



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

THIAGO AUGUSTO DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE
COMPÓSITOS DE SOLO, RESÍDUOS DE MADEIRA E DE
CONSTRUÇÃO PARA REDUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS**

Recife, PE
2020



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

THIAGO AUGUSTO DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE
COMPÓSITOS DE SOLO, RESÍDUOS DE MADEIRA E DE
CONSTRUÇÃO PARA REDUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS**

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

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Recife, PE
2020

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

S586a Silva, Thiago Augusto da
Análise do comportamento geomecânico de compósitos de solo, resíduos de madeira e de construção para redução de processos erosivos./ Thiago Augusto da Silva. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2020.
105f.: il.

Orientadora: Prof^a. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

1. Estabilização Granulométrica de Solos. 2. Resíduos de Construção e Demolição. 3. Resíduos de Madeira da Construção Civil. I. Engenharia Civil – Dissertação. II. Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690

THIAGO AUGUSTO DA SILVA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE
COMPÓSITOS DE SOLO, RESÍDUOS DE MADEIRA E DE
CONSTRUÇÃO PARA A REDUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

BANCA EXAMINADORA:

Orientador(a)



Prof. Dra. Kaliny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco

Examinadores



Prof. Dra. Simone Rosa da Silva
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Diogo Henrique Fernandes da Paz
Instituto Federal de Pernambuco

Recife-PE
2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha mãe, Givanilda, por ser o meu maior exemplo de coragem, de dedicação e de ética profissional. Obrigado por ter me encorajado desde o início e por me incentivar continuamente.

A meu pai, Ricardo, pelo amor e pelo apoio em todas as etapas mais importantes da minha vida. Sem o seu auxílio, essa e tantas outras “empreitadas” minhas não teriam se concretizado.

Aos meus irmãos, Matheus, Guilherme e Lara, por serem os meus maiores fãs e por depositarem, em mim, tanta confiança.

A Mayara, por ter compreendido os momentos de ausência durante essa fase, sempre me incentivando e apoiando diariamente, nos meus altos e baixos. Essa conquista é nossa.

A minha família, que me deu e tem me dado todo o suporte para poder continuar em busca desse objetivo tão importante em minha vida. Em especial, às minhas avós Anézia e Maria Belmira, que partiram durante a concretização dessa pesquisa e que, com certeza, continuam a zelar pelo meu bem.

A minha orientadora, Professora Dr^a. Kalinny Lafayette, pela disponibilidade e por toda a confiança depositada na minha forma de trabalhar. Agradeço o incentivo e as oportunidades únicas que me conferiu durante todo desenvolvimento da pesquisa, sem medir esforços para que eu chegasse até aqui.

A minha amiga e futura mestre, Michele, pela força nos momentos de dificuldade e por ter dividido comigo tantas experiências ao longo dessa jornada acadêmica. Essa pesquisa é tão minha quanto é sua.

A Fábio, por sua amizade e paciência para me instruir durante os ensaios laboratoriais, e pelos conselhos de vida que, ao longo de nossa convivência, tive o prazer de escutar.

A Gabriela, por sua grande ajuda com o extenso processo de revisão que o texto dessa pesquisa tem demandado. Você não é nove e nem onze, é dez.

Aos professores, Dr^a. Simone Rosa e Dr. Diogo Paz, pela oportunidade de tê-los como examinadores dessa pesquisa e por todas as correções e sugestões engrandecedoras.

RESUMO

O estudo tem por objetivo apresentar a análise do comportamento geomecânico de compósitos de solo, resíduo da construção e demolição (RCD) e resíduos de madeira da construção civil (RMC) para a estabilização do comportamento mecânico de um solo erodível pertencente a uma encosta no município de Itamaracá/PE. A princípio, foi realizada uma análise quantitativa dos níveis de risco ambiental e, em seguida, deu-se início aos ensaios de caracterização física e mecânica, além de análises estatísticas, para os resultados da resistência à compressão simples (RCS). Para tanto, utilizaram-se incorporações, em peso de solo seco, de 0% a 50%, de RCD e 0% a 3,0%, do RMC. Foram observados altos índices de risco ambiental em relação aos processos erosivos e à supressão vegetal, indicando a necessidade de intervenções corretivas, como a estabilização do solo. Na caracterização física, os ensaios de granulometria apresentaram melhoria para as curvas do solo, em relação as inclusões de RCD, e variações leves para o RMC. O RMC causou alterações significativas na curva de compactação, reduzindo a densidade seca máxima e aumentando o teor de umidade ótima nos compósitos. A incorporação de RCD no solo, aumentou a RCS em todos os compósitos em que fez parte. A presença do RMC, proporcionou aumentos consideráveis na RCS, quando incorporado individualmente no solo. O compósito formado por 97% de solo e 3% de RMC (S97M3), proporcionou os melhores resultados frente a RCS, com incrementos, em relação ao solo, de 124,2%, 268,4%, 131,0% e 37,9% para os 7, 28, 60 e 120 dias de cura, respectivamente. A análise estatística recomendou incorporações de 17,62%, de RCD, e 2,61%, de RMC, para otimizar o valor da RCS até 1542,30 kPa (120 dias). Dessa forma, verifica-se que as inclusões de RCD e RMC causaram incrementos na RCS dos compósitos, apresentando resultados mais satisfatórios quando incorporados individualmente.

Palavras-chave: Estabilização granulométrica de solos. Resíduos de construção e demolição. Resíduos de madeira da construção civil.

ABSTRACT

This study aims at presenting the analysis of geomechanical behavior of composites formed by soil, construction and demolition waste (CDW) and construction wood waste (CWW), focusing on the stabilization of erodible soil from a hillside in the city of Itamaracá / PE - Brazil. Environmental risk assessment for the slope and physical and mechanical characterization tests were performed, as well as statistical optimization analyzes, for the results of unconfined compressive strength (UCS). For this purpose, incorporations from 0% to 50% of CDW, and from 0% to 3.0% of CWW, in dry weight of soil, were used. High levels of environmental risk were observed in relation to the erosive processes and forest suppression, indicating the need for corrective interventions, such as soil stabilization. In the physical characterization, the gravimetric tests showed improvement for the soil curves, in relation to the CDW inclusions, and small variations for the CWW incorporations. The CWW caused significant changes to the compaction curves, reducing the maximum dry density and increasing the optimum moisture content. In general, the CDW increased the UCS in all composites in which it has been incorporated. The CWW provided considerable increases in the UCS, when incorporated individually in the soil. The composite formed by 97% of soil and 3% of CWW, provided the best results for the UCS, in relation to the soil's, with increases of 124.2%, 268.4%, 131.0% and 37.9% for 7, 28, 60 and 120 curing days, respectively. The statistical analysis recommended incorporations of 17.62% of RCD and 2.64% of RMC to optimize the value of UCS up to 1505.03 kPa (120 curing days). Thus, it is verified that the CWW and CDW inclusions caused increases in the composites UCS, showing the most satisfactory results when individually included.

Key-words: Gravimetric stabilization of soils. Construction and demolition waste. Construction wood waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – RCD em seu estado primário e não segregado.....	25
Figura 2.2 – Taxas de geração de RCD/ano estimadas na Ásia (a), Américas (b), Europa (c), África e Oceania (d)	27
Figura 2.3 – Composições gravimétricas dos RCD em alguns países	29
Figura 2.4 – Composições gravimétricas dos RCD por tipologia de obra	30
Figura 2.5 – Principais diretrizes da PNRS	32
Figura 2.6 – Mapa da deposição irregular de RCD na RMR	34
Figura 2.7 – Corpos de prova de <i>Pinus elliottii</i> submetidos a processos de termorretificação em corte radial (a) e corte tangencial (b)	39
Figura 2.8 – RMC não contaminado acondicionado corretamente	42
Figura 2.9 – Alternativas de reciclagem para o RMC	43
Figura 3.1 – Desenvolvimento da pesquisa	46
Figura 3.2 – Localização da área de estudo	47
Figura 3.3 – Precipitações médias mensais no período de 2004 a 2019	48
Figura 3.4 – Espécies de manguezal comuns na ilha: mangue vermelho (a) e mangue branco (b)	49
Figura 3.5 – Carta geológica do município da Ilha de Itamaracá	51
Figura 3.6 – Carta dos solos do município da Ilha de Itamaracá	53
Figura 3.7 – Encosta selecionada para o estudo	56
Figura 3.8 – Fibras de serragem de tábuas de <i>Pinus elliottii</i> que formam o RMC	57
Figura 3.9 – Controle tecnológico dos corpos de prova	61
Figura 4.1 – Impactos ambientais decorrentes da erosão (a) e supressão da vegetação (b)	64
Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos materiais	68
Figura 4.3 – Curvas de compactação	73
Figura 4.4 – Comparação da resistência à compressão entre os materiais e os compósitos com RCD	75
Figura 4.5 – Comparação da resistência à compressão entre os compósitos com RCD e RMC	76
Figura 4.6 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de RCD e RMC para 7 dias de cura	77
Figura 4.7 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de RCD e RMC para 28 dias de cura	77
Figura 4.8 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de RCD e RMC para 60 dias de cura	78
Figura 4.9 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de RCD e RMC para 120 dias de cura	78
Figura 4.10 – Ruptura dos corpos de prova dos compósitos S70R27M3 (a) e S50R47M3 (b)	79
Figura 4.11 – Ruptura dos corpos de prova dos compósitos S70R28,5M1,5 (a) e S50R48,5M1,5 (b)	79
Figura 4.12 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de solo e RMC para 7 dias de cura	80
Figura 4.13 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de solo e RMC para 28 dias de cura	81
Figura 4.14 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de solo e RMC para 60 dias de cura	81

Figura 4.15 – Curvas de tensão x deformação axial dos compósitos de solo e RMC para 120 dias de cura 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Técnicas para estabilização de solos	21
Tabela 2.2 – Resumo sistemático de estudos de estabilização de solos (2010-2019)	23
Tabela 2.3 – Classificação dos RCD no Brasil (CONAMA nº 307/2002)	26
Tabela 2.4 – Taxas de geração aproximada de RCD em kg/m ²	28
Tabela 2.5 – Usos da madeira na construção civil	37
Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas <i>Pinus elliottii</i>	40
Tabela 2.7 – Estudos de estabilização com resíduos de madeira	44
Tabela 3.1 – Etapas para implantação do FMEA adaptado	54
Tabela 3.2 – Variáveis de análise	55
Tabela 3.3 – Identificação dos teores dos compósitos	58
Tabela 3.4 – Critérios de aceitação (controle tecnológico)	61
Tabela 4.1 – Análise quantitativa dos riscos ambientais	65
Tabela 4.2 – Percentuais de argila, silte, areia e pedregulho de cada amostra	69
Tabela 4.3 – Classificação SUCS	69
Tabela 4.4 – Densidades reais dos grãos dos materiais e compósitos	70
Tabela 4.5 – Limites de consistência	71
Tabela 4.6 – Parâmetros das curvas de compactação	72
Tabela 4.7 – Resistência à compressão máxima	74
Tabela 4.8 – Efetividade de estabilização dos compósitos (7 e 28 dias de cura)	83
Tabela 4.9 – Efetividade de estabilização dos compósitos (60 e 120 dias de cura)	83
Tabela 4.10 – Variáveis de análise selecionadas	84
Tabela 4.11 – Interações entre as variáveis independentes e de resposta	84
Tabela 4.12 – Análise da variância entre as variáveis independentes	85
Tabela 4.13 – Variáveis de otimização do valor da RCS	86
Tabela 4.14 – Resultados de variação médias entre o modelo e os experimentos	87

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
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BDE	Base de Dados do Estado
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CEE	Conselho Econômico Europeu
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
IP	Índice de Plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IRA	Índice de Risco Ambiental
LACC	Laboratório Avançado de Construção Civil
LCA	Lei de Crimes Ambientais
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
LCA	Lei de Crimes Ambientais
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
PGIRCC	Programa de Gestão Integrada de Resíduos da Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
POLI	Escola Politécnica de Pernambuco
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCS	Resistência à Compressão Simples

RMC	Resíduos de Madeira da Construção Civil
RMR	Região Metropolitana do Recife
RS	Resíduos Sólidos
SINDUSCON	Sindicato da Indústria da Construção
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TC	Tempo de Cura
UE	União Europeia
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USD	Dólares dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	19
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>19</i>
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Estabilização de solos	20
2.2	Resíduos da construção e demolição	24
<i>2.2.1</i>	<i>Caracterização e origem dos RCD</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Legislação dos resíduos sólidos</i>	<i>30</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Impactos ambientais e alternativas sustentáveis para os RCD</i>	<i>33</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Reciclagem dos RCD</i>	<i>35</i>
2.3	Madeira na construção civil	36
<i>2.3.1</i>	<i>Tipologias de madeira frequentes na construção civil</i>	<i>37</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Reaproveitamento e reciclagem dos resíduos de madeira</i>	<i>41</i>
3.	METODOLOGIA	46
3.1	Etapa 01	47
<i>3.1.1</i>	<i>Caracterização da área</i>	<i>47</i>
<i>3.1.1.1</i>	<i>Clima</i>	<i>48</i>
<i>3.1.1.2</i>	<i>Aspectos socioeconômicos</i>	<i>48</i>
<i>3.1.1.3</i>	<i>Vegetação</i>	<i>49</i>
<i>3.1.1.4</i>	<i>Relevo e geologia</i>	<i>50</i>
<i>3.1.1.5</i>	<i>Solos</i>	<i>52</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Determinação dos níveis de susceptibilidade a desastres ambientais</i>	<i>54</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Determinação e coleta de materiais</i>	<i>55</i>
<i>3.1.3.1</i>	<i>Solo</i>	<i>55</i>
<i>3.1.3.2</i>	<i>RCD</i>	<i>56</i>
<i>3.1.3.3</i>	<i>RMC</i>	<i>57</i>
<i>3.1.3.4</i>	<i>Compósitos</i>	<i>58</i>
3.2	Etapa 02 – Programa experimental	58
<i>3.2.1</i>	<i>Caracterização física</i>	<i>58</i>
<i>3.2.1.1</i>	<i>Preparação de amostras</i>	<i>59</i>

3.2.1.2	<i>Granulometria</i>	59
3.2.1.3	<i>Densidade real dos grãos e limites de consistência</i>	59
3.2.2	Caracterização mecânica	60
3.2.2.1	<i>Curva de compactação</i>	60
3.2.2.2	<i>Resistência à compressão simples (RCS)</i>	60
3.2.3	<i>Análise estatística dos resultados da RCS</i>	61
4.	RESULTADOS	64
4.1	Susceptibilidade a riscos ambientais (FMEA)	64
4.1.1	<i>Processos erosivos e supressão vegetal</i>	66
4.1.2	<i>Urbanização irregular, poluição do meio natural e redução da biodiversidade ...</i>	67
4.2	Granulometria	68
4.3	Densidade real dos grãos e limites de consistência	70
4.4	Compactação	72
4.5	Resistência à compressão simples	74
4.6	Análise estatística (RCS)	84
5.	CONCLUSÕES	89
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das mais importantes no que diz respeito ao crescimento de um país. Nos países em desenvolvimento, essa relevância é mais evidente devido à capacidade que empreendimentos nessa área possuem de absorver mão-de-obra pouco qualificada, que geralmente representa a maior fatia de sua força trabalhadora. O caso do Brasil não é diferente, pois, mesmo com a redução de 9,30% apresentada em 2018 para o Produto Interno Bruto (PIB), esse mercado ainda representou 3,9% do PIB para o mesmo ano (CBIC, 2019).

Devido ao papel de destaque na economia que essa indústria possui, a demanda pelo seu crescimento é demasiada, algo que pode gerar implicações negativas nos meios urbano e natural. Essa exigência acarreta a forma como a construção civil alimenta sua cadeia produtiva, que geralmente é orientada à exploração desenfreada dos recursos naturais, sendo responsável pelo consumo de cerca de 40% a 75% de toda a matéria-prima do mundo (GASQUES, 2015).

Conseqüentemente, esse consumo pouco racional dos recursos naturais vem provocando sua escassez e gerando resíduos. Os principais impactos ao ambiente são decorrentes das deposições irregulares desses Resíduos da Construção e Demolição (RCD) e causam problemas que vão da impermeabilização e/ou contaminação do solo à precarização de sistemas de drenagem, poluição de aquíferos e elevação dos custos energéticos atrelados ao seu processamento (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013).

No atual panorama, a produção anual de RCD atingiu 3 bilhões de toneladas ao redor do mundo (AKHTAR; SARMAH, 2018). No Brasil, estima-se que a geração seja de 70 milhões de toneladas por ano (PAZ; LAFAYETTE, 2016). A fim de minimizar os efeitos devastadores dos RCD ao meio ambiente, entidades governamentais ao redor do mundo estão implementando programas que visam ao gerenciamento adequado desses resíduos e firmando diretrizes para estimular o desenvolvimento nos âmbitos ambiental e econômico (OLIVEIRA NETO; CORREIA, 2019).

Os países que têm investido em gestão, processamento correto e reciclagem dos RCD têm apresentado ótimos resultados no setor econômico, como, por exemplo, os EUA, que é um dos maiores geradores de RCD do mundo. Gerando cerca de 500 milhões de toneladas de resíduos por ano, o país já movimentou, com o mercado da reciclagem, cerca de 7 bilhões de dólares americanos (USD) na sua economia (AKHTAR; SARMAH, 2018).

Ainda segundo Akhtar e Sarmah (2018), apesar desses resultados positivos, as taxas de reciclagem dos RCD variam de 7% a 90% ao redor do mundo, com a grande maioria dos países destinando seus resíduos para aterros sanitários. O material resultante do processo de reciclagem pode ter muitas aplicações dentro da construção civil, podendo ser usado tanto como matéria-prima na elaboração de materiais geossintéticos quanto na aplicação direta como agregados reciclados (SIVAKUMAR; VASUDEVAN, 2008).

Dentre as variadas soluções da engenharia que fazem uso massivo dos RCD, uma que remonta aos primórdios da engenharia geotécnica é o melhoramento de características geotécnicas do solo. Esse processo é feito por meio da formação de compósitos de solo e resíduo que possuam características adequadas conforme seu uso final e critérios técnicos vigentes (JAYANTHI; SINGH, 2016).

As técnicas que visam à estabilização, processo de melhoramento do comportamento dos solos, estão sendo cada vez mais aplicadas na indústria. Isso se deve, em grande parte, à reduzida disponibilidade de locais com solos que suportem as solicitações de carga, progressivamente mais exigentes, das estruturas atuais, como também ao acelerado avanço da urbanização (SHARMA, 2017; SUDHAKARAN; SHARMA; KOLATHAYAR, 2018).

Os solos considerados passíveis de estabilização tendem a apresentar características deficientes do ponto de vista construtivo, como baixa capacidade de carga, alto grau de permeabilidade e/ou baixa resistência ao cisalhamento. Esses comportamentos podem se associar, de maneira genérica, aos solos moles, expansivos, erosivos e/ou colapsíveis, entre outros aspectos. (RAHGOZAR; SABERIAN; LI, 2018).

Dentro desse grupo de solos que apresentam comportamento inadequado do ponto de vista construtivo, destacam-se os solos erosivos. A erodibilidade de um solo irá depender de fatores como baixos níveis de coesão e deflocação espontânea de seus grãos, quando na presença de água (BANDEIRA, 2003; PEREIRA; OLIVEIRA, 2018). Obras como barragens e canais são as mais afetadas por problemas dessa natureza (SAMANIEGO, 2015; PORTELA, 2019).

No decorrer das últimas décadas, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de investigar e viabilizar, a utilização de vários tipos de material para estabilização dos solos, com os RCD possuindo destaque nesse quesito (ARAÚJO JR, 2010; PROENÇA, 2012; FUCALE; PROENÇA, 2014; SANTOS NETO, 2015; SHARMA; HYMAVATHI, 2016, PORTELA, 2019; NASCIMENTO, 2019).

Além dos RCD mais comuns (concreto e cerâmica vermelha), outros materiais, de matriz sustentável, também têm atuado na formação de compósitos com solo, como os resíduos de polipropileno, borracha de pneu e madeira, entre outros. (MACEDO; LIMA; LAFAYETTE, 2014; MACEDO, 2016; MACEDO; FUCALE; FERREIRA, 2016; SILVA, 2018).

A madeira é um dos exemplos de material que vem ganhando foco em estudos da área (DIAS; COELHO; DIAS, 2016; SANTOS, 2009; BOUHICHA; AOUISSI; KENAI, 2005), pois, por ser considerada uma fonte renovável de matéria-prima, seu uso é difundido em larga escala em vários setores da indústria.

No setor da construção civil, sua aplicação recebe grande destaque, principalmente em países desenvolvidos, como EUA, Canadá e alguns países da Europa. Nessas regiões, o uso da madeira é difundido de maneira tradicional na indústria de construção moderna, podendo ser utilizada em praticamente todos os sistemas construtivos, o que causa a geração de um grande volume de resíduos do material (SANTOS, 2009).

Ainda segundo Santos (2009), no Brasil, o reaproveitamento do resíduo de madeira ainda é muito discreto, o que se deve, em parte, ao baixo custo atrelado ao material e ao montante gerado, que, apesar de elevado, é bastante inferior se comparado a outros tipos de RCD em função das metodologias construtivas mais utilizadas no país: estruturas aporcadas de concreto e metálicas.

Portanto, viabilizar técnicas de reuso e reciclagem dos RCD é de extrema importância, principalmente em atividades como estabilização dos solos, pois elas propiciarão a implantação de obras de construção em terrenos previamente sem valor construtivo (sem capacidade de carga, comportamento erosivo, etc.), além de ser uma maneira rápida e pouco onerosa de destinação para os resíduos (GHOSH; GHOSH, 2016).

1.1. Justificativa

A relevância de caracterizar o comportamento do solo passa por aspectos importantes que vão desde o estudo de técnicas e métodos de diagnóstico até a estabilização de seus parâmetros. Tais processos podem ter implicação tanto no aspecto econômico, viabilizando o solo em questão para fins de engenharia, quanto no aspecto socioambiental, pois empreendimentos executados de maneira sustentável garantem a segurança dos usuários e a preservação do meio ambiente (LAFAYETTE, 2006; PEREIRA; OLIVEIRA, 2018).

De acordo com a Base de Dados do Estado (BDE, 2018), um dos municípios mais importantes do litoral norte de Pernambuco é a Ilha de Itamaracá, devido ao seu potencial turístico e paisagístico, aspectos que tornam a localidade um dos destinos mais procurados em toda a Região Metropolitana do Recife (RMR), durante a alta estação. No entanto, a região é afetada pela presença de diversas tipologias de solo, passíveis de estabilização, como, por exemplo, solos erosivos e solos dispersivos.

