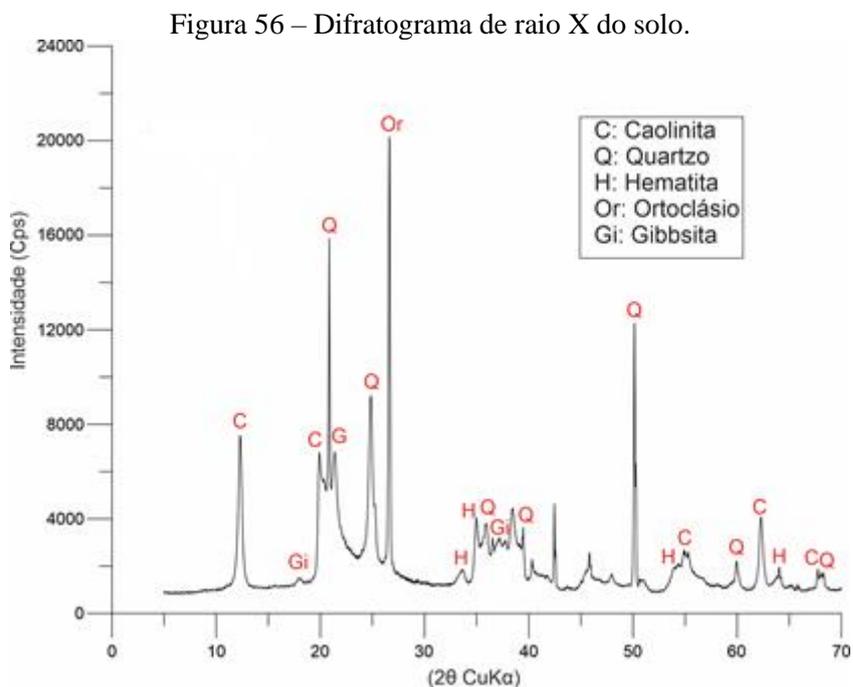
Os minerais goetita e hematita fornecem cores características ao solo, mesmo em pequenas quantidades. A presença de goetita fornece uma cor mais amarelada ao solo, enquanto que a hematita fornece uma cor mais avermelhada. Esses minerais apresentam grande importância no potencial produtivo do solo e nas propriedades físicas e químicas (SINGH *et al.*, 2018).

De acordo com Ratié *et al.* (2019), solos intemperizados são caracterizados pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro, geralmente na forma de goetita e hematita, os quais influenciam diretamente na estabilidade dos solos e na morfologia. A goetita e a hematita apresentam forte ligação com a estruturação e agregação do solo, visto que a presença desses minerais fornecem maior absorção de água, melhor infiltração e controle da erosão (SILVA, 2016).

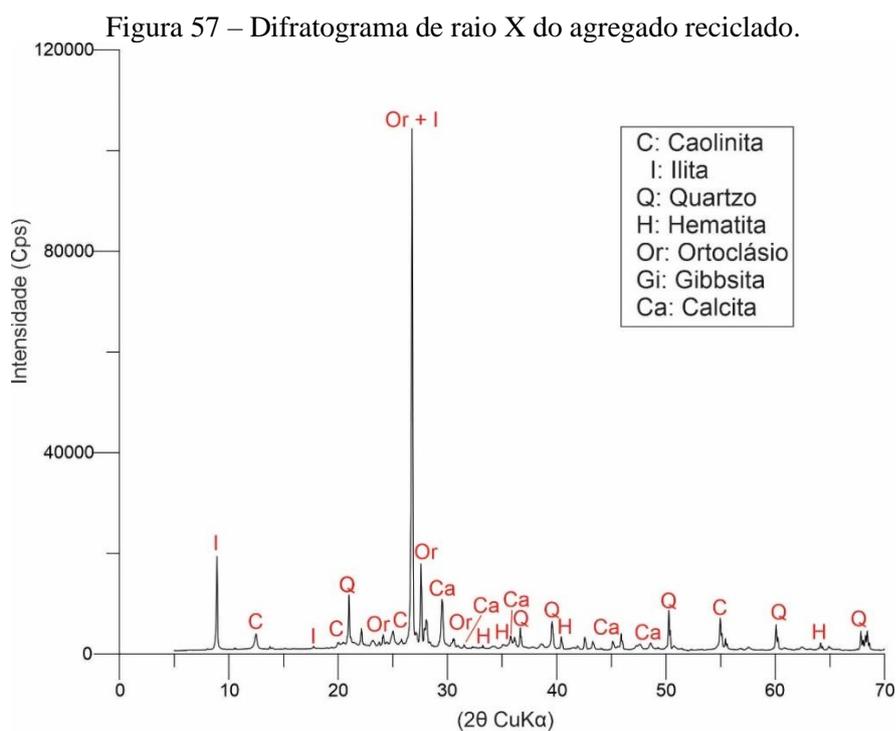
A turmalina faz parte do grupo dos silicatos, apresentando ligações estruturais formadas basicamente por silício e oxigênio, e atualmente é bastante utilizada na indústria (KLEIN; DUTROW, 2012). O mineral ilmenita é normalmente encontrado no solo na fração de silte e areia, e apresenta como uma de suas funções a liberação do íon ferro para o solo quando dissolvidos pela ação do intemperismo (SILVA, 2016).

Na análise mineralógica realizada por difração raio X no solo (Figura 56), foram detectados picos de caulinita, quartzo e ortoclásio, além da presença de minerais como a hematita e a gipsita. Os minerais caulinita e gipsita estão ligados à fração de argila do solo, enquanto que o quartzo e o ortoclásio estão associados a presença de materiais mais arenosos.

O difratograma de raio X encontrado para o agregado revelou a presença de picos de quartzo, caulinita, ilita, ortoclásio, gipsita e calcita. Os maiores picos foram encontrados para os minerais de quartzo, ortoclásio e ilita, seguidos pela presença de caulinita, hematita e gipsita (Figura 57).



Fonte: A autora.



Fonte: A autora.

O mineral gipsita apresenta funções importantes no solo, atuando como: fonte de cálcio, agente corretivo de solos ácidos e fertilizante. A presença desse mineral no solo influencia no aumento da permeabilidade, da aeração, da retenção da água e da drenagem, valendo ressaltar que a gipsita apresenta boa solubilidade (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

A calcita representa um carbonato com alto potencial químico, funcionando como uma fonte de reserva para a fertilidade do solo (SOUSA, 2015). De acordo com Lee, Ng e Tanaka (2013), o aumento da resistência não confinada do solo é proporcional a quantidade de calcita precipitada, a qual também apresenta a propriedade de elevar a alcalinidade do material.