A área de estudo está situada em uma região da ilha formada por encostas que vêm sofrendo com a constante supressão da vegetação local, situação agravada pela ação de processos erosivos, demandando estudos de diagnóstico dos riscos ambientais, assim como de estabilização de solo.

O diagnóstico foi feito para identificar os níveis de risco ambiental atrelados às intervenções antrópicas na área de estudo, assim como os efeitos decorrentes de eventos naturais (chuva, natureza do solo, etc.). Esse processo serviu como norteador para o desenvolvimento do estudo de estabilização do solo na área de estudo.

A estabilização ocorreu com o intuito de tornar o solo apto às solicitações geomecânicas (deformações, deslocamentos, etc.), que atuam ou são impostas a ele, seja por imposições de origem natural ou antrópica (GOULART *et al.*, 2016).

Nesse contexto sustentável, a aplicação de materiais como os RCD se destaca, uma vez que encontra uma destinação sustentável para tais resíduos, visto que, no Brasil, boa parte das cidades não possui aterros sanitários. Ademais, o processo também estimula o crescimento econômico do setor, com a sua reinserção na cadeia produtiva, na forma de agregado reciclado para a estabilização granulométrica do solo (FUCALE; PROENÇA, 2014; AKHTAR; SARMAH, 2018).

Os agregados reciclados de RCD utilizados como agentes da estabilização dos solos geralmente são compostos por elementos como concreto e materiais cerâmicos. Ainda assim, outros materiais que compõem os RCD, como plásticos e madeiras, também têm ganhado bastante destaque (DIAS; COELHO; DIAS, 2016).

Dentro desse contexto, o desenvolvimento de estudos que abordem o diagnóstico dos riscos ambientais e a estabilização geomecânica de compósitos de solos com materiais alternativos, como os RCD e o Resíduo de Madeira da Construção Civil (RMC), ganham importância à

medida que procuram resolver um problema de engenharia bastante recorrente em regiões de encosta, além de reutilizar materiais que seriam descartáveis.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Diagnosticar os níveis de risco ambiental de uma encosta do município de Itamaracá/PE, analisando o comportamento geomecânico de um solo erodível estabilizado com incorporação de RCD e fibras de serragem do Resíduo de Madeira da Construção Civil (RMC).

1.2.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar quantitativamente os níveis de risco ambiental na área de estudo;
- Apresentar as propriedades físicas e mecânicas do solo, dos RCD e dos compósitos de solo-RCD-RMC nas diferentes proporções de mistura;
- Verificar a influência que os diferentes teores de RCD e de RMC possuem na resistência à compressão simples do solo;
- Identificar mecânica e estatisticamente o teor de compósito mais adequado para a estabilização mecânica do solo.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas temáticas e informações relevantes sobre estabilização de solos, resíduos da construção e demolição e resíduos de madeira da construção. Os tópicos abordarão a caracterização dos materiais, a legislação, os fatores de impacto ambiental e a interferência deles na área de estudo.

2.1. Estabilização de solos

Na construção civil, o principal motivador de desenvolvimento é o fator econômico, pois, apesar de se tratar de uma indústria historicamente conservadora, ela se encontra em uma constante busca por maneiras menos onerosas de solucionar problemas construtivos. Isso é facilmente verificado nas atividades que utilizam materiais mais baratos, até a implantação de metodologias que visam a reduzir o consumo de materiais nos canteiros de obra (HUANG *et al.*, 2017).

Essas motivações para o desenvolvimento econômico muitas vezes irão ao encontro do desenvolvimento socioambiental, influenciando de forma sustentável todas as atividades do setor (XUE *et al.*, 2018). A geotecnia se destaca nesse quesito, pois possui uma alta capacidade de agregar estas frentes de crescimento devido à proporção das obras do ramo.

Segundo Jayanthi e Singh (2016), dentre as várias atividades que se destacam sustentavelmente na geotecnia, as obras de estabilização das características geotécnicas do solo são as principais.

O melhoramento de um solo que, previamente, não teria condições de uso para a construção é um ganho enorme para sociedade, já que, devido ao crescimento acelerado da população nas últimas décadas e à escassez de terrenos com boas condições construtivas nos grandes centros urbanos, essa revalidação do terreno é imprescindível para o setor (RAHGOZAR; SABERIAN; LI, 2018).

A estabilização do solo nem sempre terá caráter definitivo, podendo se tratar de uma solução temporária, como a execução de obras para finalidades temporárias, ou seja, uma medida não estrutural. Esse tipo de procedimento não garantiria o reforço para a implantação definitiva de um empreendimento, que seria o caso de soluções sem adição de materiais (CARMO, 2015; PORTELA, 2019).

Quando feita em caráter definitivo, a estabilização garante o efeito do reforço de forma durável, se executada corretamente. Esse é o caso de soluções que buscam a incorporação de materiais na matriz do solo, como, por exemplo, a criação de compósitos com outros materiais (PORTELA, 2019).

Segundo Bordignon *et al.* (2016), a estabilização do solo na prática acontece por meio da prévia correção dos parâmetros geotécnicos necessários para o tipo de empreendimento que se deseja construir no local, podendo ser feitas correções na granulometria, plasticidade e coesão. Muitas vezes, a correção dessas características resulta em ganhos na resistência e/ou permeabilidade.

A estabilização do solo se constitui em três tipos de técnicas básicas, como descritas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Técnicas para estabilização dos solos.

Técnicas	Descrição
Físicas	Consistem na correção da curva granulométrica de um dado solo por meio de misturas com outros materiais e/ou solos, como cinzas volantes e de fundo, RCD, fibras naturais e sintéticas, etc. Também pode ser denominada <i>estabilização granulométrica</i> .
Mecânicas	Consistem na aplicação de esforços e/ou desmonte da estrutura física do solo a partir de técnicas como aplicação de pré-carga, remoção e substituição de uma camada de solo frágil, colunas de pedra, etc.
Químicas	Buscam a alteração de características do solo por meio de reações químicas, com a adição de substâncias ou componentes químicos como, por exemplo, cal hidratada e virgem, cloreto de cálcio, etc.

Fonte: Adaptado de Portela (2019).

As primeiras intervenções que aconteceram no solo, com o intuito de melhorar suas características geotécnicas, envolviam basicamente a mistura do solo umedecido com algum tipo de fibra natural e galhos de árvores, com o objetivo de melhorar a resistência à compressão do material compósito resultante (HEJAZI *et al.*, 2011; NICHOLSON, 2015).

Técnicas como essas, que alteravam de maneira física a estrutura dos solos, foram procedimentos que, de certa forma, deram origem às metodologias de estabilização como são conhecidas atualmente. As primeiras versões ditas “modernas” de melhoramento dos solos foram desenvolvidas no início dos anos 60, com a construção de paredes autoportantes de solo reforçado com aço galvanizado (NICHOLSON, 2015).

Já os procedimentos atuais utilizam materiais mais resistentes. Entretanto, ainda empregam muitos dos conceitos fundamentais que foram aprimorados com o avanço da tecnologia. A princípio, as inclusões de materiais alternativos no solo tinham como foco a melhoria da

capacidade de carga, algo que foi se diversificando à medida que os estudos da área foram se desenvolvendo (SABERIAN; KHABIRI, 2016).

No geral, a estabilização física ou melhoramento simples do solo é um processo realizado por meio da alteração de sua composição granulométrica, que ocorre por meio da adição de outros solos e/ou materiais (inertes ou não) à matriz estrutural, garantindo uma curva com as características desejadas para determinada aplicação na indústria (JAYANTHI; SINGH, 2016).

Para que a estabilização física seja considerada eficiente além dos parâmetros de avaliação especificados por normas, como a ASTM D4609/08 (ASTM, 2008), é preciso garantir condições ideais para natureza das partículas (que devem possuir valores de resistência adequados para a vida útil do projeto) e para densidade ótima (de modo que garanta o melhor arranjo das partículas e, por consequência, a distribuição uniforme dos esforços) (ARRIVABENI, 2017; MENGUE *et al.*, 2018; PORTELA, 2019).

Nos últimos anos, várias pesquisas foram publicadas para aliar a busca por soluções menos onerosas e ambientalmente sustentáveis, como é o caso da estabilização de solos com o uso de materiais provenientes de resíduos sólidos. A viabilização desse tipo de material para obras de estabilização de solos é de extrema importância, uma vez que fornece mais ferramentas para engenharia a baixo custo e com alta disponibilidade.

Nesse contexto, a utilização dos resíduos de construção e demolição (RCD) tem sido cada vez mais frequente em pesquisas e obras de engenharia. Segundo Portela (2019), por serem inertes e com comportamento similar ao do agregado natural, a aplicação dos RCD se mostra bastante viável. Os formados à base de concreto são os mais utilizados para tais fins porque, além de possuírem alta resistência à compressão, são gerados em maior proporção (AKHTAR; SARMAH, 2018).

A Tabela 2.2 apresenta estudos de estabilização desenvolvidos nos últimos dez anos que buscaram a melhoria da resistência à compressão simples do solo. Todos os estudos fizeram uso de materiais alternativos, sendo a grande maioria proveniente de resíduos sólidos.

Tabela 2.2 – Resumo sistemático de estudos de estabilização de solos (2010 – 2019).

Estudos	Local do Estudo	Tipo de Solo	Material Adicionado	Teores de Mistura (%)	Melhoria da Resistência à Compressão (%)
Anwar Hossain (2010)	Hong Kong	Areia silto-argilosa	Cinza de Casca de Arroz Cinzas de Cimento	0 – 20 0 – 20	4795
Horpibulsuk, Phetchuay e Chinkulkijniwat (2012)	Tailândia	Argila siltosa	Resíduo de Carboneto de Cálcio	0 – 10	540
Mirzababaei <i>et al.</i> (2012)	Reino Unido	Argila do Nordeste do Reino Unido	Fibras de Fragmento de Tapete Sintético	0 – 5	106
	Reino Unido	Argila arenosa	Fibras do Processo de Corte de Tapete Sintético	0 – 5	37
Muntohar <i>et al.</i> (2013)	Indonésia	Silte argilo-arenoso	Cinza de Casca de Arroz Cal Fibra de Polipropileno	0 – 12 0 – 12 0 – 1,2	831
Kampala e Horpibulsuk (2013)	Tailândia	Argila siltosa	Resíduo de Carboneto de Cálcio	0 – 30	200
Macedo, Lima e Lafayette (2014)	Brasil	Areia argilosa	RCD Fibra de Polipropileno Cimento Portland	0 – 50 0 – 0,75 0 – 2	28,89
Sharma e Hymavathi (2016)	Índia	Areia silto-argilosa	RCD	0 – 24	320
Sharma (2017)	Índia	Argila	Fibra de Polipropileno Cinzas de Cimento	0 – 0,4 0 – 24	1238
Jaiswal e Lal (2017)	Índia	Argila	Cinza de Casca de Arroz Casca de Alho	0 – 5 0 – 6	250
Latifi <i>et al.</i> (2018)	EUA	Bentonita	Resíduo de Carboneto de Cálcio	0 – 15	362
	EUA	Caulinita	Resíduo de Carboneto de Cálcio	0 – 15	283
Rahgozar, Saberian e Li (2018)	Irã	Argila silto-arenosa	Cinza de Casca de Arroz Cimento Portland	0 – 8 0 – 8	2444
Menezes (2018)	Brasil	Areia argilosa	Fibra da Casca do Coco Verde	0 – 1	44
Nascimento (2019)	Brasil	Argila arenosa	RCD	0 – 50	447
Portela (2019)	Brasil	Areia Dispersiva	RCD Cal	0 – 60 0 – 7	245

Verificou-se que os estudos que fizeram uso de materiais mais grosseiros (RCD e Resíduo de Carboneto de Cálcio) tenderam a apresentar teores de misturas mais elevados, o que pode ter ocorrido tanto em função da disponibilidade do material a baixo custo quanto da natureza do solo, que poderia requerer um tratamento de estabilização mais intenso (LATIFI *et al.*, 2018).

Em relação aos materiais mais sofisticados ou que não apresentam volume disponível tão elevado quanto os RCD, como é caso das fibras naturais (Casca do Coco Verde e Casca de Alho) e sintéticas (Tapete Sintético e Polipropileno), os teores de mistura tendem a ser menores.

Esses compósitos são, muitas vezes, formados com algum material de natureza aglomerante, como o cimento, ou que possua presença de pozolana (MIRZABABAEI *et al.*, 2012; MUNTOHAR *et al.*, 2013).

2.2. Resíduos da Construção e Demolição

A denominação *resíduo de construção e demolição* veio em substituição ao termo *resíduo da construção civil* (RCC), que foi apresentado em 5 de julho de 2002 na Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) com a seguinte definição:

São os 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.01).

Essa mudança de designações para o termos RCD vem sendo adotada, cada vez mais frequentemente, para designar, de forma geral, esses resíduos formados nas atividades desempenhadas na construção civil. Desse modo, são incorporados os resíduos gerados nos processos que envolvem as demolições. De forma sintetizada, tem-se que toda e qualquer sobra ou resíduo proveniente de atividades desempenhadas pela indústria da construção civil, como reparos, demolição e manutenção de edificações, estruturas, estradas e escavações, pode ser denominado como resíduo de construção e demolição (RCD) (GHOSH; GHOSH, 2016).

As parcelas dos RCD provenientes das atividades de construção direta advém principalmente de má gestão dos materiais construtivos no canteiro (transporte, recebimento e acondicionamento), de processos produtivos ineficientes (mão de obra desqualificada, levando ao consumo indiscriminado de materiais) e de obras de escavação e fundações (ROTH; GARCIA, 2009; MACEDO, 2013).

De acordo com Moraes (2006), frações dos RCD que resultam do processo de demolição independem da qualidade do procedimento construtivo, sendo determinados fundamentalmente pelas suas características de origem, ou seja, da edificação que alcançou o fim do seu ciclo de vida. Observada a conceituação e os processos que podem gerar o RCD, é possível inferir que a sua composição é de constituição bastante heterogênea e depende diretamente da atividade geradora, como mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – RCD em seu estado primário e não segregado.



Fonte: Autor.

É comum que cada país ou grupo de países tenha sua própria forma de subdividir os RCD. Contudo, apesar das localidades distintas, essas classificações têm como ponto de partida parâmetros bastante semelhantes. De acordo com Veras (2012), elas geralmente são feitas com base em critérios como composição gravimétrica, origem do material, destinação final, velocidade de degradação e/ou nível de periculosidade que os resíduos podem apresentar ao meio ambiente e à saúde pública.

Ainda que as referências de categorização sejam parecidas, os métodos tendem a variar de país para país. Pode-se estabelecer um comparativo com a Espanha, por exemplo, que é um país desenvolvido da Europa. Em território espanhol, a classificação de todo e qualquer tipo de resíduo sólido é feita conforme dois parâmetros: a origem e o nível de periculosidade. Lá, os RCD são apenas uma das categorias possíveis no tocante à origem. (LLATAS, 2013).

Já no Brasil, a classificação dos resíduos sólidos é bastante estratificada, com várias subdivisões que variam de acordo com a origem, o grau de periculosidade e o tipo de material, por exemplo. De acordo com a Resolução nº 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002), os RCD podem ser categorizados nas classes indicadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação dos RCD no Brasil (CONAMA nº 307/2002).

Classe	Descrição	Exemplos
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis na forma de agregado	Construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação além de solos de provenientes de terraplenagem
		Construção, demolição, reformas e reparos de edificações: materiais cerâmicos (blocos, telhas, etc.), argamassa e concreto.
		Processo de fabricação e demolição de peças pré-moldadas de concreto (blocos, tubos, etc.) produzidas no próprio canteiro.
B	Resíduos recicláveis utilizados para outras funções	Materiais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeira, gesso e outros.
C	Resíduo de construção e demolição em que não existe tecnologia viável economicamente para reciclagem	Qualquer material não reciclável que não se enquadre na Classe D.
D	Resíduos perigosos com capacidade de causar riscos à saúde e ao meio ambiente	Materiais como tintas, solventes, primers de impermeabilização, RCD de outras classes (A, B e C) contaminados, etc.

Fonte: Adaptado de Brasil (2002).

No Brasil, a classe de RCD que representa a maior parcela de todo montante que é produzido no país é a A, que responde por mais de 90% dos RCD gerados pelo setor. Já em relação às tipologias de serviços construtivos, as atividades que mais contribuem para a geração de RCD são os processos de demolição e renovação, que atinge aproximadamente 60% do total que é produzido no ano (AKHTAR; SARMAH, 2018).

2.2.1. Caracterização e origem do RCD

A fim de visualizar de forma concisa a constituição física dos RCD, é preciso entender os processos e etapas que os originam. Apesar de não ser possível precisar com exatidão uma composição conceitual dos RCD, em razão de a sua matriz ser bastante heterogênea e depender de vários fatores (sistema construtivo e eficiência produtiva da mão de obra, materiais da construção, economia, etc.), é possível determinar valores médios aproximados.

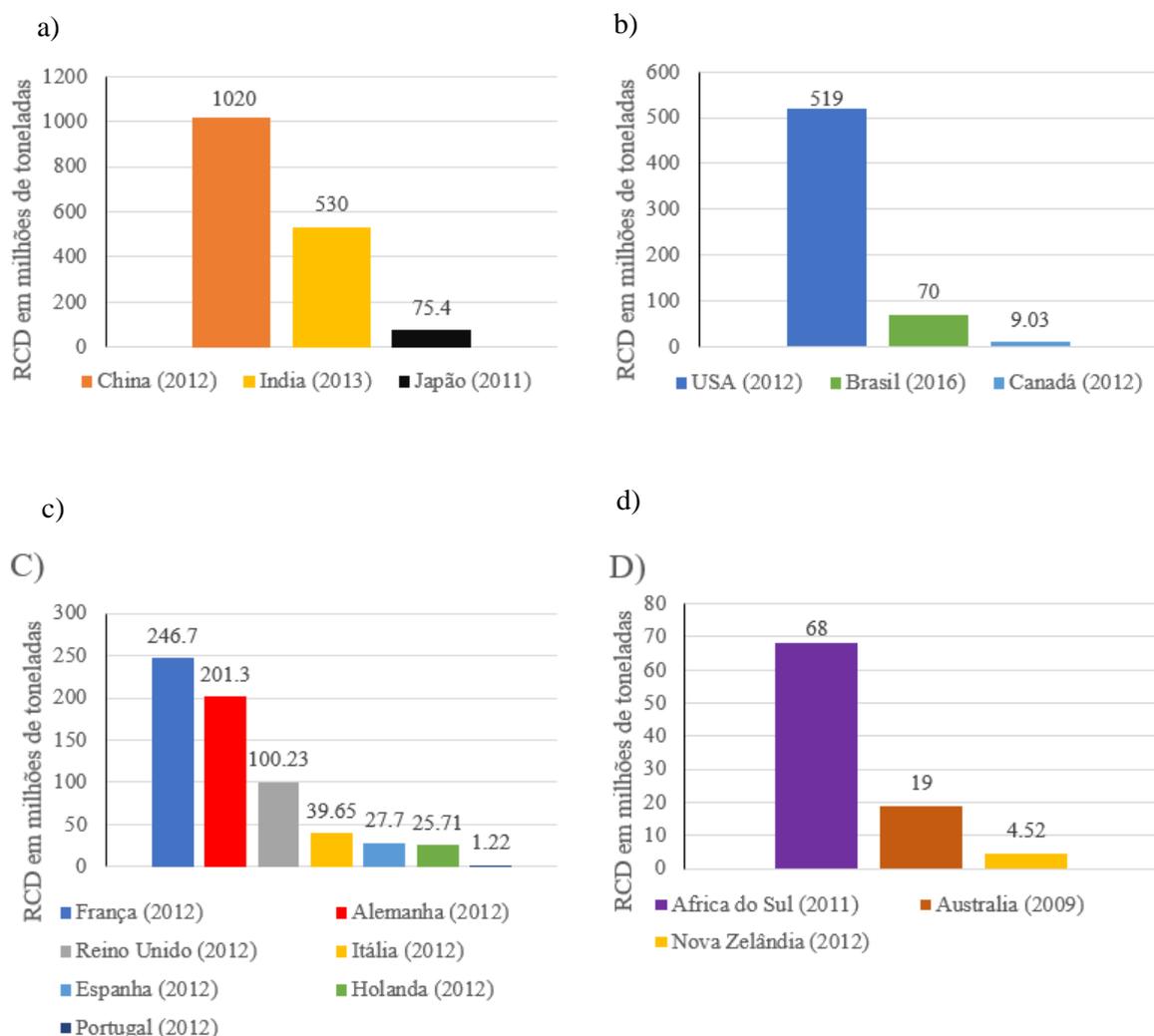
Esses aspectos para a geração dos RCD também sofrem grande influência do local onde estão sendo desenvolvidos. Essa interferência pode ser identificada como:

- Materiais da construção: que variam de acordo com a matéria-prima que serviu de base para sua concepção e muitas vezes seu uso está ligado a disponibilidade do mesmo no país ou região do empreendimento (RODRÍGUES-ROBLES *et al.*, 2015).

- Método produtivo: que mudará bastante de país para país em questão de padronização, mão de obra treinada e principalmente tecnologias disponíveis para a execução do empreendimento (YEHEYIS *et al.*, 2013).
- Situação Econômica: esse fator tem grande influência no desenvolvimento de novas atividades do setor, ou seja, quanto melhor a situação econômica do país maior a quantidade de empreendimentos da construção civil e vice-versa, principalmente em países em desenvolvimento onde o setor responde por grande parcela do PIB (YEHEYIS *et al.*, 2013).

Essa premissa pode ser facilmente observada no caso de empreendimentos executados em estrutura metálica e de concreto, uma vez que se tratam de tipologias de produção completamente diferentes. A Figura 2.2 mostra as taxas de geração de RCD de alguns países.

Figura 2.2 – Taxas de geração de RCD/ano estimadas na Ásia (a), Américas (b), Europa (c), África e Oceania (d).



Fonte: Adaptado de Akhtar e Sarmah (2018).

As estimativas de geração apresentadas na Figura 2.2 conseguem fornecer uma visão geral de como o mercado da construção tem caminhado de forma inadequada. É possível notar que as taxas variam muito e que, mesmo se tratando de países do mesmo continente, essa diferença está ligada às metodologias construtivas, aos materiais e também à situação econômica.

Quando se faz uma análise mais específica, ou seja, quando há a tentativa de conectar a taxa de geração de RCD pelo tipo de obra e empreendimento, pode-se determinar as atividades de maior impacto. Llatas (2013) analisou as taxas de geração de RCD em função do tipo de construção, da natureza do serviço e da finalidade, como indicado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Taxas de geração aproximada de RCD em kg/m².