O ortoclásio é classificado como um tipo de feldspato, apresentando íons de potássio ligados fortemente aos tetraedros de silício, fator que torna a solubilização desse material mais difícil (MELFI *et al.*, 2016). A illita é caracterizada como um mineral presente na fração argilosa do solo, conferindo características ligadas à expansibilidade e à plasticidade. De uma forma geral, a illita representa um material com reduzida expansibilidade, principalmente quando comparada às montmorilonitas do solo (CREVELIN, 2018).

5.4.2 Caracterização química

Na Tabela 14 são apresentados os dados relativos à análise química do solo e do agregado reciclado, sendo composto pelo complexo sortivo (cmol/dm^3), soma de bases trocáveis (S) e o percentual de saturação por bases (V%).

Tabela 14 – Dados da análise química para o solo e o agregado.

Amostra	Complexo Sortivo (cmol/dm^3)						Parâmetros		
	Ca	Mg	Al	Na	K	H + Al	S (cmol/dm^3)	CTC (cmol/dm^3)	V(%)
			cmol/dm^3						
Solo	3,8	0,3	0,29	0,15	0,17	2,92	4,42	7,34	61
RCC	13,7	2,7	0	0,95	0,52	0	17,87	17,87	100

Fonte: A autora.

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) é a capacidade do solo em manter esses íons carregados negativamente, e o percentual de saturação (V%) corresponde a proporção da CTC do solo preenchida por bases trocáveis (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A soma de bases trocáveis

corresponde à soma dos teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio, sendo 4,42 o valor S encontrado para o solo.

A CTC é considerada um dos atributos químicos mais importantes para o solo e representa a habilidade que o excesso de carga líquida negativa apresenta em atrair íons carregados positivamente por atração eletrostática (BATISTA *et al.*, 2018). A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) corresponde ao valor S somado com as bases de hidrogênio e alumínio, obtendo um valor de 7,34 cmol/dm³. De acordo com Ferreira *et al.* (2017), valores de CTC inferiores a 27 cmol/dm³ são considerados valores baixos e indicam que o solo não será expansivo.

O percentual de saturação por bases (V%) encontrado para o solo foi de 61%. Ainda segundo Ferreira *et al.* (2017), valores de V% maiores que 50% são considerados altos e caracterizam o solo com uma alta taxa de fertilidade, permitindo seu uso na agricultura.

Os elementos químicos presentes no solo possuem funções específicas e contribuem significativamente para a fertilidade. De acordo com Batista *et al.* (2018), o elemento químico potássio (K) apresenta a função de absorção de água, crescimento vegetal e transporte de nutrientes nas plantas. A quantidade de potássio está ligada ao grau de intemperismo e à rocha que origina o solo. O processo de lixiviação do potássio será mais evidente quando o solo tiver baixa CTC, normalmente em ambientes onde existe uma menor quantidade de argila.

O cálcio representa um elemento químico que atua como agente cimentante, e acontece inicialmente pelo intemperismo do material de origem. Os solos com maiores teores de cálcio apresentam maior CTC e menor grau de intemperização (SIQUEIRA, 2018). O magnésio é um elemento originado pelo intemperismo de minerais primários como a biotita e dolomita (BATISTA *et al.*, 2018).

De uma forma geral, os solos em que predomina a textura argilosa costumam ter maiores teores de magnésio em virtude de uma maior CTC e apresenta maior facilidade de lixiviação. Solos que apresentam um comportamento mais ácido tendem a possuir maior quantidade de alumínio e menores teores de cálcio e magnésio (BATISTA *et al.*, 2018).

A fluorescência de raio X foi realizada para a verificação dos demais componentes na forma de óxidos. Os valores encontrados para o solo estão indicados na Tabela 15. O ensaio de fluorescência de raio X para o solo argiloso mostrou a predominância de óxidos de ferro (Fe_2O_3), óxido de sílica (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3).

De acordo com Bizarreta e Campos (2015), a existência desses óxidos nos materiais pode indicar uma presença significativa de caulinita, a qual é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade. Para Rocha (2018), altos teores de óxidos de ferro e alumínio indicam alto grau de cimentação do solo, influenciando diretamente no ganho de resistência do material.

Sendo assim, a presença de óxidos de ferro no solo está ligada aos fenômenos de agregação e estruturação do solo, já que os mesmos apresentam ação cimentante, podendo proporcionar características relacionadas à permeabilidade da água e à resistência do solo.

O óxido de silício ou sílica apresenta relação com o crescimento e produção das plantas e sua quantidade no solo é diretamente proporcional ao grau de intemperismo sofrido. O acúmulo de silício no solo aumenta o fortalecimento e a rigidez das plantas, fazendo com que as mesmas sejam resistentes a situações adversas. A presença de silício também pode promover a precipitação do alumínio, fator que reduz a toxicidade do solo auxiliando no desenvolvimento de plantas (SANTOS, 2021).

Tabela 15 – Resultado dos principais componentes da fluorescência de raio X.

Elementos	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	MnO	Total
Solo	38,7	0,0	41,1	15,2	0,2	0,5	4,2	0,1	0,0	100

Fonte: A autora.

5.5 Análise estatística

Através dos resultados obtidos com o ensaio de compressão simples, foi realizada a análise estatística com o objetivo de otimizar o processo de produção dos corpos de prova, maximizando sua resistência (WANG; CHENG; TAN, 2018; IPEK *et al.*, 2021).

Inicialmente, foram definidos os parâmetros que mais influenciam no resultado da RCS, apresentando como base a seleção de parâmetros realizada nos estudos de Güllü e Fedakar (2017) e Silva (2021), obtendo como resultado o tempo de cura dos corpos de prova (7, 28 e

60 dias), o teor de agregado adicionado e o teor de fibra de sisal. Na Tabela 16, essas variáveis são apresentadas em conjunto com o intervalo de análise.

Tabela 16 – Intervalo das variáveis de análise selecionadas.

Parâmetro	Intervalo
Teor de RCC	0% a 50%
Teor de fibra de sisal	0% a 0,5%
Tempo de cura	7 a 60 dias

Fonte: A autora.