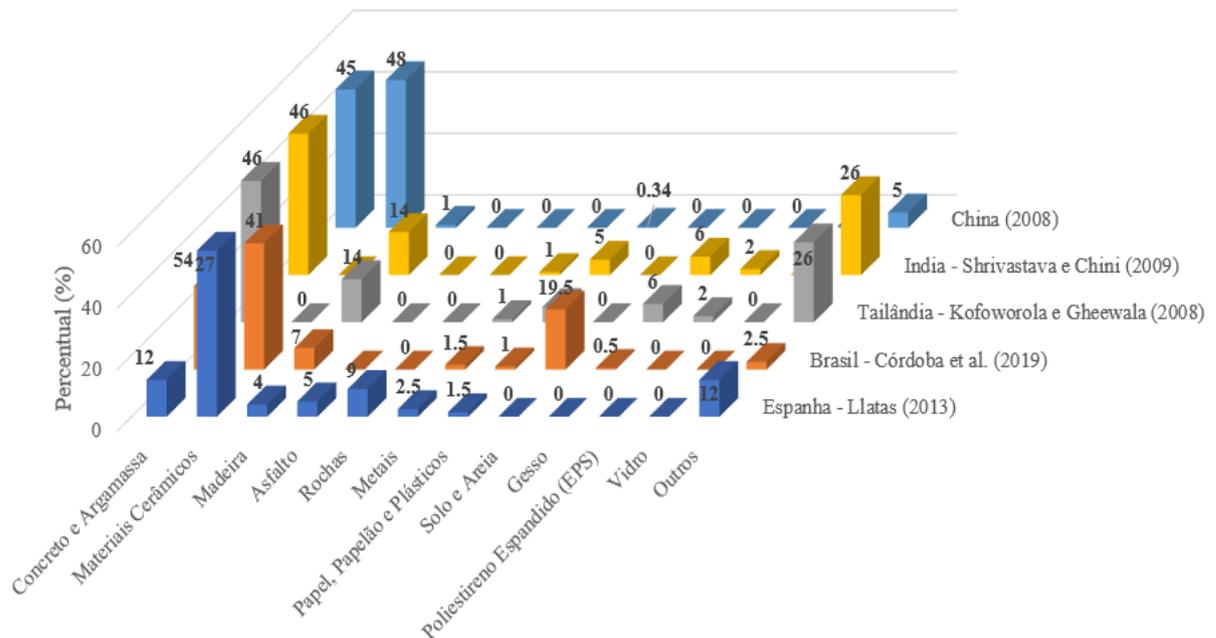
Tipo de Construção	Construção Pesada: alvenaria, concreto, etc.		Construção Leve: elementos pré-fabricados, drywalls, estrutura de madeira, etc.	
	Função Habitacional	Função Não Habitacional	Função Habitacional	Função Não Habitacional
Construção Nova	120-140	100-120	20-22	18-20
Reforma	300-400	250-350	90-120	80-90
Demolição	800-1000	1000-1200	500-700	700-800

Fonte: Adaptado de Llatas (2013).

Nota-se que as obras de demolição têm as maiores médias de geração para todos os tipos e funções de empreendimento construtivo. É comum que construções habitacionais apresentem uma leve tendência a gerar mais RCD que as de função não habitacional. Todavia, em construções novas e obras de reforma, a situação se inverte: construções não habitacionais tendem a gerar mais RCD.

Como afirma Nagalli (2014), essas taxas de geração variam bastante regionalmente em função dos sistemas construtivos e podem ser completamente diferentes. As composições que formam os RCD confirmam essa informação, pois a utilização de cada material está diretamente ligada à técnica construtiva empregada. A Figura 2.3 apresenta essas diferenças ao comparar as taxas de geração de países de quatro continentes.

Figura 2.3 – Composições gravimétricas dos RCD em alguns países.



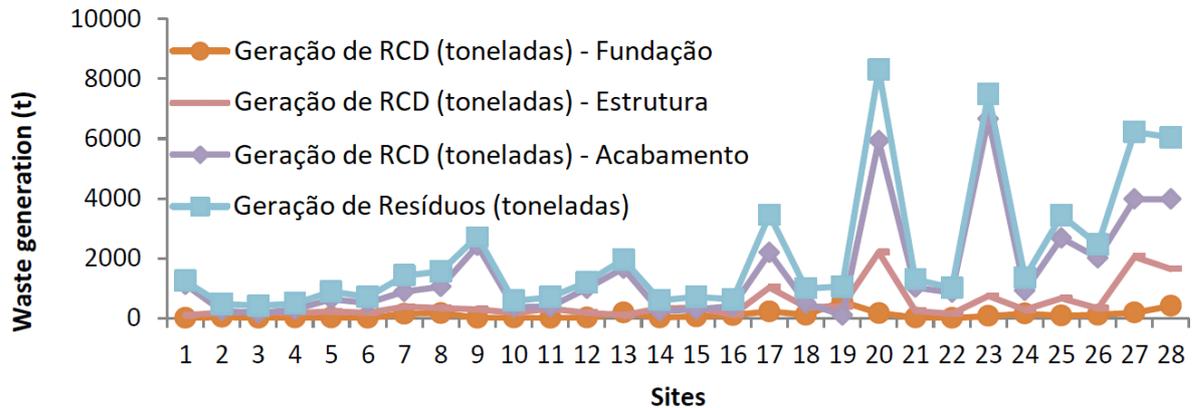
Fonte: Elaborado a partir de Llatas (2013); Córdoba *et al.* (2019); Kofoworola e Gheewala (2008); Shrivastava e Chini (2009); Zhao e Rotter (2008).

O estudo de Shrivastava e Chini (2009) chama a atenção pelo fato de a tipologia “Solos e Agregados” apresentar uma parcela maior do todo, o que remete à natureza das obras que foram executadas durante as pesquisas de base, podendo ter sido obras de escavação ou de fundação. Todos os países apresentaram valores muito elevados para resíduos da Classe A, o que corrobora os estudos de Akhtar e Sarmah (2018).

Logo, para definir padrões e estimativas mais adequadas a respeito da geração de resíduos, são necessárias análises regionais e que tenham foco tanto no âmbito quantitativo quanto no qualitativo, ou seja, que investiguem quais características de determinada obra têm influência na geração final (PAZ; LAFAYETTE, 2016).

Lafayette *et al.* (2018), em seu estudo acerca da geração e das características dos RCD produzido no município do Recife/PE, identificou diferentes taxas de geração entre as fases construtivas de fundação, de estrutura e de acabamento. Nessa pesquisa, foram acompanhadas as execuções de 28 empreendimentos de engenharia, que variavam no porte da obra, assim como nos padrões construtivos, conforme mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Composições gravimétricas dos RCD por tipologia de obra.



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

É possível identificar que a fase de fundação foi a que apresentou os menores índices de geração, seguida pela fase de estrutura, representando, juntas, cerca de 26% do total de RCD gerados. A fase de acabamento apresentou os maiores indicadores de geração, ficando com uma média muito próxima da média de geração total, que foi de 125 t/m² para todos os empreendimentos. Esse valor corrobora os limites definidos por Gusmão (2008).

2.2.2. Legislação dos resíduos sólidos

A sociedade moderna tem, cada vez mais, aumentado a taxa de geração de resíduos sólidos ao longo dos anos, principalmente em relação aos resíduos de construção. Conseqüentemente, a questão tem ganhado notoriedade e a busca por medidas que visem à gestão correta e sustentável dos RCD também acompanhou esse crescimento (SILVA; MATOS; FISCILETTI, 2017).

No âmbito internacional, as primeiras legislações tratando da gestão dos resíduos sólidos surgiram com base na Diretiva 75/442 do Conselho Econômico Europeu (CEE) (UE, 1975), lançada pela União Europeia (UE) em 1975. Essa legislação determinava a eliminação dos resíduos sólidos que apresentassem riscos à saúde e risco de contaminação do meio natural, além de fornecer estímulo para reutilização e reciclagem dessas substâncias (MÁLIA; BRITO; BRAVO, 2011).

A partir dessa primeira legislação publicada pela EU, várias outras, como as Diretiva 91/156/CEE (UE, 1991) e a Diretiva 2008/98/EC (UE, 2008), vieram com o propósito de complementar e/ou ampliar a discussão sobre o assunto. Apesar de essas diretivas possuírem poder de lei, elas tinham o intuito de servir como um instrumento “modelo” para que os países

pertencentes à comunidade europeia estabelecessem suas próprias legislações (BEZERRA, 2015).

No Brasil, os primeiros grandes avanços acerca das questões ambientais ocorreram a partir da instituição da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), pela Lei nº 6.931 de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981). Tendo grande importância, essa lei tratou o meio ambiente de forma geral pela primeira vez, ou seja, sem fragmentar a discussão entre cada um dos recursos naturais (água, vegetação, ar, etc.) (AMADO, 2013).

Entretanto, foi somente na promulgação da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988), primeira instrumentação legal a tratar dos resíduos sólidos (RS), que se estabeleceu, por meio do seu artigo nº 30, a independência administrativa, legislativa e financeira dos municípios, tornando-os titulares da gestão dos serviços de limpeza urbana e, por consequência, do manejo dos resíduos sólidos (SILVA; MATOS; FISCILETTI, 2017).

Os resíduos sólidos só foram discutidos novamente uma década depois, quando houve debates para a criação da Lei de Crimes Ambientais (LCA), Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998). O regimento trazia sanções penais e administrativas para quem causasse danos ao meio natural, tais como deposição/lançamento irregular de resíduos sólidos em localidades que estejam em desacordo com as exigências legais.

Em 2002, apenas quatro anos após a aprovação da LCA, o tema viria a ganhar destaque uma vez mais ao compor tema de objetos legais, como a previamente citada Resolução nº 307 de 2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) e a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a). Tais normas conceituam e classificam os resíduos de construção civil (RCC), hoje referidos como RCD, e os resíduos sólidos respectivamente.

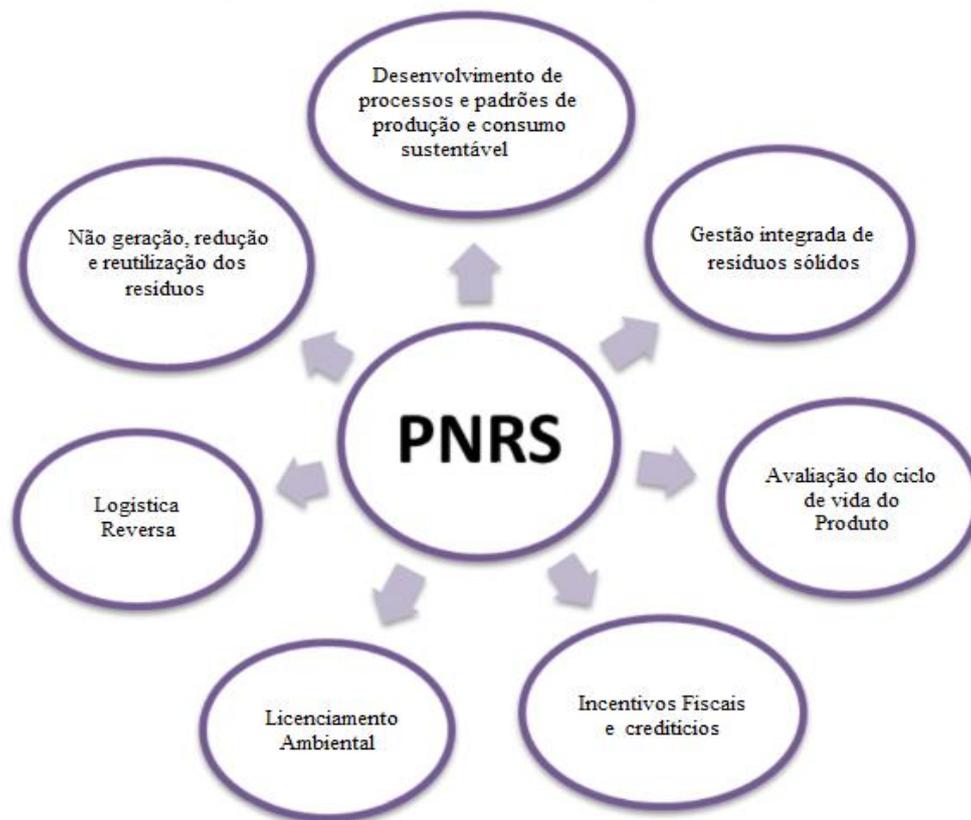
A Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) foi um marco para construção civil porque estabeleceu prerrogativas seguidas até os dias de hoje no setor, como a conceituação de potenciais de poluição, o beneficiamento dos resíduos e o correto manejo para todas as classes de RCD existentes.

Com o crescimento da pressão internacional e um mercado cada vez mais exigente, aliados aos estudos crescentes sobre temática, foi aprovada, em 2010, a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010). A diretriz instituía a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), declarando a

exigência da criação de um plano de gestão integrada dos resíduos sólidos para todos os municípios do país, salvo exceções (SILVA; BIERNASKI, 2018).

A aprovação da legislação trouxe novas perspectivas para o cenário da gestão dos resíduos sólidos. A Figura 2.5 sintetiza, de forma simples, os principais itens trazidos pela PNRS, sendo os principais parâmetros que devem pautar os planos de gestão desenvolvidos pelas cidades.

Figura 2.5 – Principais diretrizes da PNRS.



Fonte: Bezerra (2015).

Dois anos após a sua publicação inicial, a PNRS possuía caráter obrigatório. Todas as entidades federativas (estados e municípios) que quisessem dispor de recursos da União deveriam dispor de um Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos da Construção Civil (PGIRCC), que deveria englobar o programa municipal de gestão dos RCD e os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) (SILVA; BIERNASKI, 2018).

O prazo estabelecido pela PNRS tinha sua data limite no fim de 2014. Todavia, como muitos municípios não se articularam para cumprir as exigências, o senado federal aprovou a prorrogação do prazo para as datas-limite, que foram estendidas de 2018 a 2020, em

conformidade com as características de cada entidade em análise (BRASIL, 2002; SALOMÃO, 2015).

2.2.3. Impactos ambientais e alternativas sustentáveis para o RCD

O paradigma de desenvolvimento em que a sociedade tem se pautado, desde o período da revolução industrial, tem refletido nas condições adversas que o planeta vem experimentando nas últimas décadas. Devido aos graves problemas socioambientais que vêm afligindo os grandes centros urbanos, esse modelo insustentável está cada vez mais perdendo notoriedade (YEHEYIS *et al.*, 2013).

O crescente interesse que as questões ambientais vêm despertando no meio internacional deve-se, em grande parte, aos efeitos nocivos que intervenções antrópicas têm causado no meio natural. Essa degradação se intensifica com o desenvolvimento que a indústria tem apresentado nos últimos anos (RIOUSSET; FLACHSLAND; KOWARSCH, 2017).

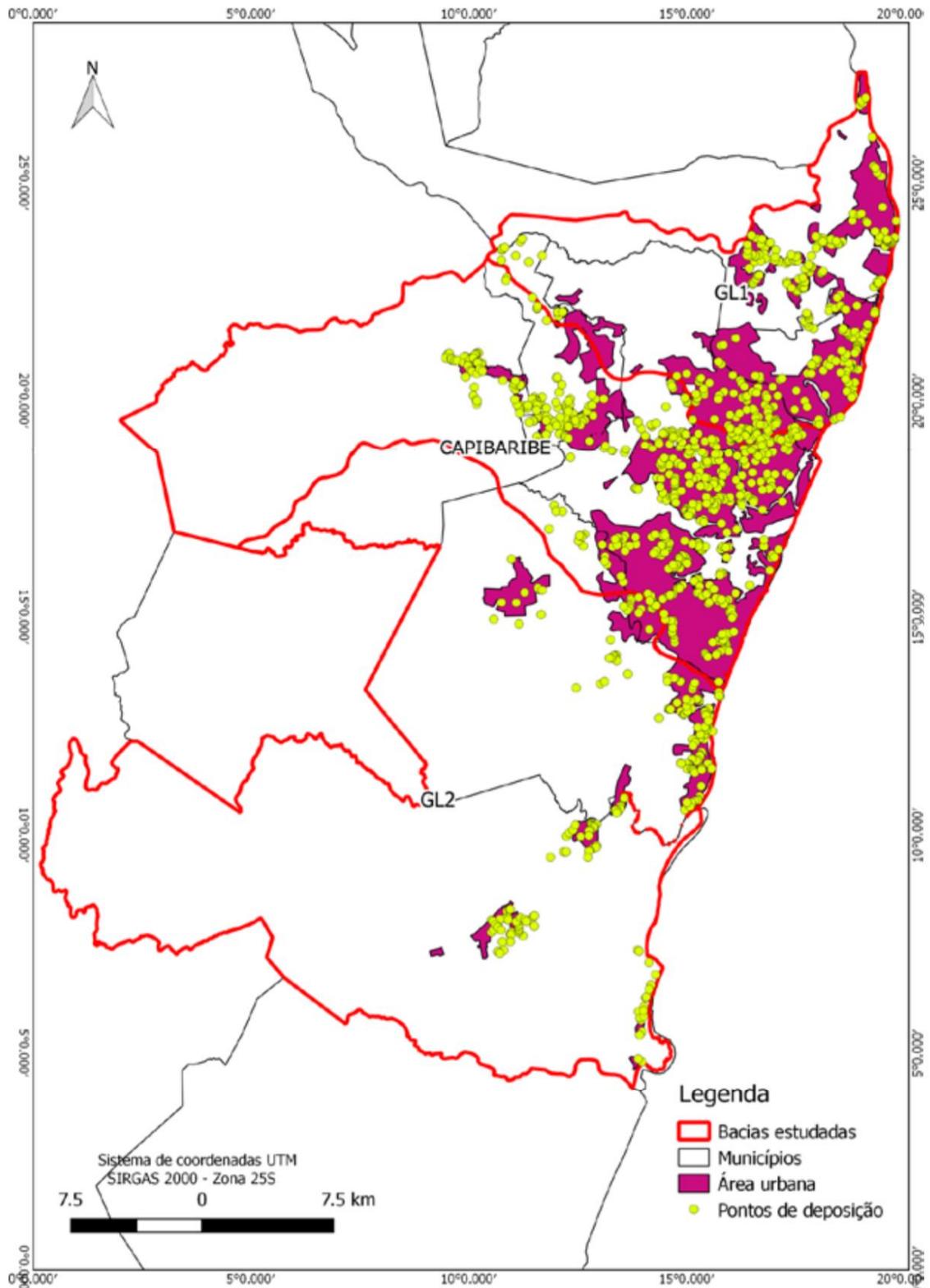
Um dos principais ativos nessa questão é a indústria da construção civil, capaz de gerar impactos durante toda a sua cadeia produtiva, passando por processos que vão desde a exploração de recursos naturais até a entrega do produto final, afetando diretamente a qualidade do ar e do solo (VEDRONI, 2007).

Segundo Bezerra (2015), desde a exploração dos recursos naturais, tanto na forma de matéria-prima para a produção de materiais da construção (cimento, cerâmica, aço, etc.) quanto na forma de insumo para produção energética, impactos como a poluição do meio, o desperdício e a geração de RCD tendem a estar presentes.

Atualmente, os RCD estão intimamente ligados a vários impactos que degradam o meio ambiente, como os efeitos derivados do seu descarte irregular ou a poluição atrelada ao seu processamento incorreto. Somente em 2017, a quantidade de RCD que foi coletada no Brasil por empresas de limpeza urbana chegou a 45 milhões de toneladas (ABRELPE, 2018).

Esses valores são bastante alarmantes e, quando comparados à estimativa de geração dos RCD no Brasil para 2017, que era cerca de 70 milhões de toneladas (PAZ; LAFAYETTE, 2016), indicam que aproximadamente 25 milhões de toneladas de RCD foram descartadas irregularmente no país, como pôde ser observado em alguns municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR) (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Mapa da deposição irregular de RCD na RMR.



Fonte: Paz *et al.* (2018).

Araújo *et al.* (2018) explicam que, quando tais resíduos são descartados de maneira irregular, propiciam-se condições para o surgimento de diversos problemas de ordem pública, como

doenças, poluição e desastres ambientais, além de um aspecto visual inadequado para paisagens.

No ano de 2017, a deposição irregular de RCD levou à obstrução dos dutos de captação de águas pluviais de uma encosta do bairro de Dois Unidos, na cidade do Recife, ocasionando um deslizamento de terras com duas vítimas fatais. Isso ocorreu devido à falta de estabilidade causada pelo aumento do teor de umidade no solo do talude (SANTOS; SILVA; LAFAYETTE, 2019).

Com intenção de reduzir esses efeitos devastadores atrelados ao manejo incorreto dos RCD, o setor tem sido cada vez mais encorajado, por parte das entidades públicas, a investir na reciclagem desses resíduos. Além de uma ótima oportunidade de investimento, esse instrumento de gestão tem sido a chave para o desenvolvimento sustentável em países com pouco espaço físico, como é o caso do Japão, da Noruega e da Coreia do Sul (GARBARINO; BLENGINI, 2013; AKHTAR; SARMAH, 2018).

2.2.4. Reciclagem do RCD

A reciclagem pode trazer diversos benefícios de escala econômica (reduzindo os custos de limpeza urbana e gerenciamento dos mesmos, etc.) e ambiental (preservando as reservas naturais com as deposições irregulares, e reduzindo as emissões de dióxido de carbono, etc.) (MACEDO, 2013).

Apesar da reciclagem dos RCD ser considerada uma prática sustentável, sua utilização de forma sistemática vem ocorrendo desde o fim da Segunda Guerra Mundial. Estima-se que em torno de 400 a 600 metros cúbicos de escombros foram gerados em cidades alemãs, que ficaram como resultado dos bombardeios (VERAS, 2012). Para Schulz e Hendricks (1992), cerca de 11,5 milhões de metros cúbicos de resíduos de demolição gerados durante o período da guerra foram reciclados na Alemanha, resultando em mais 175.000 unidades habitacionais até 1955.

No entanto, apesar de crescente, a taxa de reciclagem dos RCD ao redor do mundo ainda é baixa. A fim de estimular essa iniciativa, a academia tem desenvolvido muitas pesquisas nesse campo, formando uma base de conhecimento para desenvolver técnicas mais eficientes e reduzir os custos dos diferentes materiais que formam os RCD (WANG; YUAN, 2010; JIN; LI, 2017; HUANG *et al.*, 2017).

A reciclagem dos RCD possui diferentes potencialidades que dependem, a princípio, do tipo de material, da tecnologia disponível para sua reciclagem e da viabilidade econômica atrelada à sua fonte geradora (custos do transporte do material, qualidade, etc.).