De acordo com Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), um bom ajuste do modelo estatístico depende da confiabilidade das informações fornecidas, ou seja, a obtenção de resultados com informações ruins e não confiáveis, deixa o modelo distante da realidade, tornando-o inútil. A confiabilidade dos resultados encontrados pode ser obtida através do controle tecnológico, aplicado aos corpos de prova durante a moldagem. Na Tabela 17 são apresentadas as interações experimentais entre as variáveis independentes que foram trabalhadas na análise estatística.

Tabela 17 – Interações entre as variáveis independentes.

RCC (%)	Fibra (%)	Tempo de Cura (TC)		
		07 dias (kPa)	28 dias (kPa)	60 dias (kPa)
0	0	211,76	317,65	542,15
30	0	257,20	328,90	671,10
50	0	203,50	242,15	525,50
30	0,25	268,03	342,60	702,35
50	0,25	228,75	322,34	578,75
0	0,25	278,22	396,50	724,50
0	0,50	289,15	537,10	860,15

Fonte: A autora.

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos com o auxílio do software *Minitab 19 Statistical Software*, para as variáveis independentes lançadas. As interações analisadas pelo software apresentaram boa aderência ao modelo, permitindo que a análise forneça melhores resultados e mais próximos da realidade.

Tabela 18 – Análise das variáveis independentes obtidas pelo software.

Fonte da variação	Graus de liberdade (DF)	Soma dos quadrados ajustada (Adj SS)	Quadrados médios ajustados (Adj MS)	Valor-F	Valor-P (Nível de significância)
Modelo	7	756038	108005	76,93	0
Linear	3	659475	219825	156,58	0
RCC	1	23380	23380	16,65	0,001
FIBRA	1	30020	30020	21,38	0
TC	1	569781	569781	405,86	0
Quadrados	2	25256	12628	9	0,004
RCC*RCC	1	11287	11287	8,04	0,014
TC*TC	1	13969	13969	9,95	0,008
Interação Dupla	2	20685	10343	7,37	0,007
RCC*FIBRA	1	6646	6646	4,73	0,049
FIBRA*TC	1	14039	14039	10	0,007
Erro	13	18250	1404		
Total	20	774288			

R ² (Modelo)	0,976	R ² ajustado (Modelo)	0,964	R ² previsto (Modelo)	0,931
-------------------------	-------	----------------------------------	-------	----------------------------------	-------

Fonte: A autora.

Os valores apresentados na tabela acima (DF, Adj SS, Adj MS e Valor-F) são fundamentais para a determinação do Valor-P (nível de significância), representando as medidas de amplitude de variação e da influência que as variáveis RCC e fibra apresentam para a resistência do material.

Com os resultados obtidos pela análise estatística, foi observado que os teores de RCC, fibra e o tempo de cura (TC) interferem de forma positiva para a funcionalidade do modelo, principalmente as interações encontradas para o TC, em que o TC*TC e fibra*TC apresentaram Valor-P bem abaixo do limite de 0,05, indicando uma boa representatividade da variável.

Segundo Shirazi, Khademalrasoul e Ardebili (2020), estes valores tão baixos encontrados para o Valor-P, significam que a modelagem quadrática é significativa e as variáveis dependentes, TC e fibra, exercem grande influência no comportamento da RCS.

De acordo com DeLoach e Ulbrich (2007), o modelo pode ser considerado adequado quando é analisado em função do R^2 . Nesse caso, a diferença entre R^2 ajustado e R^2 previsto deve ser menor que 20%, condição que é atendida pelo modelo, já que a diferença entre esses valores na análise é de 3,30%. Resultados similares foram observados por Shirazi, Khademalrasoul e Ardebili (2020), que encontraram diferenças da ordem de 1% para R^2 ajustado e R^2 previsto, ilustrando mais uma vez o nível de precisão observado para o modelo.

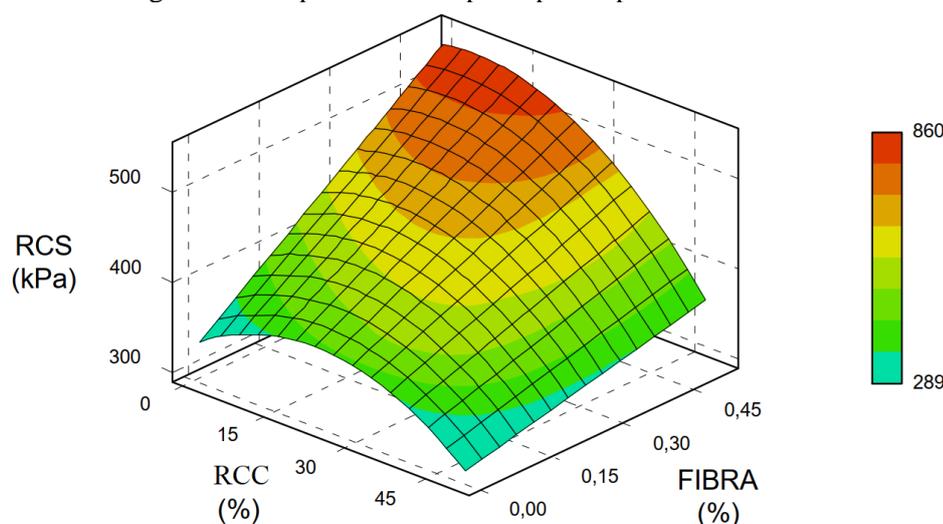
Segundo Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), quanto mais próximo a 1 for o R^2 , maior será a dependência estatística entre as variáveis, sendo assim, o valor de R^2 de 97,60% indica uma forte aderência entre as variáveis ao modelo. Por fim e, com base em todos os parâmetros estatísticos mencionados acima, a otimização dos parâmetros eficazes sobre o melhoramento do solo foi realizada utilizando o modelo quadrático sugerido com o RSM, apresentado na Equação 1.

$$RCS = 209,7 + 3,87 RCC + 179,7 FIBRA + 1,03 TC - 0,0887 RCC*RCC + 0,0820 TC*TC - 5,51 RCC*FIBRA + 6,78 FIBRA*TC \quad \text{eq. (1)}$$

Fonte: A autora.

Desta maneira, é possível traçar o padrão de comportamento da Resistência à Compressão Simples (RCS), por meio de modificações nos percentuais das variáveis independentes (fibra, agregado reciclado e tempo de cura). Tal padrão de comportamento define a superfície de resposta (Figura 58) da variável dependente e é de fundamental importância para melhor definir estratégias de otimização do sistema.

Figura 58 – Superfície de resposta para o presente modelo.



Fonte: A autora.