No Brasil, a principal forma de reciclagem dos RCD é por meio da geração de agregados reciclados para obras de estabilização de solos, tendo como principal recurso de base os resíduos de classe A (GARBARINO; BLENGINI, 2013). Entre as vantagens de reutilização desses resíduos como agregado reciclado é que os RCD são predominantemente inertes, o que viabiliza sua utilização em diversas situações.

De maneira geral, o processo de tratamento ou beneficiamento dos RCD consiste na sua britagem, para reduzir o tamanho dos grãos à granulometria desejada para o posterior uso (PORTELA, 2019). Como resultado desse processo, obtém-se o agregado reciclado que, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004b), é classificado por sua origem e seu material formador, ou seja, agregado de resíduo de concreto ou agregado de resíduo misto.

2.3. Madeira na construção civil

A madeira aplicada à construção civil é um dos muitos materiais provenientes dos recursos naturais extraídos pelo setor. Sua utilização varia conforme a tipologia e finalidade do empreendimento de engenharia, podendo ser aplicada como material definitivo (como elemento estrutural ou parte da ambientação) ou como material provisório (andaimes, formas, escoras, etc.) (RAMAGE *et al.*, 2017).

A alta versatilidade do material deve-se às suas características intrínsecas, como seu comportamento mecânico, e ao fato de ser um ótimo isolante térmico, além de não apresentar alterações nas suas características devido à variação de temperatura. Por outro lado, sua anisotropia, ou seja, a falta de uniformidade com que a mesma é encontrada na natureza, representa uma de suas principais desvantagens em relação a outros materiais (MENESES FILHO, 2016).

Sua aplicação na construção civil remonta aos primórdios da civilização e, em países desenvolvidos, seu uso como elemento construtivo ainda é bastante elevado. Por essa razão, vem crescendo a preocupação desses Estados com o gerenciamento correto dos resíduos resultantes do uso desse material (SANTOS, 2009).

Segundo Vanderlei e Silva (2014) e dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2013), até o início de 2011, 14% de toda a madeira amazônica consumida eram destinados ao estado de São Paulo. Desse total, 70% foi utilizada na construção civil. Esses números vêm cada vez mais diminuindo com a pressão que autoridades internacionais como a WWF-Brasil e o próprio Sindicato das Indústrias da Construção (SINDUSCON-SP), têm exercido nos últimos anos.

Em um levantamento feito entre 2009 e 2010 em obras residenciais de seis das maiores empresas construtoras do estado de São Paulo, constatou-se que cerca de 80% de toda a madeira consumida foi proveniente de áreas de reflorestamento, indicando a crescente consolidação do uso deste material em meio a indústria (VANDERLEI E SILVA, 2014).

2.3.1. Tipologias de madeira frequentes na construção civil

As características das madeiras variam bastante entre as espécies, algo que dificulta no controle de qualidade desse material e restringe o tipo de aplicação em que cada uma pode ser empregada. Logo, a escolha da madeira adequada é primordial, especialmente em países tropicais, onde a variedade e o número de espécies disponíveis são substanciais (DAHER; FABRI, 2012).

Como as metodologias construtivas variam bastante entre regiões, o uso da madeira se ajusta às necessidades locais. Portanto, o uso geral tende a se qualificar de acordo com as características tanto do empreendimento quanto da madeira. A Tabela 2.5 mostra algumas das principais espécies de madeiras utilizadas na construção civil e suas aplicações.

Tabela 2.5 – Usos da madeira na construção civil.

Espécies	Nome Comum	Construção							Uso Temporário	Assoalho
		Pesada		Leve						
		Externa	Interna	Externa	Interna					
					Decoração	Estrutural	Esquadria	Útil. Geral		
<i>Vatairea sp</i>	Angelim-amargoso	X	X			X			X	
<i>Hymenolobium petraeum</i>	Angelim-pedra		X	X	X	X	X		X	
<i>Dinizia excelsa</i>	Angelim-vermelho					X	X	X	X	
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	Cedrorana	X	X	X	X		X			X
<i>Dipteryx odorata</i>	Cumarú	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Goupia glabra</i>	Cuplúba	X	X	X		X				
<i>Micropholis venulosa</i>	Curupixá				X	X	X		X	
<i>Apuleia leiocarpa</i>	Garapa	X	X	X	X		X			X

Tabela 2.5 – Usos da madeira na construção civil. (Continuação)

<i>Hymenaea courbaril</i>	Jatobá	X	X	X	X		X			X
<i>Ruizterania albiflora</i>	Mandioqueira					X		X	X	
<i>Astronium lecointei</i>	Muiracatiara		X	X	X		X			X
<i>Clarisia racemosa</i>	Oiticica-amarela				X	X	X		X	
<i>Pinus elliottii</i>	Pinus	X		X				X	X	

Fonte: Adaptado de IPT (2013).

As madeiras mais versáteis são, em sua maioria, pertencentes ao grupo das árvores dicotiledôneas, capazes de gerar produtos finais com densidades aparentes, ao teor de 15% de umidade, bastante elevadas (valores da ordem 1000kg/m³), além de resistirem melhor a fatores como variações de temperatura e apodrecimento (IPT, 2013).

As árvores dessa categoria são popularmente conhecidas como “madeiras de lei” e possuem copas pouco frondosas em relação a outras tipologias usadas para a construção civil, dentre as quais se destacam a *Hymenaea courbaril* (Jatobá) e a *Vatairea sp* (Angelim-amargoso) (MENESES FILHO, 2016).

Vale salientar a presença da espécie *Pinus elliottii* na lista, que é única das espécies que não figura no grupo das árvores dicotiledôneas, sendo, na realidade, da categoria das árvores coníferas. Essas árvores têm copa frondosa e possuem folhas perenes com formato de escamas ou agulhas, típicas de regiões de clima frio (MENESES FILHO, 2016).

Quanto à anatomia, a *Pinus elliottii* é uma espécie de árvore classificada como de madeira mole, ou seja, apresenta menor densidade e, por consequência, menores resistências quando comparadas às dicotiledôneas, sendo uma espécie originária da América do Norte, facilmente encontrada nas regiões mais ao norte dos EUA e praticamente todo o território do Canadá. (ZEMAD, 2001; MENESES FILHO, 2016).

No Brasil, é uma árvore resultante do processo de reflorestamento que foi trazida para o país na década de 70. Atualmente, ela é cultivada nas regiões sul e sudeste, sendo comumente chamada de “Pinus”. É uma das madeiras mais consumidas no setor da construção civil devido a sua disponibilidade abundante no mercado, o que ocorre dado o seu rápido crescimento (não necessitando de solos ricos em nutrientes) (ZEMAD, 2001).

O Pinus é bastante empregado na forma de caibros, ripas, sarrafos e fôrmas para estruturas de concreto armado. Vanderlei e Silva (2014) afirmam que a grande maioria dos produtos de

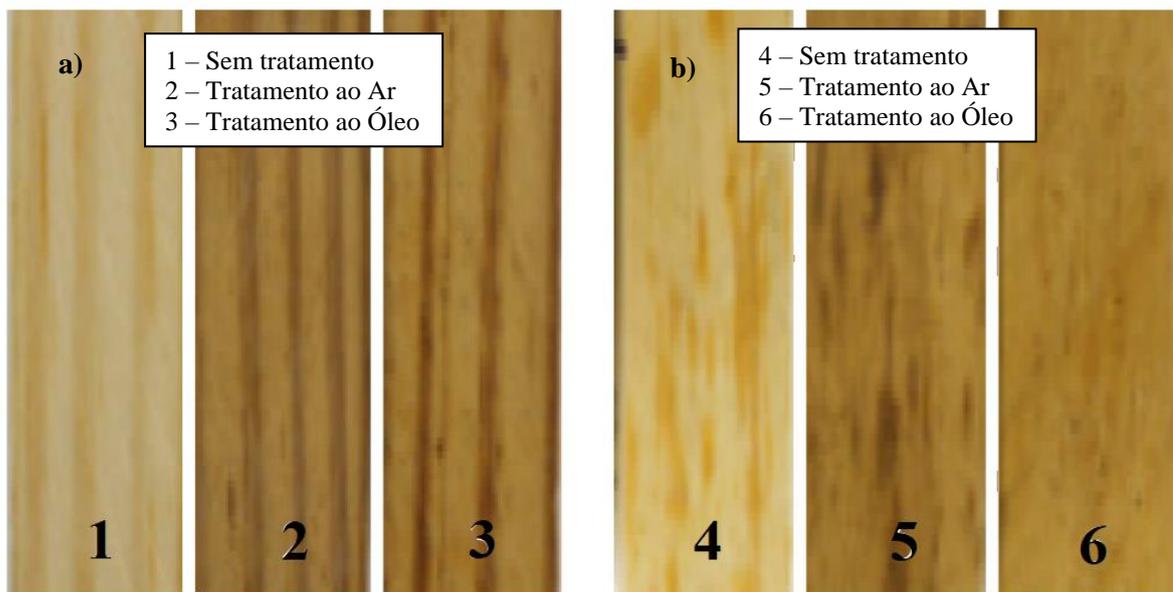
madeira utilizada pela indústria da construção brasileira está concentrada em peças de baixo valor agregado.

Antes de chegar ao consumidor final, a madeira pode passar por diversos tipos de tratamentos, dependendo da indústria e das condições iniciais da matéria prima. Nesse sentido, a técnica de termorretificação da madeira é bastante utilizada, pois é uma alternativa que visa a melhorar as propriedades físicas e superficiais da madeira sem adição de outros produtos químicos (PERTUZZATTI *et al.*, 2016).

Esse processo de modificação térmica consiste, basicamente, no aquecimento das peças de madeira cortada em sentido tangencial ou radial às fibras, a temperaturas que variam de 120°C a 260°C, causando alterações nas propriedades relacionadas à estrutura química do elemento, como as hemiceluloses, celulosas e ligninas (NEJAD *et al.*, 2013).

As características da madeira sofrem influência de diversos fatores durante esse processo de aquecimento, como da atmosfera transmissora em que será executada (ar, vácuo, óleo), das dimensões das amostras e do tempo de tratamento (PERTUZZATTI *et al.*, 2016). A Figura 2.7 (a e b) mostra exemplos de corpos de prova da *Pinus elliottii* submetidos a tratamentos de termorretificação.

Figura 2.7 – Corpos de prova de *Pinus elliottii* submetidos a processos de termorretificação em corte radial (a) e corte tangencial (b).



Fonte: Adaptado de Pertuzzatti *et al.* (2016).

O tratamento com a utilização do óleo como veículo de transferência de calor em vez do ar garante uma distribuição de calor muito mais uniforme ao longo da peça de madeira (MOHEBBY *et al.*, 2014). Quando bem distribuída, a ação do calor garante a correta degradação dos compostos estruturais, como as hemiceluloses (~120°C), as celuloses que apresentam degradação mais lenta (necessitando maiores tempos de exposição) e a lignina, que é o componente mais resistente ao calor (HILL, 2006; AWOYEMI; COOPER; UNG, 2009).

Dessas características químicas da madeira, a lignina é considerada uma das principais, do ponto de vista da engenharia, visto que é diretamente responsável pela resistência mecânica da madeira, além de atuar na proteção contra a ação de microrganismos em algumas plantas vasculares. Sua estrutura molecular tridimensional é o que confere os parâmetros de resistência final da madeira (SANTOS, 2009).

Em relação ao *Pinus elliottii*, a quantidade de lignina acaba sendo um pouco reduzida se comparada a madeiras provenientes do grupo das árvores dicotiledôneas. Contudo, ela ainda se apresenta em proporções que conferem ótimos desempenhos de resistência à compressão e à tração (CONTE *et al.*, 2014). A Tabela 2.6 descreve as principais características mecânicas do *Pinus elliottii*.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas *Pinus elliottii*.

Propriedades Mecânicas		Condição do Material	Valor (MPa)
Flexão	Resistência (f_M)	Madeira Verde	48,0
		Madeira com 15% Umidade	69,6
	Limite de Proporcionalidade	Madeira Verde	19,7
	Módulo de Elasticidade	Madeira Verde	6463
Compressão (Paralela às Fibras)	Resistência (f_{c0})	Madeira Verde	18,5
		Madeira com 15% Umidade	31,5
	Limite de Proporcionalidade	Madeira Verde	13,7
	Módulo de Elasticidade	Madeira Verde	8846
Outras Propriedades	Resist. Cisalhamento	Madeira Verde	5,8
	Tração Normal às Fibras	Madeira Verde	3,0
	Fendilhamento	Madeira Verde	0,4

Fonte: Adaptado de IPT (1989).

Como identificado para o *Pinus elliottii*, e é realidade comum para todas as espécies de madeira natural, a resistência à tração é muito superior à resistência à compressão, seja para madeira verde (recém cortada) ou para a madeira com 15% de umidade, condição mais usual. Vale destacar que esforços aplicados paralelamente às fibras da madeira apresentam resultados muito

superiores de flexão, compressão e tração em relação a esforços aplicados perpendicularmente (MENESES FILHO, 2016).

Devido a essa peculiaridade, as peças de madeira que dependam de um bom desempenho mecânico são projetadas para que a direção de suas fibras fique posicionada sempre paralelamente aos esforços atuantes, sejam eles de natureza temporária ou permanente, o que torna comum a difusão de peças em formato longilíneo (SANTOS, 2008; CONTE *et al.*, 2014; PERTUZZATTI *et al.*, 2016).

2.3.2. Reaproveitamento e reciclagem dos resíduos de madeira

Nos últimos anos, a forma como a madeira vem sendo manipulada em empreendimentos de engenharia tem resultado na geração demasiada de resíduos. Mesmo sendo consideradas recursos naturais, com fontes renováveis, as madeiras também podem representar sérios problemas ambientais, uma vez que seus subprodutos são produzidos em grandes volumes e, em geral, facilmente contamináveis.

Por possuírem reduzidos potenciais de impacto e poluição ambientais em relação a outros tipos de RCD (plásticos, gesso, metais, etc.), os RMC acabam sendo bastante negligenciados quanto ao seu correto gerenciamento (DAHER; FABRI, 2012). Além do baixo potencial poluidor, os resíduos apresentam um grande desafio para serem absorvidos por aterros sanitários devido ao seu comportamento perante a umidade.

Para Santos (2009), as poucas publicações sobre a gestão correta desses Resíduos de Madeira da Construção Civil (RMC) são fornecidas por sindicatos e pelas indústrias da construção que atuam com o material. No Brasil, os RMC se originam em maior quantidade na fase de fundação e de estruturas, como fôrmas e/ou compensados de madeira (DAHER; FABRI, 2012).

A destinação desses resíduos, quando não dispostos de maneira irregular, dá-se por meio da separação em três grupos (contaminada, não contaminada e impura), dos quais somente a madeira não contaminada pode ser direcionada para a reciclagem. Essa solução ocorre devido aos difíceis e onerosos processos de recuperação dessa qualidade de material. Os outros tipos de RMC têm que ser direcionados para a incineração (SANTOS, 2009).

Na reciclagem dos RMC não contaminados (Figura 2.8), fatores como a dilatação da madeira e o seu teor de umidade têm que ser considerados e, em caso de desconformidade com os parâmetros ideais, é preferível a utilização de madeira nova. Segundo um levantamento da

União Europeia (2016), até 70% da madeira normalmente utilizada na construção civil pode ser convertida em RMC reciclável.

Figura 2.8 – RMC não contaminado acondicionado corretamente.



Fonte: UE (2016).

Devido às metodologias construtivas praticadas em larga escala no Brasil, como as estruturas aperticadas de concreto, os RMC resultantes tendem a apresentar boa qualidade para reúso, já que, como o custo final da madeira nova é relativamente baixo, a rotatividade dos materiais acaba sendo alta, resultando no descarte de materiais antes do fim de sua vida útil (DAHER; FABRI, 2012).

Esse processo, além de acelerar a degradação ambiental mediante o aumento da exploração dos recursos naturais, acaba gerando resíduos de madeira livres de possíveis impurezas. Dentre os materiais normalmente encontrados impregnados aos RMC se destacam o concreto, as tintas, vernizes, pregos e produtos químicos de usos diversos (DIAS D.; COELHO; DIAS C., 2016; SANTOS, 2009).

O potencial de reúso dos resíduos de madeira é muito elevado, porém é uma alternativa de destinação final, ainda pouco explorada do ponto de vista técnico e econômico. As soluções mais comuns são as que envolvem a queima dos resíduos (para produção de energia ou não), a redução do material em lascas e em fibras de serragem (utilizadas na confecção de painéis, em

arenas de equitação) ou como matéria-prima na indústria de papel (se proveniente de madeira não tratada) (BOUHICHA; AOUISSI; KENAI, 2005; SANTOS, 2009).

No Brasil, a principal forma de reciclagem do RMC é como fonte de matéria-prima para produção de energia térmica, destinação essa que traz muitos benefícios econômicos. Contudo, do ponto de vista ambiental, esse processo é insustentável, pois polui a atmosfera e cria outros tipos de resíduos, como é o caso das cinzas de fundo (PINTO, 2005).

Uma vez que as demandas do setor da construção tendem a ser por soluções em grande escala, a queima acaba sendo uma das mais aplicadas (SANTOS, 2009). De acordo com dados do Sindicato da Indústria da Construção do Distrito Federal (SINDUSCON-DF, 2011), mesmo com a preleção que essa metodologia possui, a utilização dos RMC para confecção de novos elementos construtivos tem se desenvolvido bastante no setor moveleiro. A Figura 2.9 apresenta algumas alternativas sustentáveis de reciclagem do RMC não contaminado:

Figura 2.9 – Alternativas de reciclagem para o RMC.

PRODUTO	CARACTERÍSTICA	USO
 <p>MDF (medium density fiberboard)</p>	<p>painel (chapa) de média densidade, produzido a partir das fibras da madeira com adição de resina sintética e submetido a alta temperatura, tempo e pressão</p>	<p>pisos, rodapés, almofadas de portas, batentes, portas usinadas e peças torneadas</p>
 <p>MDP (medium density particle board)</p>	<p>painel (chapa) de partículas de madeira em camadas, com adição de resina sintética e submetido a alta temperatura, tempo e pressão.</p>	<p>portas retas, tampos retos e tampos pós formados</p>
 <p>HDF (high density fiberboard)</p>	<p>painel de alta densidade produzido a partir das fibras da madeira com adição de resina sintética e submetidos a alta temperatura, tempo e pressão.</p>	<p>pisos laminados, forros, divisórias e portas</p>

Fonte: SINDUSCON-DF (2011).

Figura 2.9 – Alternativas de reciclagem para o RMC (continuação).

PRODUTO	CARACTERÍSTICA	USO
<p>HARDBOARD (chapa de fibra dura)</p>	produzido com fibras de madeira aglutinadas pelo processo de alta temperatura, tempo e pressão.	fôrros, divisórias e portas
<p>OSB (oriented strand board ou painel de tiras de madeira orientadas)</p>	painel estrutural de tiras de madeira orientadas em três camadas perpendiculares, o que aumenta sua resistência mecânica e rigidez.	paredes, pisos e telhados no sistema construtivo seco, bem como mezaninos. É usado, também em fôrmas de concreto e móveis expostos à umidade como em banheiros, cozinhas e áreas litorâneas, se produzido com cola resistente a água.
<p>COMPENSADO</p> <p>MADEIRA SERRADA</p>	painel constituído de lâminas de madeira sobrepostas e cruzadas entre si, unidas por adesivos e resinas por meio de pressão e calor	estruturais ou não, tais como: pisos, fôrros, paredes, esquadrias, portas, telhados andaimados, fôrmas de concreto, vigas, caibros, pranchas e tábuas em estruturas de telhado, painéis e lambris.

Fonte: SINDUSCON-DF (2011).

Assim como a confecção desses tipos de materiais de base sustentável, os compósitos que utilizam os RMC como matéria-prima apresentam características essenciais para compor misturas para a estabilização de solos (Figura 2.9). Segundo Silva (2005), as fibras de serragem das madeiras elevam a rigidez do solo, fazendo com que ele tenha sua capacidade de absorção da energia de deformação reduzida.

Os estudos de estabilização de solos com madeira ainda são bastante discretos, pois, devido às características de algumas madeiras, a durabilidade do processo de estabilização pode ter garantia de resultados reduzida. Nas últimas décadas, alguns estudos têm sido realizados com o uso dos RMC brutos ou dos resíduos de compósitos dos RMC (MDF, OSB, etc.), conforme mostrado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Estudos de estabilização com resíduos de madeira.

Estudos	Local do Estudo	Tipo de Solo	Material Adicionado	Teores de Mistura (%)	Melhoria Resistência (%)
Bouhicha, Aoussi e Kenai (2005)	Deserto da Algeria	Silte argiloso	Fibra de Cevada	0 – 3,5	7
	Deserto da Algeria	Silte argilo-arenoso	Fibra de Cevada	0 – 3,5	25
	Deserto da Algeria	Silte areno-argiloso	Fibra de Cevada	0 – 3,5	0
	Deserto da Algeria	Silte areno-argiloso	Fibra de Cevada	0 – 3,5	5,55

Tabela 2.7 – Estudos de estabilização com resíduos de madeira. (Continuação)

Santos (2009)	Brasil	Areia silto-argilosa	RMC Cimento Portland	0 – 6,5 0 – 10	2,4
Repsold e Casagrande (2015)	Brasil	Argila arenosa	Serragem de MDF Serragem de Péroba	0 – 3 0 – 3	50

Foi verificado que os teores de adição desse material tendem a ser baixos, fato que pode ser atribuído à questão da durabilidade final, que varia compativelmente ao tipo de madeira. No estudo de Silva (2005), foi viabilizada a criação de blocos de alvenaria feitos de solo-cimento e resíduo de madeira, em que fibras de serragem não contaminadas foram adicionadas ao compósito, visando a incrementar o módulo de rebote elástico dos blocos.

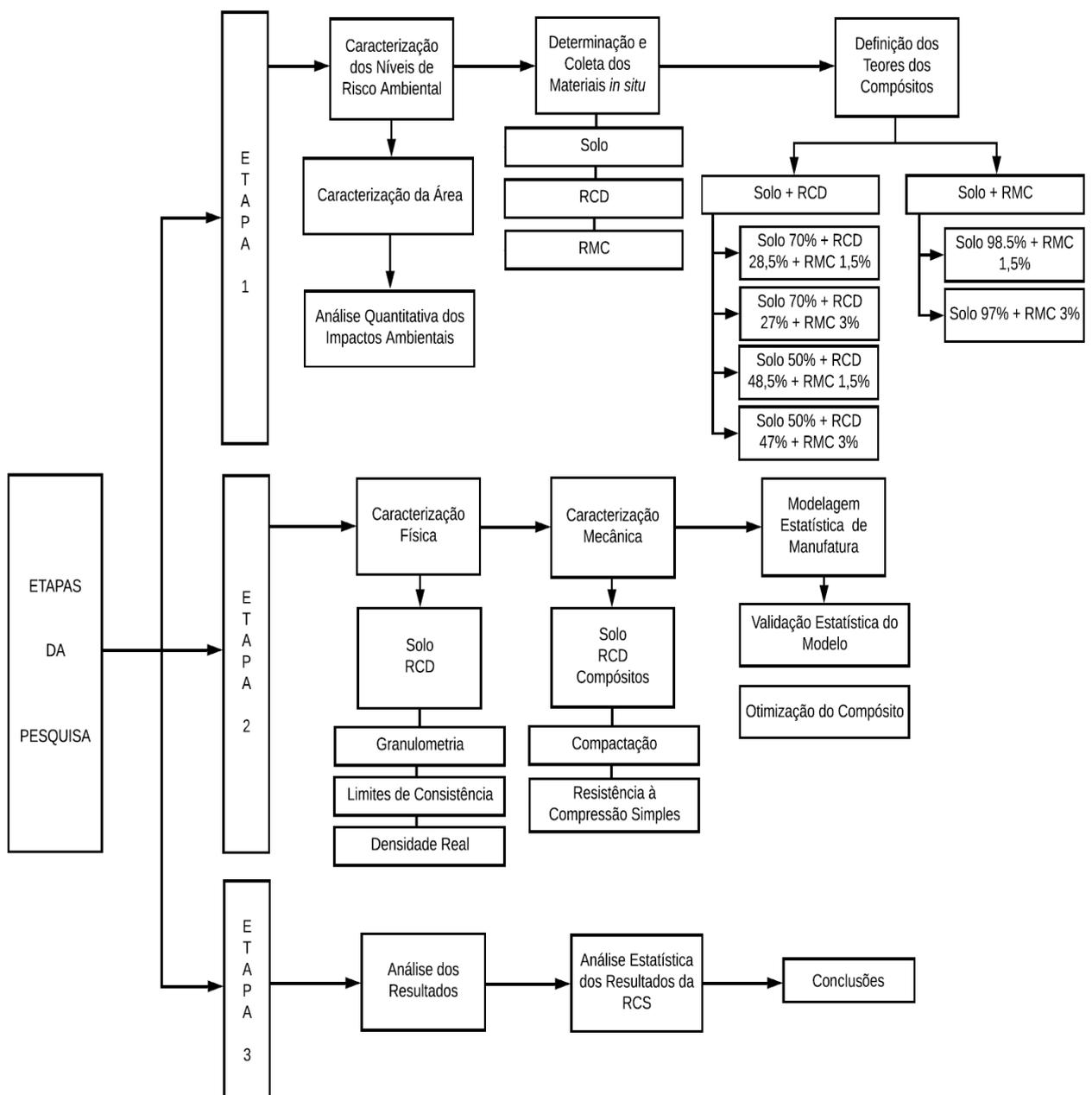
Santos (2009) avaliou os níveis de absorção de água para compósitos de solo-cimento e RMC contaminados (“lascas” de madeirite e tábuas concretados). Esse formato de resíduo se caracteriza por demonstrar altos níveis de retenção de umidade. Os resultados indicaram valores satisfatórios para um terço dos teores de mistura, segundo o especificado pela NBR 8491/2012 (ABNT, 2012).

Repsold e Casagrande (2015) desenvolveram compósitos do resíduo da serragem do MDF e da Peroba (*Aspidosperma polyneuron*) com uma argila arenosa com a finalidade de analisar o comportamento da mistura em função da resistência ao cisalhamento. Foram observadas melhorias da ordem de 50% para os teores de mistura de ambos os compósitos.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, é realizado um resumo descritivo da área abordando vários aspectos acerca da região de estudo e a determinação dos níveis de risco para desastres ambientais, além de suas caracterizações físicas e mecânicas (compósitos de solo, RCD e RMC). São descritos também os processos para a caracterização química das fibras de serragem do RMC e a avaliação estatística dos parâmetros de resistência à compressão simples (RCS). Para a realização desses processos, a metodologia se dividiu em três etapas, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autor.

3.1. Etapa 01

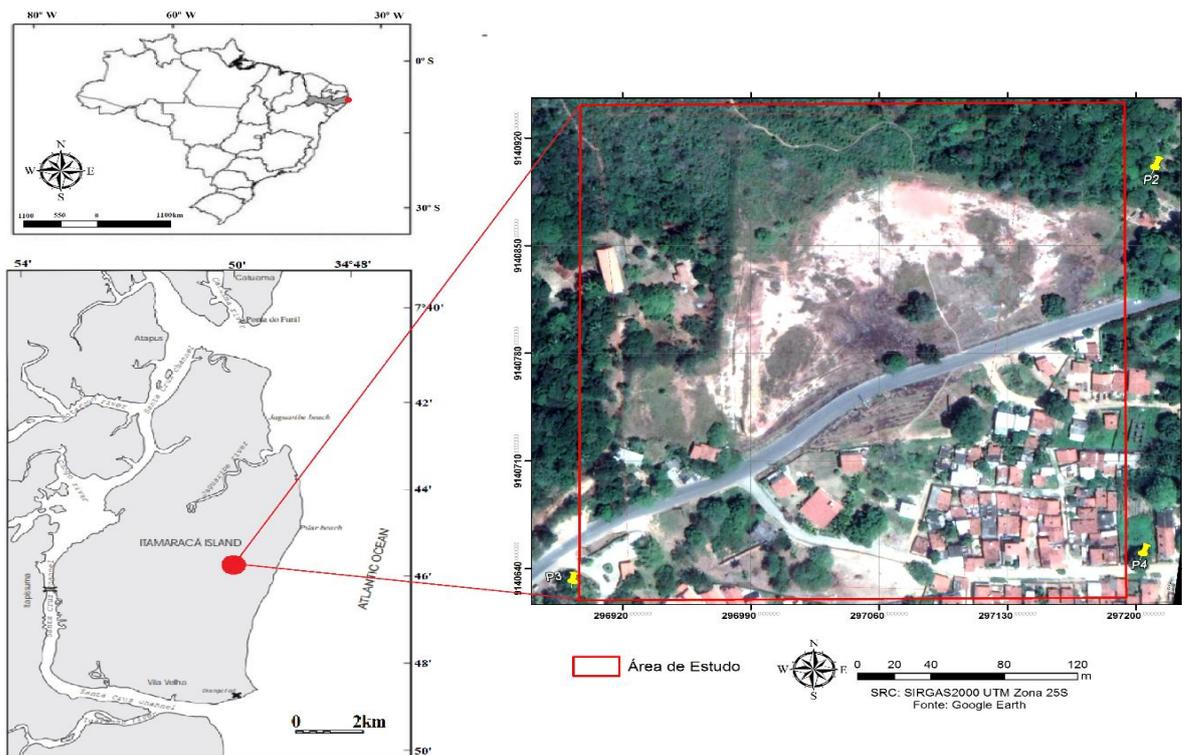
Na etapa inicial de desenvolvimento da pesquisa, foi realizada a definição do local, bem como a coleta dos dados e a determinação dos níveis de risco ambiental. Em seguida, foi realizada a preparação das amostras para os ensaios de caracterização física e mecânica.

3.1.1. Caracterização da área

Localizada dentro de um terreno privado, a área de estudo se situa no Bairro do Bom Jesus, localizado no município da Ilha de Itamaracá-PE, sob as coordenadas 7° 46' 9" Sul e 34° 50' 28" Oeste (Figura 3.2). O município compõe o litoral norte do estado e faz parte da Região Metropolitana do Recife (RMR), fazendo fronteira com os municípios de Goiana (ao norte), Igarassu (ao sul), Itapissuma (ao oeste) e com o Oceano Atlântico (ao leste) (CPRM, 2005).

O município possui extensão territorial de aproximadamente 66,775 km², representando 0,07% do território do estado de Pernambuco, dista cerca de 46 km da capital Recife e é acessado através das rodovias BR-101 e PE-035; a última margeia área do presente estudo. O terreno é formado por um conjunto de encostas e funcionava como uma jazida de extração de saibro até início dos anos 90 (PORTELA, 2019).

Figura 3.2 – Localização da área de estudo.



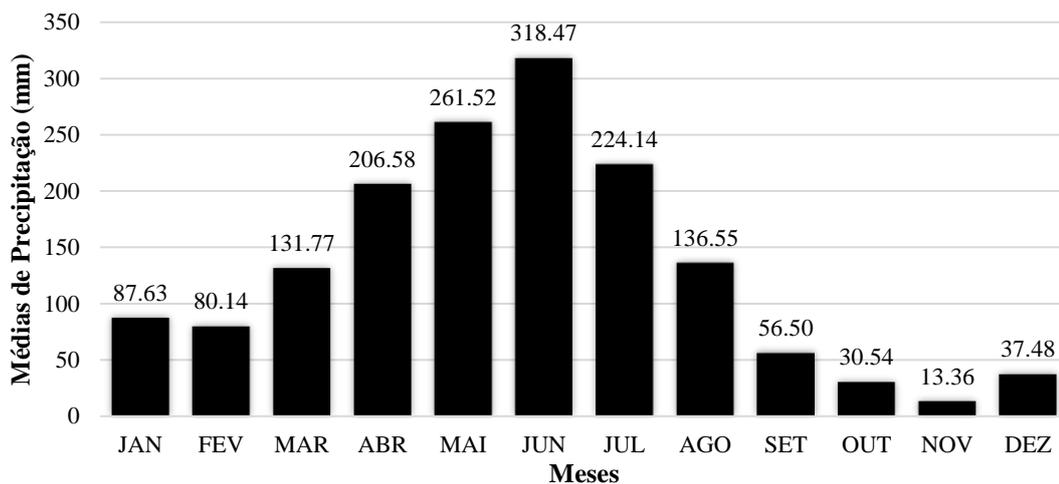
Fonte: Adaptado de Santos (2019).

3.1.1.1. Clima

O clima do município possui bastante similaridades com o conjunto de cidades que formam linha costeira norte do estado de Pernambuco. Segundo Silva (2012) e Oliveira (2016), para a classificação de *Köppen*, o clima é categorizado como Tropical Quente e Úmido (Am) e as temperaturas do município variam entre 25°C e 27°C, com taxas de umidade variando acima de 74%.

Segundo dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2019), a região da Ilha de Itamaracá, onde se localiza o posto de monitoramento pluviométrico nº 524, apresenta as maiores médias de precipitação entre os meses de abril a agosto, com médias históricas variando entre 136,55 e 318,47 mm para o período de 2004 a 2019, como indicado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Precipitações médias mensais históricas no período de 2004 a 2019.



Fonte: APAC (2019).

Para regiões afetadas pela presença de encostas, como a área de estudo, os meses que concentram o período chuvoso para a ilha (de abril a agosto) são os mais críticos no tocante à estabilidade física, pois isso influi no escoamento superficial, elevando o carreamento de partículas das áreas sem cobertura vegetal (BANDEIRA, 2003).

3.1.1.2. Aspectos socioeconômicos

Fundada oficialmente como um distrito municipal da cidade de Goiana em 1815, a Ilha de Itamaracá só veio a ganhar o status de cidade em dezembro de 1958 e é reconhecidamente palco de eventos importantes na história do estado de Pernambuco (BDE, 2018). Com registros de ocupação desde a fundação do Brasil, a cidade é caracterizada atualmente pela forte habitação urbana (CPRM, 2005).

Segundo a Base de Dados do Estado de Pernambuco (BDE) (2018), a população da ilha é estimada em 25.836 habitantes, com menos de 18,5% residindo em regiões rurais. Cerca de 40% da população possui renda média mensal inferior a R\$ 140,00, com renda domiciliar per capita média de R\$ 38,82. Apesar desse percentual elevado de residentes em condições críticas, cerca de 76,6% dos domicílios são saneados adequadamente (BDE, 2018).

O principal setor de movimentação da economia é o turismo, que engloba atividades que exploram as belezas naturais (praias, ecoparques, etc.) e o patrimônio histórico (Forte Orange, Vilarejo de Vila Velha, etc.) da cidade, além de promover diversos eventos culturais e possuir consolidado setor gastronômico regional.

3.1.1.3. *Vegetação*

Sua tipologia climática é o reflexo das variedades vegetais encontradas na ilha, que é em boa parte ocupada pela Mata Atlântica. Embora ainda possua grandes áreas com vegetação não violada, houve ocupações desordenadas devido à urbanização da cidade e à difusão da monocultura canavieira. Portanto, a representatividade da vegetação original vem reduzindo bastante nos últimos anos (SUDENE, 1978; VARELA, 2010).

De acordo com a Agencia Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM) (1987), outro tipo de ecossistema que tem grande representatividade no território da ilha são os manguezais, que ocupam uma área de cerca de 36,3 km², com espécies como os mangues vermelhos, brancos, o botão e os mangues Saraíba, como mostrado na Figura 3.4 (a e b).

Figura 3.4 – Espécies de manguezal comuns na ilha: mangue vermelho (a); mangue branco (b).



Fonte: Varela (2010).

Assim como a Mata Atlântica, os manguezais também têm sofrido bastante em função da urbanização. Segundo a Agência Pernambucana de Meio Ambiente (CPRH), diversos tipos de impactos ambientais têm sido identificados afetando a paisagem natural da ilha nas últimas décadas, como a deposição irregular de resíduos sólidos e o lançamento de esgoto (CPRH, 2001; PORTELA, 2019).

Na encosta analisada, na região mais central da ilha, não se observa a presença de cobertura de Mata Atlântica, que, para Almeida (2011) e Portela (2019), vem sendo substituída gradativamente por uma vegetação mais rasteira ou pelo agrossistema do Coco-da-Bahia.

3.1.1.4. Relevo e geologia

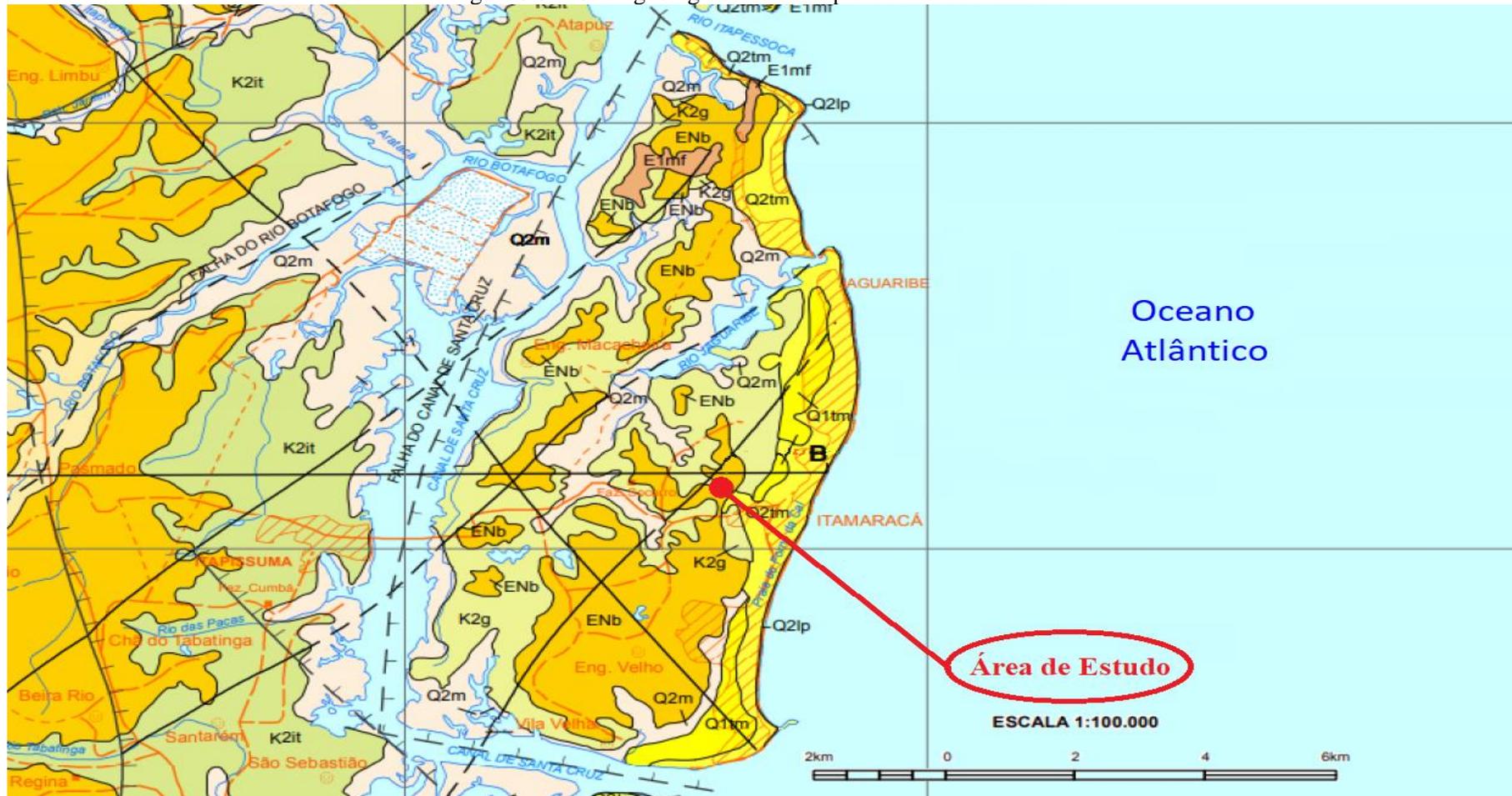
O relevo encontrado na ilha é uma consequência das inúmeras formações ocorridas na unidade geoambiental que a constitui, sendo caracterizada por litoral arenoso, com forte presença de restingas, dunas e mangues (LIMA; GONÇALVES; SCHMIDT, 2017). Nas regiões mais internas da ilha, é mais comum observar a dominância dos tabuleiros de planície costeira na parte norte, bem como a formação de encostas e relevos colinosos na região sul (VARELA, 2010; PORTELA, 2019).

A geologia da ilha do município está inserida na Baixada Litorânea, uma das unidades geoambientais que formam a Bacia Paraíba, que abrange uma extensão litorânea da Falha de Itabaiana, no Litoral sul da Paraíba, até o início da Bacia Pernambuco, litoral norte de Pernambuco (NASCIMENTO-SILVA *et al.*, 2011).

A Bacia Paraíba é uma faixa estreita do sul do litoral do estado da Paraíba e norte de Pernambuco, ocupando uma área de cerca de 7600 km² (continente), 31400 km² (oceano) e 3 km de profundidade. O início de seu processo de formação se deu em conjunto com outras unidades geológicas, como os Depósitos Marinhos Holocênicos, Formações Beberibe, Itamaracá, Maria Farinha, Gramame e Barreiras (TÁVORA; DIAS; FERNANDES, 2016).

A ilha é predominantemente formada pela união dos Terraços Marinhos Holocênicos e pelas Formações Barreiras e Gramame. Segundo dados da CPRH (2001), diferentemente da Formação Barreiras, as outras duas unidades geológicas sofreram grande influência marinha em seu surgimento. Os Terraços Marinhos cobrem quase que a totalidade da orla (costa leste da ilha) e a Formação Gramame ocupa, junto com a Barreiras, as partes interiores (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Carta geológica do município da Ilha de Itamaracá.



RELAÇÕES TECNO-ESTRATIGRÁFICAS

Q2m Depósitos de mangue:	Q2tm Terraços marinhos holocênicos	E1mf Formação Maria Farinha	ENb Grupo Barreiras
Q2lp Depósitos litorâneos de praias	Q1tm Terraços marinhos pleistocênicos	K2g Formação Gramame	K2it Formação Itamaracá

Fonte: Adaptado de CPRM (2014b).

A área de estudo está inserida na unidade transicional da Formação Barreiras, que é caracterizada pela presença de arenitos conglomeráticos com seixos de quartzo, intercalações de blocos de argila e estratificação cruzada tabular (LAFAYETTE, 2006). A Formação tem espessura bem variável, fenômeno que acontece em função da superfície irregular do embasamento cristalino, que apresenta elevada discordância erosiva angular (VARELA, 2010).

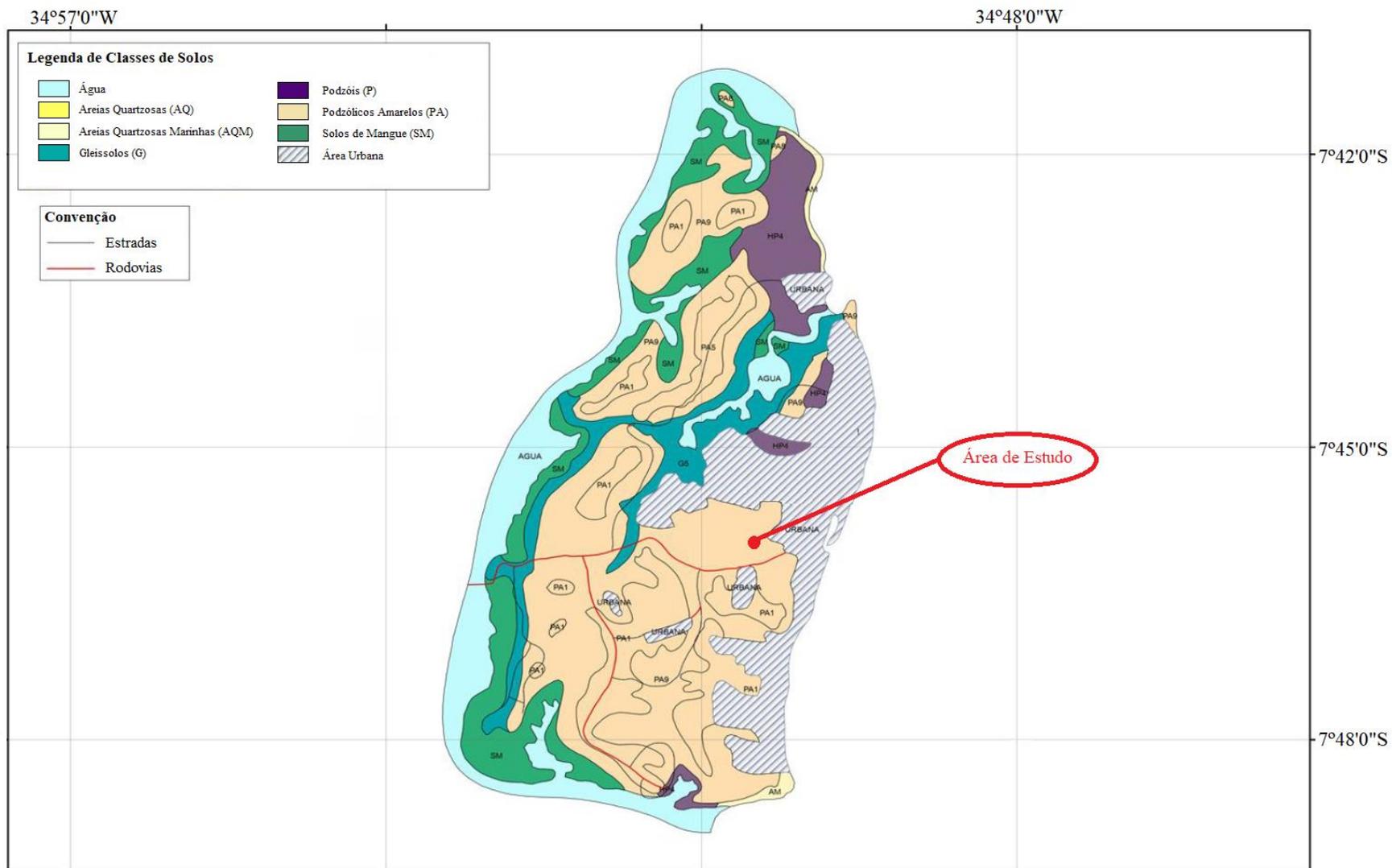
3.1.1.5. Solos

Os solos que compõem a Ilha de Itamaracá podem ser facilmente identificados por meio das três paisagens: as regiões costeiras (praias), as internas (encostas) e os mangues. As regiões costeiras são formadas por praias com areia quartzosa marinha (Gleissolos); as áreas de mangue formam os Espodossolos, e as regiões mais internas, de encostas, apresentam solos podzóico amarelos (Argissolos) (CPRM, 2014a).