Através da superfície de resposta, foi reduzido o domínio de soluções possíveis para as variáveis dependentes, com a maior tendência de maximizar o valor da RCS. De maneira a determinar o teor de mistura que formará esse compósito ideal (RCC e fibra) e o referente tempo de cura (TC), foram aplicados vários condicionantes ao modelo, sendo apresentado na Tabela 19 os teores do compósito com a maior média para o intervalo de possíveis resultados da RCS.

Tabela 19 – Valores para otimização da resistência (RCS).

RCC (%)	Fibras (%)	TC (Dias)	RCS (kPa)
16,16	0,50	60	863,30

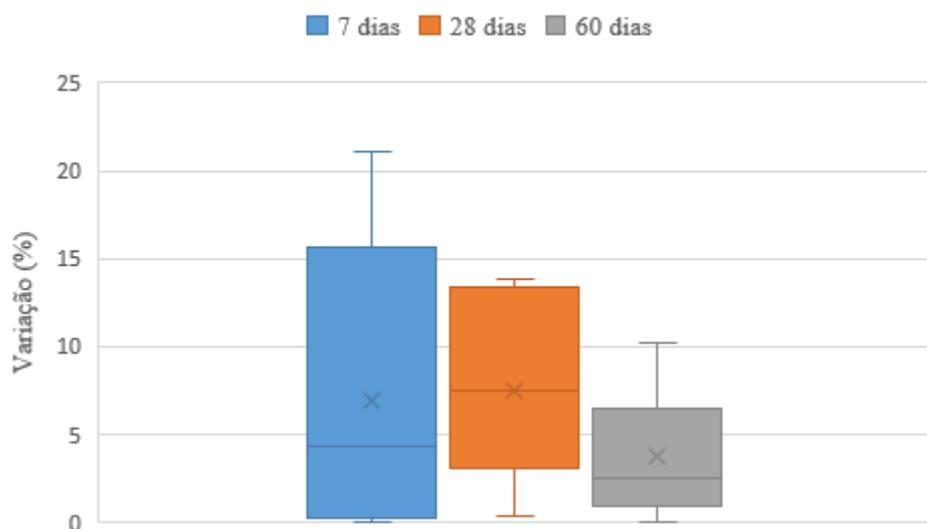
Fonte: A autora.

Como pode ser verificado, os percentuais de fibra e TC, apresentaram valores idênticos ao limite superior do intervalo analisado para cada variável. Sendo assim, existe uma tendência de crescimento da resistência à medida que os percentuais de fibra e o TC são elevados, assemelhando-se a um comportamento de função linear positiva.

Entretanto, o RCC apresentou comportamento diferente, sendo seu valor mais próximo do limite mínimo do seu intervalo, indicando que o seu acréscimo nas misturas eleva a resistência somente até certo ponto. O teor ótimo de resíduo encontrado na pesquisa é de 16,16%, valor para o qual a resistência atinge o ponto de máximo global.

Desta maneira, foi obtido que o intervalo de confiança para o modelo é de 786,30 kPa até 940,30 kPa, ou seja, existe 95% de certeza que o verdadeiro valor da resistência após a otimização se encontra nesse intervalo. A Figura 59 apresenta o box plot para as variações encontradas entre os resultados dos ensaios experimentais e os resultados obtidos com a modelagem estatística para cada compósito, verificando sua adequação à realidade.

Figura 59 – Box plot para as variações entre os resultados experimentais e os da modelagem.



Fonte: A autora.

Os resultados experimentais mostraram um comportamento semelhante aos valores da modelagem estatística, com percentual de variação reduzido. As variações médias foram de 6,90%, 7,45% e 3,72% para os períodos de cura de 7, 28 e 60 dias, respectivamente. Sendo assim, o modelo apresentou boa aderência e desempenho no estudo de estabilização de solos, permitindo a otimização dos materiais para composição das misturas.

6 CONCLUSÃO

Através da análise temporal, foi possível verificar a dinâmica de ocupação espacial da encosta ao longo dos anos, ressaltando a redução drástica da vegetação e o aumento do percentual de mancha urbana, elevando a sobrecarga no terreno. Tais fatores contribuem para a diminuição da resistência do solo, potencializando o risco de deslizamentos.

Com a análise dos impactos que afetam o local através do diagrama de causa e efeito, foi possível identificar que as construções ao longo do talude e a ausência de rede sanitária, apresentaram um alto risco de deslizamento para a área. Já o adensamento populacional e a supressão da cobertura vegetal, apresentaram um risco médio para a ocorrência de deslizamentos no local.

Os processos erosivos no local podem ser percebidos, sendo necessário um estudo mais aprofundado dos impactos ambientais negativos observados na área, envolvendo a medição e o monitoramento desses fatores, principalmente como uma ferramenta de planejamento urbano para tomada correta de decisões, visando a redução da degradação ambiental.

Em relação aos ensaios de caracterização física, o solo apresentou classificação pelo SUCS como uma argila arenosa com baixa plasticidade, enquanto que o agregado reciclado foi classificado como uma areia bem graduada. A relação silte/argila encontrada para o solo foi de 0,25, indicando um maior grau de intemperismo e maior incidência de processos erosivos. A relação silte/argila aumentou com o acréscimo de agregado reciclado nas misturas, indicando uma possível redução dos processos erosivos com a adição do resíduo.

Segundo o TRB, o solo foi classificado como uma argila, apresentando mau comportamento para utilização como subleitos de rodovias. O agregado reciclado foi classificado no grupo A-1-b, correspondendo a fragmentos de pedras, pedregulhos e areias. O agregado reciclado apresentou comportamento de bom a excelente para utilização como materiais de subleitos de rodovias. Dessa forma, a adição de resíduo ao solo melhorou sua classificação, indicando características adequadas para utilização em pavimentação.

Para o ensaio de compactação, foi observado que o acréscimo do teor de fibras aumentou a umidade ótima dos compósitos analisados, enquanto que a densidade seca máxima do material reduziu. A maior umidade ótima foi obtida para a mistura de solo e fibra a 0,50% com valor de 19,78% e a menor umidade ótima foi encontrada para o agregado reciclado com valor de 13,23 %.

Com o ensaio de compressão simples, foi observado que as fibras forneceram um acréscimo de resistência às misturas, inclusive nas misturas formadas por solo, resíduo e fibra, em todos os períodos de cura trabalhados. Os melhores resultados foram obtidos para a mistura de solo e fibra tanto no teor de 0,50% quanto no teor de 0,25%, enquanto que os resultados menos favoráveis foram encontrados para as misturas de solo e resíduo a 50%. O acréscimo de fibras ao solo no teor de 0,50% apresentou acréscimo de resistência de 69,10% e 58,70%, quando comparadas ao solo natural, para os períodos de cura de 28 e 60 dias respectivamente.

Para a análise mineralógica, foi detectada, principalmente, a presença de caulinita, quartzo e ortoclásio para o solo e para o resíduo. O quartzo e o ortoclásio (tipo de feldspato) representam minerais com resistência ao intemperismo, conferindo uma maior estabilidade ao solo. A caulinita é um material que pode ser encontrado em materiais cerâmicos dos Resíduos de Construção Civil (RCC), fruto do intemperismo sofrido pelo solo.

Através da análise química foram encontrados os óxidos mais presentes no solo, sendo eles o óxido de ferro, óxido de alumínio e óxido de silício. Os óxidos de ferro e alumínio apresentam capacidade cimentante, aumentando a resistência do solo. O acúmulo de silício no solo auxilia no processo de resistência das plantas, fazendo com que elas enfrentem situações adversas. Alguns parâmetros também foram encontrados com a análise química como a Capacidade de Troca de Cátions (CTC), que está ligada à expansibilidade do solo, e o V% que está ligado à fertilidade do solo.

A análise estatística permitiu a formulação de um modelo matemático com $R^2 = 97,60\%$, indicando um bom grau de aderência do modelo aos dados fornecidos. A otimização foi atingida com o teor de agregado reciclado de 16,16%, teor de fibra de 0,50% e tempo de cura de 60 dias, fornecendo uma resistência de 863,30 kPa. Esses valores indicam que o aumento de resíduo no solo eleva a resistência somente até certo ponto, a partir do qual o acréscimo de resíduo passa a reduzir a resistência.

Diante do exposto, a técnica empregada na pesquisa apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu uso para estabilização do solo, do ponto de vista técnico e ambiental, elevando a capacidade de carga do solo, e fornecendo uma destinação sustentável para os resíduos produzidos pelo setor da construção civil.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos com a pesquisa, é possível sugerir algumas linhas de investigações futuras para as novas pesquisas na área, como:

- Investigar o desempenho mecânico do compósito obtido através da otimização da análise estatística;
- Analisar a estabilidade do talude;
- Verificar quais as faixas de teores de compósitos, obtidas com a análise estatística, podem ser utilizadas para melhorar as características do solo;
- Analisar a viabilidade financeira para a aplicação do agregado reciclado e das fibras de sisal na encosta em estudo;
- Adicionar à metodologia da pesquisa a investigação dos materiais através do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Verificar o desempenho dos compósitos ao longo do tempo através de ensaios de envelhecimento, analisando o comportamento da fibra natural diante do processo de deterioração.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, P.; GOMES, E.; ROCHA, J.; TEIXEIRA, J. Uso e ocupação do solo no concelho de Lousada: dinâmicas, padrões e futuro provável. **Lucanus**, Lousada, v. 2, p. 94-108, 2018.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Bacias hidrográficas**. Recife, 2021a. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5. Acesso em: 01 nov. 2021.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Monitoramento pluviométrico**. Recife, 2021b. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 186, p. 262–281, 2018.
- ALBUQUERQUE, R. A. **Análise de uma encosta em área de risco no município de Jaboatão dos Guararapes/PE**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.
- AMIRI, H.; AZADI, S.; KARIMAEI, M.; SADEGHI, H.; DABBAGHI, F. Multi-objective optimization of coal waste recycling in concrete using response surface methodology. **Journal of Building Engineering**, v.45, 103472, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103472>.
- ANANDJIWALA, R. D.; JONH, M. Sisal-cultivation, processing and products. *In*: MUSSIG, J. (ed.). **Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications**. 1. ed. Bremen: John Wiley and Sons, 2010. p. 181-195.
- ANGULO, S. C.; TEIXEIRA, C. E.; CASTRO, A. L.; NOGUEIRA, T. P. Resíduos de construção e demolição: validação de métodos de quantificação. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, [Rio de Janeiro], v. 16, n. 3, p. 299-306, 2011.
- ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- APRÍGIO, M. **Forte chuvas deixam rastro de mortes e destruição no Grande Recife**. Recife: JC, 2019. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2019/07/24/chuvas-torrenciais-deixam-mortos-no-grande-recife-383949.php>. Acesso em: 08 ago. 2019.

ARIZA, C. G.; ARAÚJO NETO, M. D. Contribuições da geografia para a avaliação de impactos ambientais em áreas urbanas, com o emprego da metodologia Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR). **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 35, p. 128-139, 2010.

Disponível em:

[https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/24742/1/ARTIGO_ContribuicoesGeografiaAvaliac](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/24742/1/ARTIGO_ContribuicoesGeografiaAvaliac%20ao.pdf) ao.pdf. Acesso em: 25 set. 2020.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Gipsita**. Rochas e Minerais Industriais. CETEM, 2005.

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

BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. Zoneamento climático urbano da cidade do Recife: uma contribuição ao planejamento urbano. **GEOUSP – espaço e tempo**, São Paulo, n. 33, p. 186-197, 2013.

BASHIR, M. K.; NAEEM, M. K.; NIAZI, S. A. K. Rural and peri-urban food security: a case of district Faisalabad of Pakistan. **WASJ**, v. 9, p. 403-411, 2010.

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

BEHLING, A. A. **Fatores condicionantes dos movimentos de massa no município de Agudo/RS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

BEZERRA, J. S. **Análise dos custos de resíduos da construção civil em canteiros de obras em cidades do Nordeste do Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

BIZARRETA, J.; CAMPOS, T. Caracterização geotécnica de um RCD e uma argila visando sua utilização como barreira capilar no ARSU. *In*: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, RS, 2015, p. 1-10.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**: Poder executivo, Seção 1, Brasília, DF, p. 2548-2549, 17 fev. 1986.

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

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

CARNEIRO, F. S.; QUEIROZ, S. R. O. D.; PASSOS, A. R.; NASCIMENTO, M. N.; SANTOS, K. S. Embriogênese somática em *Agave sisalana Perrine*: indução, caracterização anatômica e regeneração. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 3, p. 294-303, 2014.

CARVALHAIS, R. M.; MORAES, N. A.; SILVA, H. F.; BERNARDES, I. M. M. Deslizamento de encostas devido a ocupações irregulares. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 9765-9772, 2019.