Foi observada a presença de solos podzóico-amarelos no primeiro horizonte/camada da encosta em que se situa a área de estudo (Figura 3.6). De modo geral, os argissolos variam bastante entre suas camadas, um comportamento que se intensifica com o teor de argila, que aumenta com a profundidade (AMORIM, 2016).

Como são solos essencialmente minerais, apresentam texturas e colorações fortes (brumada, amarelada, avermelhada, etc.). Devido à variância, que podem apresentar em suas características (mineralogia, morfologia, etc.), os argissolos requerem investigação geotécnica minuciosa, uma vez que tendem a demonstrar comportamento erodível (CPRM, 2014a).

Figura 3.6 – Carta dos solos do município da Ilha de Itamaracá.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2006).

3.1.2. Determinação dos níveis de susceptibilidade a desastres ambientais

A investigação dos riscos ambientais, seguiu as diretrizes da metodologia *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), uma técnica de avaliação qualitativa para processos produtivos. Sua aplicação viabiliza a redução de falhas, visto que é uma ferramenta de gestão de riscos com enfoque preventivo (WENCESLAU; ROCHA, 2012).

Além disso, a técnica foi escolhida pois consiste na utilização dos parâmetros abordados no estudo de Nascimento *et al.* (2019), que adaptaram os critérios utilizados por Stamatis (2003) focando nos parâmetros de maior relevância para ambientes urbanos de encosta

O emprego do FMEA na problemática dos impactos ambientais permite a identificação de problemas em potencial, assim como suas causas e seus efeitos. É uma metodologia direcionada para a quantificação desses parâmetros de risco em um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) e auxilia na correta tomada de decisões para mitigar ou eliminar os riscos que afligem o objeto de estudo (STAMATIS, 2003).

No desenvolvimento de uma análise com o FMEA se faz necessária a consideração das atividades descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Etapas para implantação do FMEA adaptado.

Etapa	Atividades
1 ^a	Definição dos ambientes a serem considerados.
2 ^a	Levantamento dos aspectos e impactos ambientais dos diversos ambientes definidos na fase de planejamento.
3 ^a	Identificação dos aspectos e impactos ambientais dos demais ambientes.
4 ^a	Elaboração da tabela FMEA que fixa os índices de criticidade.
5 ^a	Identificação das causas dos aspectos/impactos ambientais.
6 ^a	Identificação dos controles atuais de detecção das falhas ou causas.
7 ^a	Determinação do Índice de Risco Ambiental (IRA).
8 ^a	Determinação da ordem de prioridade nas ações.

Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.* (2019).

Os parâmetros de avaliação dos impactos ambientais apresentam três níveis de risco, que variam de baixo a alto, indicando um peso para a determinação do Índice de Risco Ambiental (IRA) que acomete a área (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Variáveis de análise.

Parâmetros	Grau Baixo – Peso (1)	Grau Médio – Peso (2)	Grau Alto – Peso (3)
Ocorrência de impactos ambientais (O)	Semestralmente ou anualmente	Mensalmente	Diariamente
Índices de gravidade (G)	Impacto ao ambiente em longo prazo - anos	Impacto ao ambiente em curto prazo - meses	Impacto imediato ao ambiente e a saúde das pessoas
Deteção de impactos ambientais (D)	Para detectar o impacto ambiental é necessária a utilização de métodos sofisticados	O impacto ambiental é percebido com a utilização de análises simples (mapas temporais, ensaios in situ)	O impacto ambiental pode ser percebido visualmente
Abrangência dos impactos ambientais (A)	O impacto ambiental é localizado	O impacto ambiental afeta os limites da região	O impacto ambiental afeta regiões vizinhas

Fonte: Nascimento *et al.* (2019).

O IRA é obtido através dos pesos estimados para cada um dos quatro parâmetros adotados, fornecendo uma escala de relevância de cada impacto ambiental (WENCESLAU; ROCHA, 2012). O resultado do IRA determina a gravidade do efeito negativo. Segundo Nascimento *et al.* (2019), cada impacto será categorizado de acordo com a capacidade de percepção, sendo maior a pontuação quanto maior for a sua incidência. A identificação e a classificação dos impactos que afligem área de estudo foram realizadas por meio de visitas técnicas à localidade.

Uma vez realizado o diagnóstico dos níveis de risco, foi proposto um estudo de estabilização do solo da área investigada, com incorporação de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) e Resíduo de Madeira da Construção Civil (RMC), na tentativa de mitigar os efeitos associados aos processos erosivos.

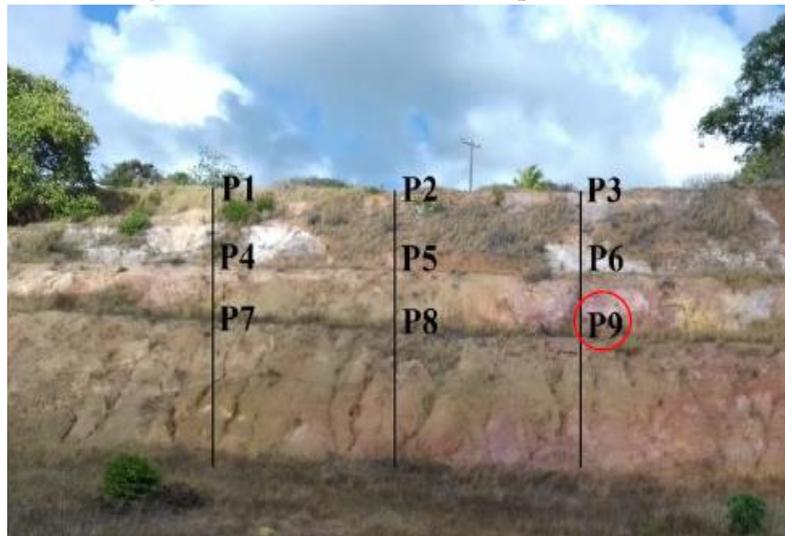
3.1.3. Determinação e coleta dos materiais

3.1.3.1. Solo

O solo foi coletado no ponto P9, como mostrado na Figura 3.7, identificado no segundo patamar de uma encosta no município da Ilha de Itamaracá/PE. O ponto P9 se encontra nas coordenadas 7° 46' 9" Sul e 34° 50' 28" Oeste, onde foram obtidos cerca de 200 kg de material e armazenados em bombonas plásticas no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI).

Os processos de coleta e de amostragem seguiram o especificado pelas NBR 6457/2016 (ABNT, 2016a) e NBR 9604/2016 (ABNT, 2016e), e foi formado, em sua totalidade, por amostras deformadas, visto que, para a execução de técnicas de estabilização granulométrica do solo, faz-se necessário a mistura e homogeneização dos materiais do compósito em análise.

Figura 3.7 – Encosta selecionada para o estudo.



Fonte: Nascimento (2019).

3.1.3.2. RCD

A amostra de agregado reciclado de RCD foi obtida na usina de Beneficiamento de resíduos da construção civil Ciclo Ambiental, no município de Camaragibe-PE. A empresa é pioneira no tratamento dos RCD e é referência no mercado regional. A forma como os RCD chegam à empresa seguem procedimentos de triagem rigorosos, que consistem em:

- Entrada do Material: com conferência de peso do veículo de transporte e credenciais do motorista;
- Pesagem: etapa em que é emitido um comprovante com as informações sobre a placa do caminhão, a quantidade de material e o tipo de RCD recebido;
- Separação comum e com eletroímã: através das esteiras do equipamento de britagem;
- Britagem: fase que constitui basicamente o processo de beneficiamento com separação por material, bitola e características.

Do material resultante do processo de beneficiamento, foram coletados cerca de 150 kg. Como não existem ensaios de caracterização específicos, os RCD passam pelos mesmos procedimentos utilizados para solos granulares, que vão desde a preparação de amostras até

ensaios mais complexos. Os RCD foram previamente caracterizados por Nascimento (2019) e Portela (2019).

3.1.3.3. RMC

As fibras de serragem da madeira, que constituem os RMC, são originárias dos resíduos de raspagem e serragem de tábuas de madeira *Pinus elliottii*, usadas na fase de estruturas de uma obra de construção residencial, ocorrida na cidade de Olinda/PE entre os meses de Janeiro/2018 e Fevereiro/2019.

Em função da ausência de normativa nacional referente a reciclagem de madeiras, foram seguidos os critérios da União Europeia, UE (2016), que fixa parâmetros para viabilizar o uso das madeiras para a reciclagem. Os RMC coletados não apresentaram a presença de contaminantes como restos de desmoldante, concreto e/ou tintas, configurando-os como aptos à reciclagem, como mostrado na Figura 3.8

Figura 3.8 – Fibras de serragem de tábuas de *Pinus elliottii* que formam o RMC.



Fonte: Autor.

As tábuas de *Pinus elliottii* da obra não passaram por processos de modificação físicos ou químicos, como a termorretificação da madeira. As fibras de serragem apresentaram comprimentos que variavam de 0,5 mm a 40 mm e foram homogeneizadas para incorporação por peso seco do solo.

3.1.3.4. Compósitos

Baseado nos resultados dos ensaios de caracterização mecânica (compactação e resistência à compressão simples) obtidos por Nascimento (2019), identificou-se que teores de 30% e 50% de inclusão de RCD ao solo demonstraram os melhores desempenhos e, portanto, foram selecionados para compor o quadro dos compósitos do presente trabalho.

Em relação aos RMC, todos os teores de incorporação foram elaborados com base nos percentuais apresentados por Silva (2005) e Santos (2009) que variavam de 0,5% a 6%. Estes valores foram inferiores aos de adição dos RCD em comparação com as observações de Montardo, Consoli, Prieto (2001), que identificaram valores limites baixos para o aumento da resistência com o acréscimo do teor das fibras (de serragem para o estudo). A Tabela 3.3 apresenta os teores de mistura dos compósitos estudados.

Tabela 3.3 – Identificação dos teores dos compósitos.

Identificação	Percentuais de Mistura	Referência
Solo	Solo 100%	Nascimento (2019)
S98,5M1,5	Solo 98,5% + RMC 1,5%	Autor
S97M3	Solo 97% + RMC 3%	Autor
RCD	RCD 100%	Nascimento (2019)
S70R30	Solo 70% + RCD 30%	Nascimento (2019)
S70R28,5M1,5	Solo 70% + RCD 28,5% + RMC 1,5%	Autor
S70R27M3	Solo 70% + RCD 27% + RMC 3,0%	Autor
S50R50	Solo 50% + RCD 50%	Nascimento (2019)
S50R48,5M1,5	Solo 50% + RCD 48,5% + RMC 1,5%	Autor
S50R47M3	Solo 50% + RCD 47% + RMC 3,0%	Autor

3.2. Etapa 02 – Programa experimental

A segunda parte da metodologia está relacionada à apresentação dos ensaios laboratoriais, que tratam desde a determinação das características físicas dos compósitos formados por solo+RCD+RMC a mecânicas dos compósitos solo+RCD+RMC e solo+RMC.

3.2.1. Caracterização física

Os ensaios e procedimentos descritos nessa sessão foram realizados para os quatro compósitos dos quais os RMC fizeram parte, sendo executados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI).

3.2.1.1. *Preparação de amostras*

Seguindo os procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016a), as amostras de solo e RCD foram preparadas passando por procedimentos básicos como secagem prévia, destorroamento, determinação do teor de umidade (com auxílio de estufa) e peneiramento na peneira de malha # 4,8 mm.

Como os RMC foram coletados com as fibras de serragem em estado final, foi realizada a homogeneização de todo o material antes de prosseguir para a próxima etapa. Os compósitos foram preparados em peso do solo seco, sendo os percentuais aplicados para cada 1 kg de determinada mistura.

3.2.1.2. *Granulometria*

A determinação da curva granulométrica seguiu os procedimentos descritos nas normativas nacionais NBR 7181 (ABNT, 2017b) e NBR 6502 (ABNT, 1995), além da normativa americana ASTM D2487/17 (ASTM, 2017).

3.2.1.3. *Densidade real dos grãos e limites de consistência*

Os ensaios de determinação da densidade real dos grãos referente aos compósitos, foram realizados seguindo as diretrizes da NBR 6458 (ABNT, 2016b). A massa específica dos grãos consiste no valor médio de todos os tipos de partículas dos minerais, que constituem a fase sólida do material em análise.

Os limites de Atterberg, podem ser descritos como os estágios de transição (teores de umidade) entre as fases sólida, semi-sólida, líquida e plástica do solo. Na investigação geotécnica dos solos, somente os Limites de Liquidez e Plasticidade são utilizados porque tornam possível a determinação do Índice de Plasticidade do solo.

Na determinação do limite de liquidez (ponto de transição entre o estado líquido e plástico), foram seguidas as diretrizes da NBR 6459 (ABNT, 2017a). Para o limite de plasticidade (ponto de transição entre o estado plástico e semi-sólido), foi utilizada de referência a NBR 7180 (ABNT, 2016c).

3.2.2. Caracterização mecânica

Para determinar os parâmetros mecânicos dos compósitos, foram realizados ensaios de compactação e resistência à compressão simples, executados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI) e no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), respectivamente.

3.2.2.1. Curva de compactação

A metodologia utilizada foi descrita na NBR 7182 (ABNT, 2016d). Tanto as determinações para o solo, RCD e compósitos (solo + RCD) estudados por Nascimento (2019) quanto os compósitos com RMC fizeram uso da energia Proctor normal.

3.2.2.2. Resistência à compressão simples (RCS)

Para a determinação da resistência à compressão dos compósitos, seguiu-se o estabelecido pelas normativas da NBR 12770 (ABNT, 1992) e ASTM D4609/08 (ASTM, 2008). A moldagem dos corpos de prova foi executada sob as condições de umidade ótima dos compósitos com o objetivo de garantir o melhor grau de compactação.

Os corpos de prova (cilíndricos) foram moldados estaticamente nas dimensões de 100 mm x 50 mm (altura e diâmetro), em três camadas escarificadas entre si (garantindo melhor aderência interfases), utilizando uma prensa manual do Índice de Suporte Califórnia (CBR).

Cinco corpos de prova foram moldados para cada uma das quatro idades de rompimento (7, 28, 60 e 120 dias de cura), totalizando 140 amostras que foram mantidas em uma câmara úmida para preservar as condições observadas na curva de compactação (umidade ótima e densidade seca), aplicadas no processo de moldagem.

Foi realizado o controle tecnológico dos corpos de prova durante todo o seu processo de moldagem e rompimento. Este procedimento consiste no controle das dimensões, do teor de umidade e da densidade seca máxima visando a garantir maior fidedignidade aos resultados do ensaio (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Controle tecnológico dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Estipulou-se previamente que, caso algum corpo de prova apresentasse desconformidade com os critérios de aceitação (Tabela 3.4), ele seria descartado e outro corpo de prova seria moldado. Para o rompimento e determinação da RCS, foi utilizada uma prensa de mecânica Ronald Top S/A, configurada na velocidade de 1 mm/min, como especificado pela ASTM D5102/09 (ASTM, 2009) para compósitos de solo.

Tabela 3.4 – Critérios de aceitação (controle tecnológico).

Densidade Seca Máxima (GC)	$GC = \frac{\text{Densidade após a Moldagem } (\frac{g}{cm^3})}{\text{Densidade Seca Máxima } (\frac{g}{cm^3})} = 100\% \pm 3,0\%$
Teor de Umidade (%)	Umidade Ótima $\pm 3,0\%$
Dimensões (mm)	$\pm 1,0\%$ do Diâmetro $\pm 1,0\%$ do Comprimento

Fonte: Adaptado de Guedes (2013).

3.2.3. Análise estatística dos resultados da RCS

Para o desenvolvimento dos estudos de estabilização do solo, a correta definição dos teores de inclusão dos materiais estabilizantes é de imprescindível importância quando se deseja uma efetiva intervenção no solo. Como afirmam Güllü e Fedakar (2017), uma abordagem incorreta nessa fase do estudo pode acarretar grandes problemas do ponto de vista da otimização das proporções.

Nesse contexto, o uso de metodologias que visam a identificar a melhor solução para a incorporação de materiais no solo é de extrema importância, principalmente em se tratando de

estudos de larga escala. Ainda segundo Güllü e Fedakar (2017), em metodologias que abordam proporções ideais dos materiais, o nível de contribuição de cada variável independente é alterado de maneira individual, enquanto que os outros fatores/variáveis independentes são mantidos constantes. Na prática, esse procedimento tomaria muito tempo, além de elevar demais os custos, por isso a aplicação de modelagem estatística foi imprescindível.

Nesse sentido, a metodologia *Response Surface Methodology* (RSM) apresentou-se como solução mais viável, pois, de acordo com Güllü e Fedakar (2017), em estudos de estabilização de solos onde existe a necessidade de manufaturar corpos de prova, esse método se destaca. O RSM consiste na utilização dos resultados obtidos durante a fase de ensaios de laboratoriais e, tomando-os como base, na apresentação da otimização do sistema (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009). Segundo Olgun (2013) e Güneyisi *et al.* (2014), o método é bastante benéfico para ajudar na tomada de decisões em estudos dessa natureza, pois apresenta a composição mais adequada em tempo hábil.

A metodologia RSM consiste em uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas para otimizar projetos (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009; GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017). Segundo Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), o RSM permite avaliar o efeito que variáveis independentes podem causar em uma variável de saída (dependente ou de resposta).

De acordo com Nordin *et al.* (2004), esse conjunto de técnicas se destaca de outras metodologias experimentais devido à quantidade relativamente baixa de ensaios e testes para avaliar múltiplos parâmetros e suas interações. Nos últimos anos, essa metodologia tem cada vez mais crescido em aplicação em estudos de estabilização de solos (SEN; SWAMINATHAN, 1997; GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017).

Segundo Sen e Swaminathan (1997), a aplicação dos métodos consiste no desenvolvimento de um *design* experimental, da modelagem matemática e da verificação de adequação do modelo estatístico. A primeira fase consiste na análise do efeito de cada uma das variáveis independentes na performance do sistema.

Ainda em conformidade com Sen e Swaminathan (1997) e Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), como a análise tende a ser realizada de forma simultânea, já que é praticamente impossível estudar os diferentes níveis de efeito que todos os parâmetros vão ter no sistema, foi

escolhido o *Central Composite Design*, uma das classes de *designs* de segunda ordem mais populares para esses tipos de dados.

A forma geral das variáveis independentes utilizadas no modelo quadrático completo foi identificada com base na análise dos parâmetros obtidos no estudo de estabilização do solo, em que a resistência à compressão simples (RCS) foi a variável dependente e os teores de incorporação de RCD, RMC e o tempo de cura (TC) corresponderam às variáveis independentes. As relações entre as variáveis independentes foram calculadas por meio de: a) análise de variância; b) testes realizados para distribuição probabilística dos dados; e c) verificação do potencial de influência dos mesmos na RCS (SCHOEFS; LE; LANATA, 2013; GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017).

De acordo com DeLouch e Ulbrich (2007), essa verificação funciona por meio da aferição dos níveis de significância (Valor-P) de cada uma das variáveis independentes e de suas interações, que não devem ser superiores a 0,05. Ainda, é analisada a diferença entre o R^2 Ajustado e o R^2 Previsto, que não deve ser superior a 20% (0,2). Realizada essa conferência, a concepção do modelo matemático empírico pode tomar forma.

A modelagem matemática empírica foi necessária para se estabelecer as relações das variáveis independentes (RCD, RMC e TC) com a variável dependente, pois, se o modelo indicasse um bom ajuste, a análise tenderia a resultados satisfatórios (GÜLLÜ; FEDAKAR, 2017).

Com a finalização da modelagem, deu-se seguimento à terceira e última fase da análise, que foi a checagem da adequação do modelo. Essa etapa consistiu na investigação da adequação do modelo ao comportamento experimental do estudo de estabilização do solo, em que foram determinadas as taxas de variação média entre os resultados experimentais e os obtidos pelo modelo, determinando suas limitações.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos nas fases de desenvolvimento da pesquisa são apresentados nesse capítulo. Foram avaliados os níveis de susceptibilidade a riscos ambientais na área de estudo e as caracterizações físicas e mecânicas, além das análises estatísticas e dos efeitos das inclusões de RCD e RMC na matriz estrutural do solo.

As análises laboratoriais do presente estudo foram comparadas aos resultados de Nascimento (2019), de modo que o compósito S70R30 serviu de referência para os compósitos S70R28,5M1,5 e S70R27M3, e o compósito S50R50 foi a base de referência para os compósitos S70R48,5M1,5 e S70R47M3.

4.1. Susceptibilidade a riscos ambientais (FMEA)

A realidade encontrada na a região evidencia a contínua ação de processos erosivos, efeitos que, segundo Bezerra (2018), podem ter sido agravados em função da forte atividade extrativista (de saibro) que foi posta em prática na região durante os anos 90. Foram observados resquícios de intervenções corretivas para manter a estabilidade da encosta e conter o avanço da erosão, que ocorreu por meio de cortes realizados no talude.