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 em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

CHEN, M.; SHEN, S. L.; ARULRAJAH, A.; WU, H. N.; HOU, D. I.; XU, Y. S. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. **Geotextiles and Geomembranes**, [Amsterdã], v. 43, n. 6, p. 515-523, 2015.

CORDON, H. C. F.; CAGNONI, F. C.; FERREIRA, F. F. Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo, Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 22, p. 504-512, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.010>.

CREVELIN, L. G. **Comparação entre os valores de limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para diferentes solos argilosos**. 2018. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

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

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

EARLE, S. **Physical Geology**. 2. ed. Victoria, B.C.: BC campus, 2019.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, [Amsterdã], v. 139, p. 551-561, 2017.

FIDELIS, M. E. A.; PEREIRA, T. V. C.; GOMES, O. F. M.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, [Amsterdã], v. 2, n. 2, p. 149-157, 2013.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., SILVA JÚNIOR. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson. **Revista Política Hoje**, Recife, v.18, n. 1, p. 115-146, 2009.

GARCIA, M. F. S. **Mineralogia de solos e sedimentos do grupo barreiras do litoral norte da Bahia**. 2015. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

GELIS, K.; AKYUREK, E. F. Entropy Generation of diferente panel radiator types: Design of experiments using response surface methodology (RSM). **Journal of Building Engineering**, v. 41, 102369, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102369>.

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

GHAVAMI, K.; TOLÊDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement and Concrete Composites**, [Amsterdã], v. 21, n. 1, p. 39-48, 1999.

GIRÃO, I. R. F.; RABELLO, D. R.; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: riscos socioambientais, vulnerabilidade e suscetibilidade. **Revista de Geociências do Nordeste**, Natal, v. 4, p. 71-83, 2018.

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

- GOTTSCHKE, J.; KELLY, M. Assessing the impact of construction waste reduction on selected projects in Ireland. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Waste and Resource Management**, [s. l.], v. 171, n. 3, p. 71-81, 2018.
- GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: past findings, present trends and future directions. **Materials**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. 553, 2018.
- GÜLLÜ, H.; FEDAKAR, H. I. Response surface methodology for optimization of stabilizer dosage rates of marginal sand stabilized with sludge ash and fiber based on UCS performances. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 5, p. 1717-1727, 2017.
- GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ALGÝN, Z.; MERMERDAS, K. Optimization of concrete mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method. **Composites Part B: Engineering**, v. 60, p. 707-715, 2014.
- HOLANDA, M. J. de O. **Desenvolvimento de Ferramenta de Apoio à Gestão Municipal de Resíduos de Construção e Demolição na Região Metropolitana do Recife**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.
- HOSSEINI, S. M.; SAIFODDIN, A.; SHIRMOHAMMADI, R.; ASLANI, A. Forecasting of CO2 emissions in Iran based on time series and regression analysis. **Energy Reports**, v.5, p.619-631, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades e estados**. Recife. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html?>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de informações ambientais**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- IPEK, S.; GÜNEYISI, E. M.; MERMERDAS, K.; ALGIN, Z. Optimization and modeling of axial strength of concrete-filled double skin steel tubular columns using response surface and neural-network methods. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 103128, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103128>.
- JAN-E-ALAM.; HOSSAIN, I.; UL ISLAM, I.; RANA, M.; PATOWARY, F. Improvement of sub grade soil using nylon fibers. **Journal of Geotechnical Studies**, [s.l.], v. 3, n. 3, p. 18-21, 2018.
- KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Estados Unidos: Bookman, 2012.
- LEE, M. L.; NG, W. S.; TANAKA, Y. Stress-deformation and compressibility responses of bio-mediated residual soils. **Ecological Engineering**, v. 60, p. 142–149, 2013.
- LEOCÁDIO, G. A. S. **Reforço do solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

LI, H.; SENETAKIS, K. Modulus reduction and damping increase of two sands reinforced with polypropylene fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [Washington, D. C.], v. 30, n. 3, p. 04017299-1 – 04017299-9, 2018.

LI, M.; LI, L.; OGBONNAYA, U.; WEN, K.; TIAN, A.; AMINI, F. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [Washington, D. C.], v. 28, n. 4, p. 04015166-1 – 04015166-10, 2016.

LI, X.; QIN, D.; HU, Y.; AHMAD, W.; AHMAD, A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P. A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 2022.
Doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103447>.

LIBERA JUNIOR, V. D. **Laminados de fibra de curauá/epóxi obtidos a partir de pré-impregnados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LIMA, P.; GONÇALVES, H, B, B.; OLIVEIRA, F, H, L.; AGUIAR, M, F, P. **Estudo de Utilização de Fibras de Polipropileno como Reforço em Solo para Pavimentação Rodoviária**. 2016. 45ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, DF.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, 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**. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MÁLIA, M. A. B.; BRITO, J.; PINHEIRO, M. D.; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 241-255, 2013.

MANTOVANI, B. **Mapeamento de risco a movimentos de massa e inundação em áreas urbanas do município de Camaragibe**. 2016. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MELFI, A. J.; MISI, A.; CAMPOS, D. A.; CORDANI, U. G. **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016.

MELLO, P. F. **Influência da face na estabilidade de taludes em solo grampeado**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MENEZES, J. P. C.; BITTENCOURT, R. P.; BELLO, I. P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Lavras, v. 21, n. 31, p. 519-534, 2016.

MOHAMMED, M. S.; ELKADY, H.; ABDEL-GAWWAD, H. A. Utilization of construction and demolition waste and synthetic aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103207>.

MORANDINI, T. L. C.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. **Holos Environment**, [São Paulo], v. 17, n.1, p. 66-78, 2017.

MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; AMARO FILHO, J.; ROMERO, R. E.; MOTA, F. O. B.; LIBARDI, P. L. Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi – RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 445-454, 2007.

MOUSAVI, S. E., KARAMVAND, A. Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, [Beijing], v. 4, p. 412-421, 2017.

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

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

NASCIMENTO, E. C.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, L. C. L.; BEZERRA, J. S.; PORTELA, M. F. A. Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, v. 10, p. e547101019158, 2021.

NASSER, M. D.; JACON, C. P. R. P.; TAVARES, M. B.; KOHORI, C. B.; FERREIRA, J. P. S.; ZONTA, A. Atributos químicos de solos manejados por usina sucroalcooleira situada na Nova Alta Paulista. **Research, Society and Development**, v.10, n. 3, e6510313053, 2021.

NOGUEIRA, F.; PASSARELLI, S. H.; MOURA, R.; VARALLO, L. O emprego da carta geotécnica de aptidão à urbanização: Debate sobre o licenciamento do Centro Logístico Campo Grande, Santo André, SP. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 73741-73762, 2020.

OLIVEIRA, A. L. G.; MAGALHÃES, S. L. M.; FIORESE NETO, O.; PASQUALETTO, A.; BÁRRIOS, G. F. M. Urbanização de risco em frente de escarpa e encostas: caso de Primavera do Leste-MT. **Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional**, Blumenau, MT, v. 2, p. 197-219, 2015.

OLIVEIRA, C. G.; GIUDICE, D. S. Impactos socioambientais em áreas de ocupação espontânea o exemplo de Vila Canária – Salvador-BA. **Revista Tocantinense de Geografia**, Araguaína, v. 6, n. 9, p. 65- 87, 2017.

OLIVEIRA, C. R. **Avaliação de solo-cimento reforçado com fibras do coco de babaçu para produção de tijolo modular ecológico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pará - Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2011.

OLIVEIRA, G. B. S.; BRITO, E. R. A. C.; LIMA, L. A.; SOUSA, L. V.; OLIVEIRA, F. A. Mapeamento da deposição irregular dos resíduos provenientes da construção civil na cidade de Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, PB, v. 11, n. 3, p. 86-90, 2016.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. O; JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H.; GUILHERME, L. C.; FERREIRA, J. A. Influência da adição de fibra de coco (*coco nuciferas*) na compactação e condutividade hidráulica saturada de um solo argiloso. *In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL*, 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: EESC, 2019. p. 307-314.

OLIVEIRA, R. F.; BRAGA, R. M. Q. L. Resíduos da construção civil como alternativa sustentável para a aplicação em aterro sanitário. *In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL*, 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: EESC, 2019. p. 159-164.

OUDA, O. K. M.; PETERSON, H. P.; REHAN, M.; SADEF, Y.; ALGHAZO, J. M.; NIZAMI, A. S. A case study of sustainable construction waste management in Saudi Arabia. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 2541-2555, 2018.

PAZ, D. H. F. **Desenvolvimento de um sistema de apoio ao gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil em canteiros de obras de edificações urbanas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2014.

PAZ, D. H. F.; VIEIRA, C. R.; LAFAYETTE, K. P. V.; SOBRAL, M. C. M. Diagnóstico da geração de Resíduos da Construção Civil de obras da cidade do Recife – PE. *In: SANTOS, J. P. O.; SILVA, R. C. P.; MELLO, D. P.; EL-DEIR, S. G. (org.). Resíduos Sólidos: impactos socioeconômicos e ambientais*. 1. ed. Recife: EDURFPE, 2018. *E-book*.

PEREIRA, A. V.; OLIVEIRA, F. M.; MACHADO, T. G.; MONTEIRO, F. M. Estudo do potencial das fibras de sisal na macrorregião da chapada diamantina-BA para produção de compósitos. *In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal: UFRN, 2016. p. 4482-4495.

PEREIRA, T. T. C.; OLIVEIRA, F. S.; FREITAS, D. F.; DAMASCENO, B. D; DIAS, A. C. A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. **Revista Geonomos**, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/29650>. Acesso em: 9 set. 2021.

PIMENTEL, U. H. O. **Análise da geração de resíduos da construção civil da cidade de João Pessoa/PB**. 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

PINTO, R. B.; FABRÍCIO, E. P.; BRUM, N. D.; KOHLER, F. A. Resíduos da Construção Civil: matéria prima verde a ser investigada. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 1339-1351, 2019.

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 em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

PORTELA, M. F. A.; LAFAYETTE, K. P. V.; NASCIMENTO, E. C.; BEZERRA, J. S.; FERREIRA, S. R. M.; SANTOS, M. J. P. Avaliação da dispersividade e resistência à compressão simples de compósitos de solo, resíduos de construção e demolição e cal hidratada. **Research, Society and Development**, v. 10, p. e42210111959, 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE. **As unidades protegidas do Recife: a cidade do Recife e seu patrimônio ambiental**. Recife: Secretaria de Meio Ambiente, 2012. Disponível em: <http://www2.recife.pe.gov.br/wp-content/uploads/UNIDADES-DE-CONSERVA%C3%87%C3%83O-MUNICIPAIS.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE. **Serviços para o cidadão**. Recife, 2021. Disponível em: <http://www2.recife.pe.gov.br/servicos/cidadao>. Acesso em: 03 nov. 2021.

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

RENATO, L. **Substratos para orquídeas – fibra de coco**. 2013. il. color. Disponível em: <https://www.orquideas.eco.br/substratos-para-orquideas-fibra-de-coco/>. Acesso em: 09 out. 2019.

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

SANTOS, A. R. dos. **Enchentes e deslizamentos: causas e soluções-áreas de risco no Brasil**. São Paulo: Pini, 2012.

SANTOS, D. O. J.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. e11801-e11814, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v22n1/1517-7076-rmat-22-01-e11801.pdf>. Acesso em: 09 out. 2019.

SANTOS, E. O.; FALCÃO, N. A. M.; LIMA, J. V. A. Deslizamento de encostas urbanas: consequências e implicações sociais, ambientais e políticas, em Viçosa/AL, Brasil. **Diversitas Journal**, v. 5, n. 3, p. 1859-1886, 2020.

SANTOS, F. L.; CARNEIRO, A. F.; SOUZA, J. A.; SOUZA, R. M. S. Análise da adesão à agenda ambiental na administração pública (A3P) pela cidade portal da Amazônia. **Revista Eletrônica de Gestão & Sociedade**, Minas Gerais, v. 11, n. 28, p. 1583-1610, 2017. Disponível em: <https://www.gestaoesociedade.org/gestaoesociedade/article/view/2120>. Acesso em: 30 set. 2019.

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

SANTOS, L. C.; SILVA, G. A. M.; ABRANCHES, M. O.; ROCHA, J. L. A.; SILVA, S. T. A.; RIBEIRO, M. D. S.; GOMES, V. R.; SEVERO, P. J. S.; BRILHANTE, C. L.; SOUSA, F. Q. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, e3810716247, 2021.

SANTOS, M. H. S.; MARCHESINI, M. M. P. Logística reversa para a destinação ambientalmente sustentável dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 67-85, 2018.