Além dos impactos provenientes da erosão, foi observada grande supressão do trecho de mata atlântica na região. A Figura 4.1 (a e b) demonstra a ação erosiva na parte mais central da encosta, que é intensa no patamar central e vai se amenizando no patamar inferior, além da degradação da vegetação na região de estudo.

Figura 4.1 – Impactos ambientais decorrentes da erosão (a) e degradação vegetal (b).



Fonte: Nascimento (2019).

O estudo quantitativo dos níveis de risco ambiental, realizado com o auxílio do FMEA, é apresentado na Tabela 4.1. Observa-se que os impactos ambientais com maiores efeitos são a supressão vegetal e a erosão.

Tabela 4.1 – Análise quantitativa dos riscos ambientais.

Parâmetros dos Impactos Ambientais			Resultados				
Impactos ambientais	Efeitos	Possíveis causas	O	G	D	A	Total
Supressão vegetal (SV)	Solo exposto; redução da taxa de infiltração pluvial	Novas construções; abertura de vias de acesso	3	3	2	2	10
Poluição do Meio Natural (PMN)	Acúmulo de resíduos nas bermas da encosta; Obstrução de galerias e drenos;	Coleta pública ineficiente; carência na educação ambiental da população	0	0	0	0	0
Redução da biodiversidade (RB)	Desvalorização turística; fragilização do ecossistema	Expansão das áreas urbanas; falta de fiscalização e planejamento ambiental	2	1	2	3	8
Urbanização Irregular (UI)	Esgotamentos sanitário deficiente; Contaminação da água; impermeabilização da cobertura natural	Falta de fiscalização e planejamento ambiental; carência na educação ambiental da população	1	1	1	1	4
Processos erosivos (PE)	Movimento de massas de solo; Redução da capacidade do solo em suportar cargas;	Alterações na estrutura do solo; solo exposto	3	3	3	3	12

Legenda: O – Ocorrência de impactos ambientais; G – Índices de Gravidade; D - Detecção de Impactos Ambientais; A – Abrangência dos Impactos Ambientais.

Fonte: Autor.

Verificou-se a incidência de cinco tipologias de impacto ambiental na região, com alguns impactos indicando níveis de risco máximo. As análises foram executadas em dois grupos: um para os impactos com efeitos mais severos (supressão vegetal e processos erosivos) e outro para os demais impactos (urbanização irregular, poluição do meio natural e redução da biodiversidade).

Cabe ressaltar que a encosta estudada é uma área privada, não sendo apropriada por edificações habitacionais. Isso caracteriza a encosta como atípica, pois, no geral, as mesmas são ocupadas por construções irregulares e sem controle urbanístico (Santos *et al.*, 2019).

4.1.1. Processos erosivos e supressão vegetal

Com identificado na Figura 4.1 (a e b), o patamar inferior da encosta da área de estudo se encontra tomado pela presença de sulcos de carreamento dos finos do solo, um forte indicativo da ocorrência de processos erosivos. Apesar do recente processo de corte/retaludamento, a evidente falta de manutenção tem acelerado a erosão.

Portela (2019) e Bezerra (2018) também identificaram esse comportamento erosivo/dispersivo para os solos da primeira camada do ponto P5 e da terceira camada do ponto P2, que eram, respectivamente, uma areia argilo-siltosa (SM) e uma areia argilosa.

Além do comportamento dispersivo identificado para esse solo, outro fator de grande influência nos processos erosivos é o impacto da supressão vegetal (SV). A vegetação rasteira encontrada na região denota a forte supressão que ocorreu na área, que também foi muito impactada pela extração de saibro.

Segundo Fernandes (2015), a redução da cobertura vegetal torna o solo menos consistente, acelerando o intemperismo do local. Esse processo degradante reduz a capacidade de carga do solo, além de restringir as taxas de absorção de água pluvial. Esse processo facilita o carreamento de finos devido ao aumento do escoamento superficial, resultando nos sulcos de erosão.

Foram conferidas pontuações de 10 e 12 pontos para o IRA dos impactos provenientes da supressão vegetal (SV) e dos processos erosivos (PE), respectivamente. Essas pontuações elevadas, para um máximo de 12 pontos, denotam a influência desses impactos nos níveis de risco ambiental à encosta.

Silva *et al.* (2019) mostram que, em regiões de encosta, os efeitos negativos da supressão vegetal (SV) servem como indicativo da ocorrência de processos erosivos (PE). Logo, quando impacto da SV recebe nota elevada, espera-se que o IRA em processos erosivos apresente tendência semelhante.

Resultados aproximados foram identificados por Santos, Silva e Lafayette (2019) em uma encosta ocupada irregularmente no bairro de Dois Unidos, Recife/PE, que demonstrou altos níveis de risco ambiental em função da supressão vegetal, da deposição irregular de resíduos sólidos e dos processos erosivos.

4.1.2. Urbanização irregular, poluição do meio natural e redução da biodiversidade

Foi observada reduzida presença de urbanização irregular (UI) à área, fato intimamente ligado às jazidas de saibro que funcionavam na localidade. Apesar de apresentar a 15ª densidade demográfica do estado, cerca de 328,17 hab/km² (IBGE, 2010), e boa parte da sua população ser de baixo poder aquisitivo, as construções mais próximas não acrescentam riscos significativos à área.

A pontuação conferida à tipologia UI foi de 4 pontos, de um total de 12 possíveis, para o Índice de Risco Ambiental (IRA), denotando prioridade baixa para a gestão dos efeitos nocivos desse impacto na localidade. Segundo Cremiato *et al.* (2018), em análises qualitativas dessa natureza, resultados indicando efeitos mínimos são consequência de um dos seguintes fatores: ou o objeto de estudo passou por recentes intervenções positivas ou a metodologia não apresenta um bom ajuste para a finalidade pretendida.

Como as atividades extrativistas de saibro interferiram no processo de ocupação, irregular ou não, a efetividade do método de análise se evidencia. Resultados similares foram encontrados por Nascimento *et al.* (2019), que estudou o conjunto de encostas urbanas que formam a Ladeira do Giz no bairro de Águas Compridas em Olinda/PE.

Os efeitos do impacto da poluição do meio natural (PMN) apresentaram pontuação zero para o IRA, indicando que não foram percebidas interferências a níveis que elevem o risco ambiental na localidade. Esse resultado traz fortes indicativos de intervenções corretivas, visto que a área é atualmente administrada privativamente.

A análise do impacto de redução da biodiversidade (RB) obteve IRA de 8 pontos, de um total de 12 pontos, configurando um nível de risco ambiental de mediano para alto. Como a ilha de Itamaracá é afetada pela presença de pequenos rios, além de ser cercada pelo mar, ela possui uma biodiversidade vegetal (mangues e mata atlântica) e animal (espécies marinhas) muito grande, fazendo com que qualquer tipo de efeito nocivo, por menor que seja, possa provocar danos irreparáveis.

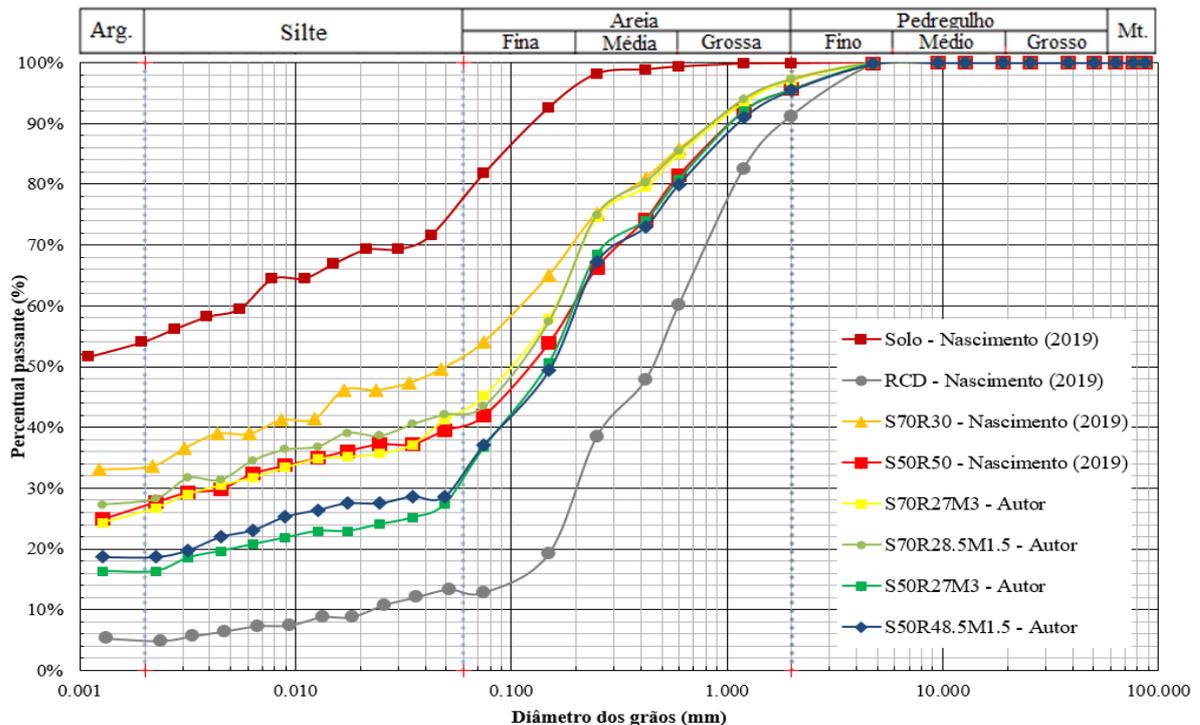
Nascimento *et al.* (2019) utilizaram a metodologia FMEA para estudar a localidade da Ladeira do Giz, em Olinda/PE, e incluíram como impacto ambiental “Invasão de áreas protegidas”, que tem efeitos nocivos similares a redução da biodiversidade (RB). Esse impacto foi pontuado com nota 6. No entanto, o quadro geral de impactos é pior que o verificado na presente pesquisa.

Mesmo em se tratando de uma encosta urbana que possui crescimento ocupacional acelerado, na qual essa classe de resultado é teoricamente esperada, a Ilha de Itamaracá se beneficia economicamente de sua biodiversidade por meio do turismo. Conseqüentemente, o risco ambiental tem maior peso na análise, dado que afetará a região econômica e socialmente.

4.2. Granulometria

Segundo Lafayette (2006) a análise das curvas granulométricas é a investigação mais estudada na engenharia geotécnica, principalmente para solos que apresentam comportamento erodível, devido à textura e ao diâmetro dos grãos afetarem o mecanismo de erosão dos solos. As curvas granulométricas estão apresentadas na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos materiais.



Segundo Nascimento (2019), o comportamento das curvas do solo e dos RCD se apresentam bastante distintos, sendo o solo formado predominantemente por argila (54,06%) e os RCD por areia (77,42%). A Tabela 4.2 apresenta os percentuais de solo encontrados nos materiais.

Tabela 4.2 – Percentuais de argila, silte, areia e pedregulho de cada amostra.

Identificação das amostras	Argila	Silte	Areia			Pedr.	Relação Silte/Argila	Referência
			Fina	Média	Grossa			
Solo	54,06	22,03	19,91	3,31	0,55	0,14	0,4	Nascimento (2019)
RCD	5,01	8,83	16,16	43,99	17,27	8,74	1,8	
S70R30	33,54	16,07	21,39	14,40	11,88	2,72	0,5	
S50R50	28,01	14,12	26,67	16,57	11,81	2,82	0,5	
S70R27M3	26,24	16,17	25,59	17,09	12,47	2,44	0,6	Autor
S70R28,5M1,5	26,28	12,52	22,22	23,91	10,70	4,37	0,5	
S50R47M3	18,67	13,41	27,92	19,97	15,46	4,57	0,7	
S50R48,5M1,5	16,00	15,30	29,70	19,80	14,67	4,57	1,0	

Não foi possível determinar o diâmetro efetivo (D_{10}) para o solo e para os compósitos. No entanto, para os RCD, foi obtido o valor de 0,023 mm. Os coeficientes de curvatura (C_C) e uniformidade (C_U) foram 2,67 e 24,00, respectivamente.

O solo e os compósitos foram classificados de acordo com a ASTM D2487/17 (ASTM, 2017), que define os critérios do Sistema Unificado de Classificação dos solos (SUCS). Assim, foi verificado que a adição dos RMC aos compósitos conferiu frações de maiores granulometrias ao material, conforme demonstrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Classificação SUCS.

Identificação das amostras	Classificação SUCS	Referência
Solo	Argila de alta plasticidade (CH)	Nascimento (2019)
RCD	Areia bem graduada (SW)	
S70R30	Argila inorgânica de baixa plasticidade (CL)	
S50R50	Areia argilosa mal graduada (SC)	
S70R27M3	Areia argilosa mal graduada (SC)	Autor
S70R28,5M1,5	Areia argilosa mal graduada (SC)	
S50R47M3	Areia argilosa mal graduada (SC)	
S50R48,5M1,5	Areia argilosa mal graduada (SC)	

O solo foi identificado como uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH), que se caracteriza pela alta capacidade de se deformar sob a ação de cargas. Os RCD apresentaram comportamento similar ao de uma areia, por ser um material de matriz granular. Macedo, Lima e Lafayette (2014) verificaram o mesmo fenômeno para as curvas granulométricas em compósitos de solo e agregado reciclado de RCD nos percentuais de incorporação de 25%, 50% e 75%.

O compósito S50R50 e todos os compósitos estabilizados com RMC foram classificados como uma areia argilosa (SC). Apenas o compósito S70R30, que foi classificado como uma argila de baixa plasticidade (CL), apresentou uma variação mais branda em relação ao solo (CH). Essa redução na plasticidade apresentada pelos materiais foi percebida a partir do aumento das frações de areia e pedregulho no compósito.

As inclusões de RMC aos compósitos com 70% de solo provocaram redução das frações de argila e aumento dos percentuais de areia (fina, média e grossa). Os compósitos preparados com 50% de solo mantiveram essa mesma tendência. Entretanto, foi verificada diferença em relação à fração de areia média, na qual os RMC provocaram redução.

Segundo Teixeira *et al.* (2010), a relação silte/argila serve como indicador do estágio de intemperismo de solos de regiões tropicais, de modo que valores inferiores a 0,6 para os de textura argilosa, conferem grau de intemperismo mais acentuado. Diante do exposto, verificou-se que apenas os RCD e os compósitos S50R47M3 e S50R48,5M1,5 apresentam melhor resultado frente à relação silte/argila.

4.3. Densidade real dos grãos e limites de consistência

A Tabela 4.4 apresenta os resultados do ensaio de densidade real dos grãos do solo, RCD e compósitos. Dos valores obtidos, os menores foram verificados para os RCD e o compósito S50R50, sendo 2,61 para ambos.

Tabela 4.4 – Densidades reais dos grãos dos materiais e compósitos.

Identificação das amostras	Densidade real	Referência
Solo	2,73	Nascimento (2019)
RCD	2,61	
S70R30	2,66	
S50R50	2,61	
S70R27M3	2,63	Autor.
S70R28,5M1,5	2,65	
S50R47M3	2,62	
S50R48,5M1,5	2,62	
S98,5M1,5	2,70	
S97M3	2,69	

A incorporação de RCD ocasiona alterações na densidade do material, visto que o teor de incorporação de 30% para os RCD provoca redução de 3% na densidade real do solo, enquanto que o teor de 50% gera redução de 4%. De acordo com Guedes (2013), essa redução pode ser

explicada devido ao teor de minerais na estrutura dos grãos do solo, que tendem a reduzir à medida que a incorporação dos RCD aumenta.

Verifica-se na Tabela 4.4 que os RMC, quando incorporados individualmente ao solo, causaram variações da ordem de 1,09% e 1,46% na densidade real, consistindo em uma variação muito discreta de acordo com Kavitha *et al.* (2019). Segundo Zhao *et al.* (2019), isso se deve à natureza intrínseca das fibras, rica em componentes químicos como celulose, cinzas e lignina, substâncias que apresentam pouca ou nenhuma interferência na propriedade avaliada. Logo, a variação se deu em função da redução percentual de solo.

Conforme aumentou-se o teor das fibras de RMC no compósito preparado com 70% de solo, verificou-se a redução da densidade real do material. Contudo, para a incorporação das fibras no compósito com 50% de solo, a densidade real aumentou de 2,61 para 2,62, independentemente do teor de RMC. Resultados similares foram relatados por Repsold e Casagrande (2015), que estudaram compósitos de solo argiloso (CH) e pó de MDF nos teores de 3% de incorporação.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, apresentados na Tabela 4.5, foi possível definir os valores dos Índices de Plasticidade (IP) dos compósitos de RMC.

Tabela 4.5 – Limites de consistência

Identificação	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação	Referência
Solo	53,28	21,75	31,53	Altamente Plástico	Nascimento (2019)
RCD	NL	NP	-	Não Plástico	
S70R30	36,87	20,72	16,15	Altamente Plástico	
S50R50	31,68	20,69	10,99	Medianamente Plástico	
S70R28,5M1,5	29,85	19,49	10,36	Medianamente Plástico	Autor.
S70R27M3	32,01	18,64	13,37	Medianamente Plástico	
S50R48,5M1,5	33,46	17,09	16,37	Altamente Plástico	
S50R47M3	29,56	20,50	10,06	Medianamente Plástico	
S98,5M1,5	38,98	21,17	17,81	Altamente Plástico	
S97M3	39,52	24,21	15,31	Altamente Plástico	

Devido ao seu comportamento granular, os RCD foram classificados como não líquidos (NL) e não plásticos (NP), o que impossibilitou a determinação do IP. Segundo Nascimento (2019), os compósitos S70R30 e S50R50 apresentaram percentuais de índice de plasticidade inferior ao registrado para o solo, com reduções de 49% e 65% respectivamente.

Em relação ao limite de plasticidade, Nascimento (2019) verificou que a incorporação de RCD no solo proporcionou pequenas reduções, sendo que o LP do solo reduziu de 21,75 para 20,72, com o teor de 30% de RCD, e para 20,69, no teor de 50%. Cunha (2018) observou variações semelhantes do LP entre as incorporações de 40% e 50% de RCD à uma argila de alta plasticidade do sudoeste de Sergipe.

A incorporação dos diferentes teores de RMC nos compósitos com solo + RCD provocaram a redução dos limites de plasticidade, de modo que o compósito preparado com 70% de solo passou de altamente plástico para medianamente plástico ao serem incorporados teores de 1,5% e 3% de RMC. O compósito com 50% de solo, classificado como medianamente plástico, manteve o mesmo comportamento com a inclusão de 3% de RMC, mas, ao ser adicionado 1,5%, o material passou a ser classificado como altamente plástico.

Os compósitos formados apenas por solo e RMC apresentaram resultados similares para as incorporações de 1,5% e 3,0%, com ambas amostras sendo classificadas como altamente plásticas. Para o LL os valores foram de 38,98% e 39,52% para 1,5% e 3,0% de RMC, respectivamente, sendo os valores mais próximos do solo.

Segundo Silva (2005) e Santos (2009), o aumento do LL nos compósitos reforçados com RMC é resultado da capacidade que as fibras possuem de reter umidade, tornando necessária maior incorporação de água na preparação dos compósitos. Contudo, nos ensaios realizados, esse aumento no percentual do limite de liquidez foi verificado somente para o compósito S50R48,5M1,5.

4.4. Compactação

Os valores de densidade seca máxima e umidade ótima se encontram descritos na Tabela 4.6 e as curvas de compactação são apresentadas na Figura 4.3. Foi verificado que a curva de compactação do solo apresentou um comportamento diferente das demais, devido à área específica dos grãos do solo ser a menor.

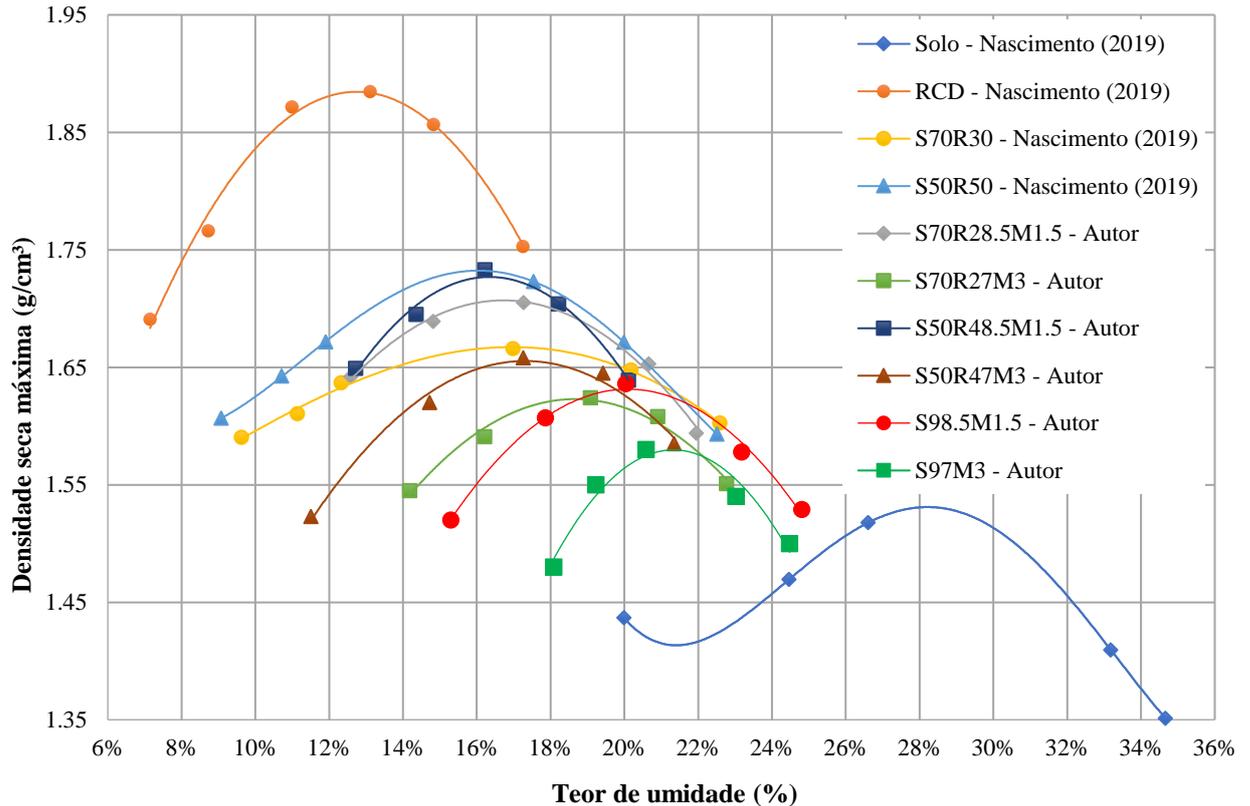
Tabela 4.6 – Parâmetros das curvas de compactação.