SANTOS, M. M. A.; BELLO, M. I. M. C. V.; SANTOS, Y. R. P. Dimensionamento de geodrenos para um aterro sobre solo mole, a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométricos e de piezocone. *In: VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos*, 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: EESC, 2019. p. 201-208.

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

SCHLEE, M. B. Notas sobre a ocupação das encostas no maciço da Tijuca, no Rio de Janeiro. **Pós. Revista Do Programa De Pós-Graduação Em Arquitetura e Urbanismo Da FAUUSP**, São Paulo, v. 22, n. 38, p. 94-122, 2015.

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

SHIRAZI, M; KHADEMALRASOUL, A; ARDEBILI, S.M.S. Multi-objective optimization of soil erosion parameters using response surface method (RSM) in the Emamzadeh watershed. **Acta Geophysica**, v. 68, n. 2, p. 505-517, 2020.

SHUI, Z.; YU, R. Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 78, p. 202-207, 2014.

SILVA, A. A. **Diagnóstico da gestão dos resíduos da construção civil no município de Cabo de Santo Agostinho – PE**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

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

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

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

SILVA, W. C.; SANTOS, G. O.; ARAÚJO, W. E. L. Resíduos sólidos da construção civil: caracterização, alternativas de reuso e retorno econômico. **R. gest. Sust. Ambient**, Florianópolis, v. 6, n. 2, p. 286-301, 2017.

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 (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

SILVEIRA, M. V. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de carauá e sisal**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SIMONI, J. H.; ALENCAR, J. L. S.; FIORELLI, M. N.; ANGELIS NETO, G. Gerenciamento de resíduos da construção civil: estudo de caso em usina de reciclagem de Maringá-PR. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Digital**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 568-574, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/16961/pdf>. Acesso em: 30 set. 2019.

SINGH, M.; SARKAR, B.; SARKAR, S.; CHURCHMAN, J.; BOLAN, N.; MANDAL, S.; BEERLING, D. J. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy. In: *Advances in Agronomy*. **Academic Press**, p. 33-84, 2018.

SIQUEIRA, T. P. **Formas de aplicação de fontes de cálcio, magnésio e enxofre no cultivo do milho em condições controladas**. (2018). Dissertação (Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SOOD, M.; DWIVEDI, G. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. **Egyptian journal of petroleum**, [Amsterdã], v. 27, n. 4, p. 775-783, 2017.

SOUSA, C. S. **Caracterização física, química e mineralógica dos solos de encostas sob diferentes sistemas de uso**. 2015. Dissertação (Mestrado em ciência do solo) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2015.

- SOUSA, F. J. **As chuvas e os deslizamentos em encostas e morros**. 2018. il. color. Disponível em: <https://ferdinandodesousa.com/2018/11/12/as-chuvas-e-os-deslizamentos-em-encostas-de-morros/>. Acesso em: 15 set. 2019.
- SOUZA, J. L. **Morfodinâmica e processos superficiais das unidades de relevo da planície do Recife**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- TAM, V. W. Y.; LI, Z.; WANG, J. Identifying best design strategies for construction waste minimization. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 92, p. 237-247, 2015.
- 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**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 3203-3209, 2018.
- TAVARES, N. S. G.; OLIVEIRA, M. V. G.; CORDEIRO, R. B.; CARDOSO, M. F. M. Avaliação dos Impactos Ambientais de uma Indústria de Plástico no Município de Gravatá - PE. In: SANTOS, J. P. O.; SILVA, R. C. P.; MELLO, D. P.; EL-DEIR, S. G. (org.). **Resíduos Sólidos: Impactos Socioeconômicos e Ambientais**. 1. ed. Recife: EDURFPE, 2018. *E-book*.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.
- TORRES, F. S. M.; PFALTZGRAFF, P. A. S. **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. Recife: CPRM, 2014. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16771>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- VALLADARES NETO, J.; SANTOS, C. B. S.; TORRES, E. M.; ESTRELA, C. Boxplot: um recurso gráfico para análise e interpretação de dados quantitativos. **Rev Odontol Bras Central**, v. 26, n. 76, p. 1-6, 2017. Doi: <https://doi.org/10.36065/robrac.v26i76.1132>.
- VELARDO, P.; BOSQUE, I. F. S.; MATÍAS, A.; ROJAS, M. I. S.; MEDINA, C. Properties of concretes bearing mixed recycled aggregate with Polymer-modified surfaces. **Journal of Building Engineering**, v. 38, 102211, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102211>.
- VIEIRA, B. A.; NOGUEIRA, L. Construção civil: crescimento *versus* custos de produção civil. **Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 13, n. 3, p. 366-377, 2018.
- WANG, H.; DEMBSEY, N. A.; MEACHAM, B. J.; LIU, S.; SIMEONI, A. Comparison of sensitivity matrix method, power function-based response surface method, and artificial neural network in the analysis of building fire egress performance. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 102860, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102860>.
- 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**, v. 11, n. 8, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma11081311>.

WU, Y.; XIA, C.; CAI, L.; GARCIA, A. C.; SHI, S. Q. Development of natural fiber reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 184, p. 92-100, 2018.

WU, Z.; YU, A. T. W.; SHEN, L. Investigating the determinants of contractor's construction and demolition waste management behavior in Mainland China. **Waste Management**, [Amsterdã], v. 60, p. 290-300, 2017.

XIMENES, T. C. F. **Diagnóstico da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição e seus impactos ambientais no município de Paulista/PE**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

YARAS, A.; SUTCU, M.; ERDOGMUS, E.; GENCEL, O. Recycling and immobilization of zinc extraction residue in clay-based brick manufacturing. **Journal of Building Engineering**, v. 41, 102421, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102421>.

YU, Y.; BATHURST, R. J. Probabilistic assessment of reinforced soil wall performance using response surface method. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 5, p. 524-542, 2017.

YU, Y.; YANG, X.; LI, K. Effects of the terms and characteristics of cadres on environmental pollution: Evidence from 230 cities in China. **Journal of environmental management**, [Amsterdã], v. 232, p. 179-187, 2019.

YUAN, H. Barriers and countermeasures for managing construction and demolition waste: A case of Shenzhen in China. **Journal of Cleaner Production**, [Amsterdã], v. 157, p. 84–93, 2017.

ZAMPARONI, C. A. G. P. Áreas de risco, mobilidade urbana, vulnerabilidade e o poder público em Cuiabá/MT: porque a população continua vivendo nas áreas de risco do córrego do Barbado?. **Revista Brasileira de Climatologia**, Cuiabá, v. 14, p. 76-96, 2014.