Identificação das amostras	Densidade Seca Máxima (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)	Referência
Solo	1,53	28,19	Nascimento (2019)
RCD	1,89	12,69	
S70R30	1,68	16,95	
S70R28,5M1,5	1,71	16,70	

Tabela 4.6 – Parâmetros das curvas de compactação (continuação).

S70R27M3	1,62	18,70	Autor.
S50R50	1,73	16,02	
S50R48,5M1,5	1,73	16,30	
S50R47M3	1,66	17,30	
S98,5M1,5	1,63	20,1	
S97M3	1.59	21,3	

Figura 4.3 – Curvas de compactação.



Nascimento (2019) verificou que os valores encontrados para os RCD se devem à natureza granular do material, que dificulta a retenção de umidade, elevando sua densidade seca máxima e reduzindo o teor de umidade ótima. Macedo (2013) e Pivetta (2017) identificaram altas taxas de absorção de água para o RCD, corroborando o comportamento granular encontrado.

Foi observado por Nascimento (2019) que a incorporação dos RCD no solo aumentou a densidade seca máxima, à medida que apresentou redução na umidade ótima. Segundo o autor, esse resultado pode ser explicado pela melhoria na graduação do solo. Comportamento semelhante foi observado no estudo de Sharma e Hymavathi (2016), que investigaram a resistência à compressão simples (RCS) em compósitos de RCD, cinzas volantes e uma argila de alta plasticidade do norte da Índia.

Todavia, os RMC contribuíram diretamente para a retenção de água nos compósitos, elevando o teor de umidade ótima. Conforme Conte *et al.* (2014), a madeira *Pinus elliottii* possui considerável capacidade de reter umidade e esse comportamento continua até que ela atinja seu valor de saturação.

Observa-se na Figura 4.3 que, à medida que o teor de RMC se eleva, todos os compósitos demonstram reduções nas suas densidades secas máximas. Segundo Meena, Sahu e Ayothiraman (2019), esse resultado é esperado, pois, uma vez que a quantidade de água ocupa os vazios dos corpos de prova aumenta, o peso total dos compósitos se reduz eventualmente.

A retenção de umidade nos compósitos formados por RCD e RMC é governada pelo teor de RMC, onde a incorporação de 1,5% praticamente mantém os valores de densidade seca máxima e aumentam os valores de umidade ótima. No teor de 3% de RMC, verifica-se o mesmo comportamento para umidade ótima, que, entretanto, provoca redução na densidade seca máxima.

Segundo Santos (2009), a diferença observada nos resultados de densidade seca máxima nos compósitos reforçados com as fibras é justificada em função da saturação do RMC, que foi alcançada mais rapidamente para as misturas de 1,5%. Similaridades foram observadas no estudo de Silva (2005), que confeccionou blocos de solo-cimento com adições de 0,5%, 1%, 2% e 3% das madeiras *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*.

4.5. Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foi realizado para determinar o comportamento médio das curvas de tensão (kPa) x deformação axial (mm). O procedimento foi realizado para as idades de rompimento de 07, 28, 60 e 120 dias. A Tabela 4.7 apresenta os resultados para todos os materiais e a Figura 4.4 descreve o comportamento da RCS para os materiais estudados por Nascimento (2019).

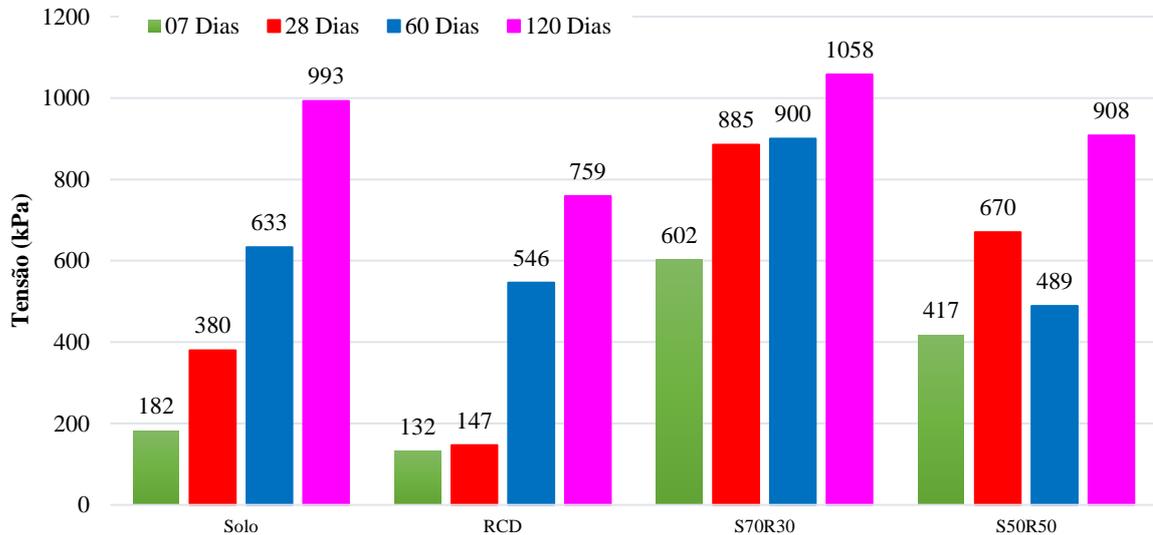
Tabela 4.7 – Resistência à compressão máxima.

Identificação das amostras	7 Dias	28 Dias	60 Dias	120 Dias	Referência
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	
Solo	182	380	633	993	Nascimento (2019)
RCD	132	147	546	759	
S70R30	602	885	900	1058	
S50R50	417	670	489	908	
S70R28,5M1,5	287	424	504	1288	
S70R27M3	195	331	415	949	Autor

Tabela 4.7 – Resistência à compressão máxima (continuação).

S50R48,5M1,5	195	203	605	1019	Autor
S50R47M3	108	333	500	933	
S98,5M1,5	534	653	1012	1195	
S97M3	408	1377	1388	1405	

Figura 4.4 – Comparação da resistência à compressão entre os materiais e compósitos com RCD.



Fonte: Nascimento (2019).

Nascimento (2019) observou que o solo, por ser altamente plástico, suportou maior deformação, cerca de 15%, em comparação aos outros materiais. Durante a execução do ensaio de RCS para o solo, foram observados trechos de comportamento elástico e plástico bem definidos, sem evidências de pico de tensão. A RCS aos 28 dias sofreu incremento de 108% em relação aos 7 dias de cura.

Para os 60 e 120 dias de cura, foram observadas taxas elevadas de acréscimo na resistência dos para quase todos os materiais, com destaque para o solo que apresentou acréscimos de resistência consideráveis em relação aos 7 dias de cura, sendo 633 kPa e 993 kPa para os 60 e 120 dias de cura, respectivamente. De acordo com Nascimento (2019), tal comportamento era esperado uma vez que o solo é considerado uma pozolana natural e, segundo a ASTM C618 (ASTM, 2015), essa característica lhe confere resistência ao longo do tempo.

Resultados similares foram encontrados para as areias silto-argilosas dos estudos de Mirzababei *et al.* (2012) e Sudhakaran, Sharma e Kolathayar (2018), que observaram deformações maiores na fase inicial do ensaio de RCS, até a quase estagnação da resistência máxima no trecho plástico, também sem picos de tensão.

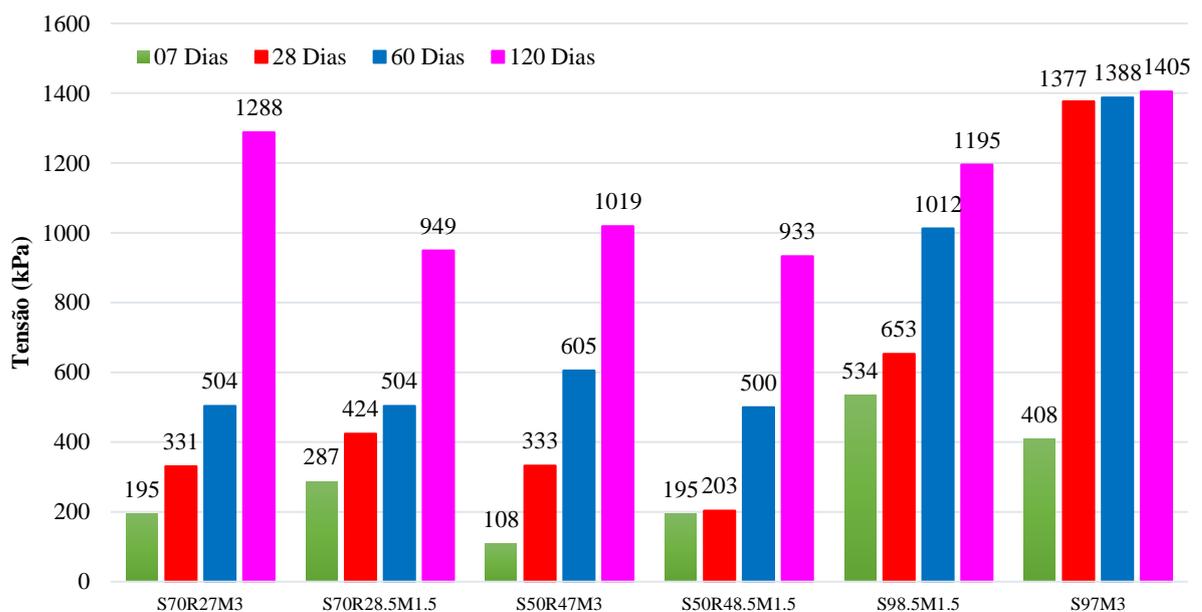
De acordo com Nascimento (2019), os RCD apresentam comportamento esperado de um solo granular de baixa compressibilidade, com variação quase imperceptível na RCS. Para as duas idades de cura (7 e 28 dias), o mesmo demonstrou picos de ruptura bem definidos, indicando comportamento frágil e rigidez para os corpos de prova em oposição ao solo natural.

Na incorporação de RCD no solo, Nascimento (2019) verificou aumento significativo na resistência, registrando percentuais de crescimento de 231% e 129% em relação ao solo, somente para os 7 dias de cura, nas inclusões de 30% e 50% de RCD, respectivamente. À medida que os corpos de prova chegaram às idades de 60 dias e 120 dias de cura, as taxas de crescimento praticamente triplicaram em todos os compósitos.

Tal comportamento nos compósitos S70R30 e S50R50 se deu em função da incorporação dos RCD, pois eles trouxeram melhor conformação entre as partículas do solo, gerando melhor compacidade na matriz estrutural, além de reduzirem a deformabilidade e conferirem comportamentos de ruptura frágil.

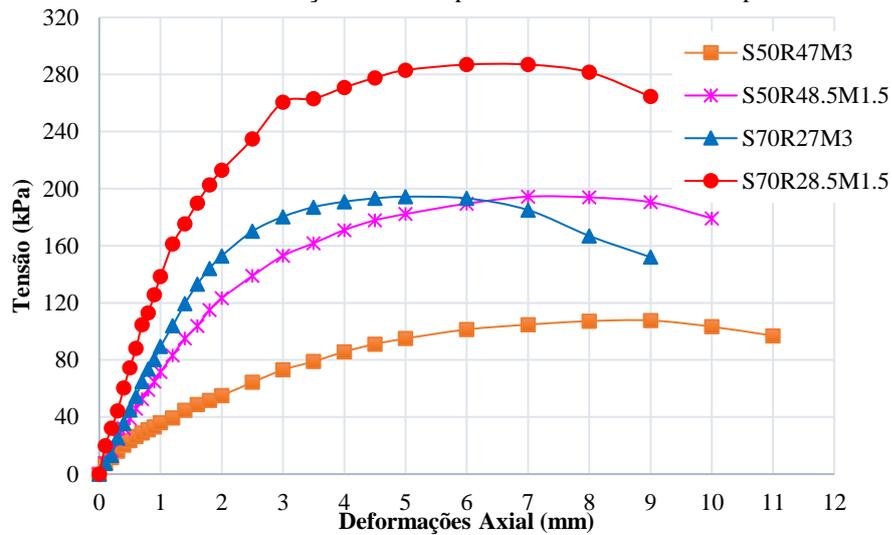
As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os valores de RCS máxima e as curvas de tensão x deformação dos compósitos com incorporação de RCD e RMC obtidos durante a realização dos ensaios, para 7 e 28 dias de cura.

Figura 4.5 – Comparação da resistência à compressão entre os compósitos com RCD e RMC.



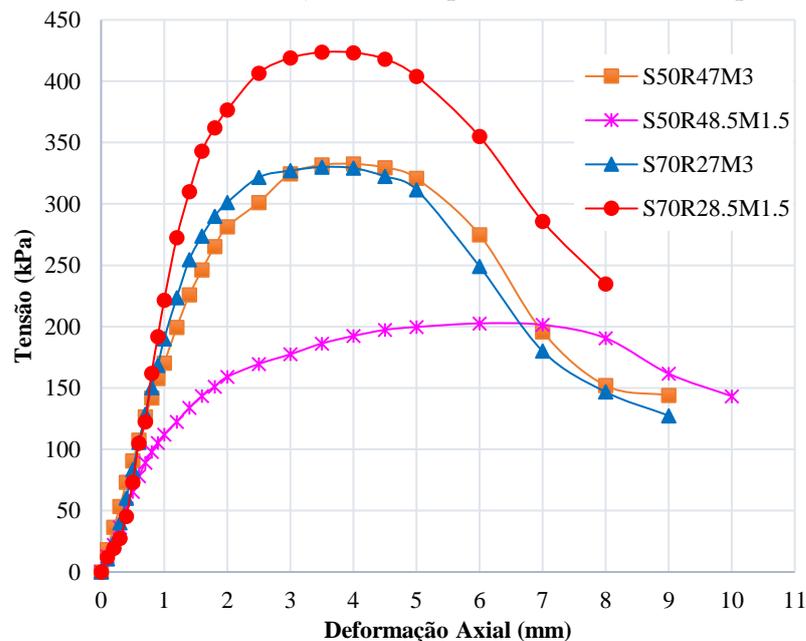
Fonte: Autor.

Figura 4.6 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos de RCD e RMC para 7 dias de cura.



Fonte: Autor.

Figura 4.7 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos de RCD e RMC para 28 dias de cura.



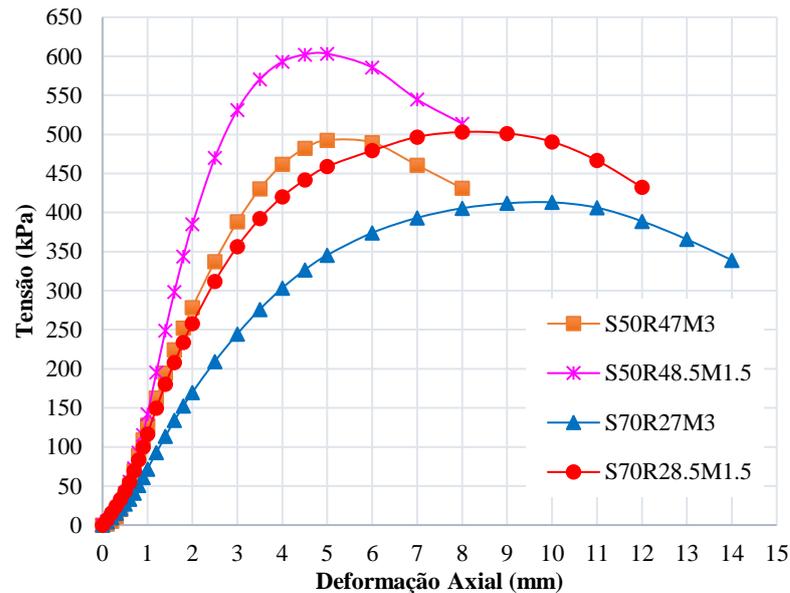
Fonte: Autor.

Aos 28 dias de cura, o compósito S70R28,5M1,5 aumentou em praticamente 50% o valor da RCS se comparado à resistência aos 7 dias. Segundo Consoli, Moraes e Festugato (2013), esse comportamento está ligado a dois fatores: crescimento considerável das reações pozolânicas dos RCD com o solo (aos 28 dias) e enrijecimento contínuo das interfaces próximas às fibras dos RMC, que perdem umidade à medida em que o tempo passa.

O deslocamento máximo aplicado aos compósitos com RMC foi de 11 mm, para a idade de 7 dias, e 10 mm, para os 28 dias, já que, à medida que a idade de cura aumentou, os corpos de

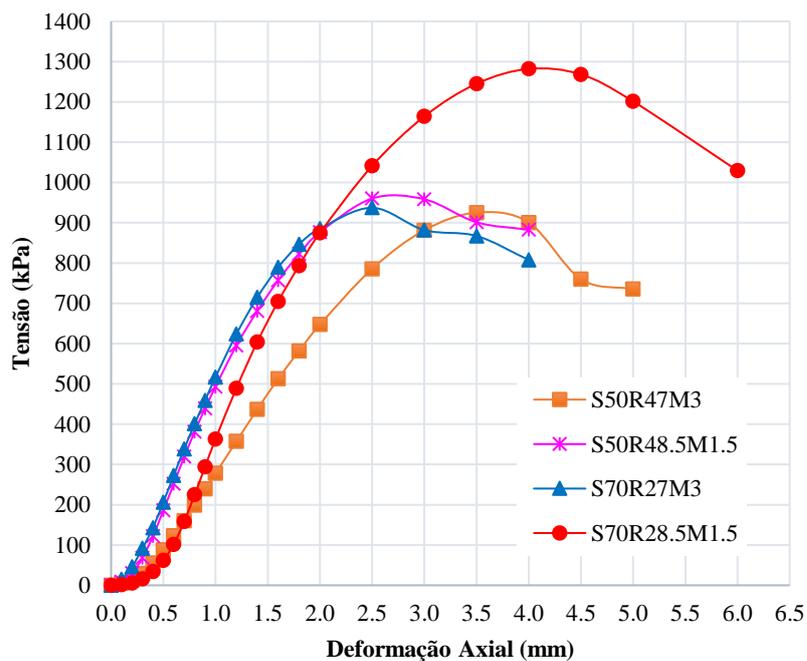
prova apresentaram redução na capacidade de deformar sob a ação de cargas axiais. Bouhicha, Aouissi e Kenai (2005) descrevem que essas reduções se devem à capacidade que materiais de origem orgânica, como os RMC, possuem de reter e atrair a umidade na matriz estrutural do compósito. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as curvas dos compósitos com incorporação de RCD e RMC obtidos no ensaio para 60 e 120 dias de cura.

Figura 4.8 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos de RCD e RMC para 60 dias de cura.



Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos de RCD e RMC para 120 dias de cura.

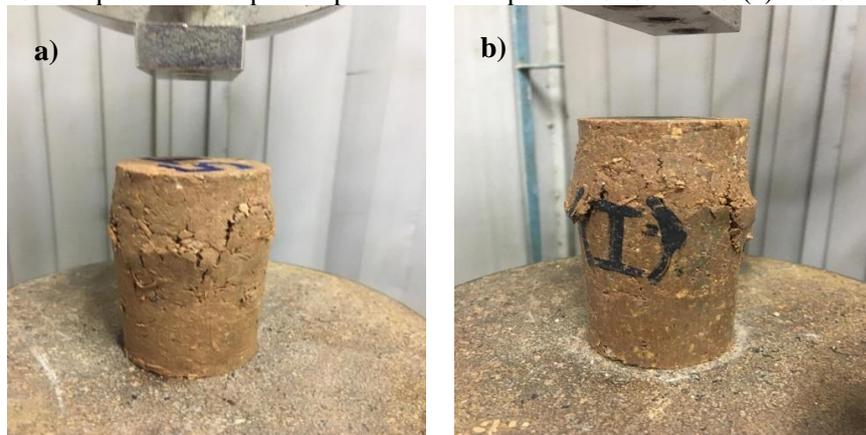


Fonte: Autor.

Aos 60 dias de cura, os compósitos formados por 70% de solo praticamente mantiveram os níveis de deformação apresentados aos 28 dias, enquanto aqueles compostos por 50% de solo apresentaram reduções de cerca de 30% para ambos os teores de incorporação de RMC. Contudo, aos 120 dias de cura, foram verificados decréscimos consideráveis para todos os compósitos, com os corpos de prova alcançando rupturas com apenas 4 mm de deslocamento. Segundo Li e Yang (2020), a redução gradativa da plasticidade apresentada pelos compósitos acontece devido ao aumento da rigidez dos corpos de prova.

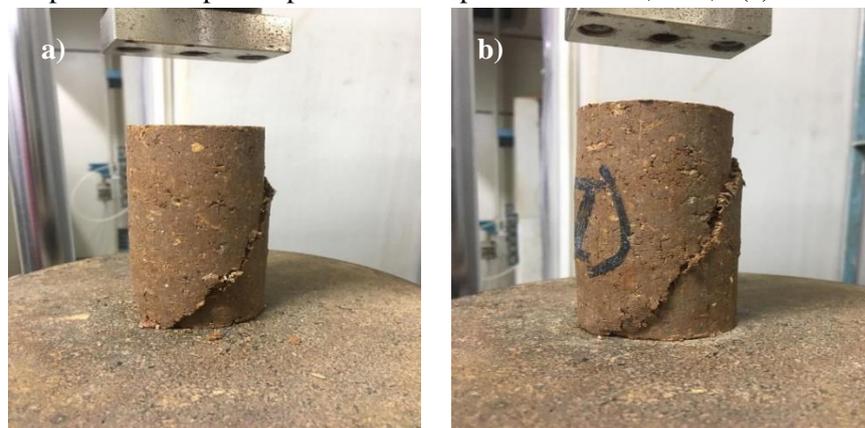
Ao final do ensaio de RCS, os corpos de prova de 7 dias de cura não apresentaram plano de ruptura bem definido. Entretanto, a partir dos 28 dias de cura, foram evidenciadas rupturas bem definidas nos corpos de prova, que demonstraram o comportamento clássico de materiais rígidos (ruptura tipo frágil). A Figura 4.10 (a e b) mostra o rompimento dos compósitos S70R27M3 e S50R47M3 aos 7 dias de cura e a Figura 4.11 (a e b) apresenta o resultado dos compósitos S70R28,5M1,5 e S50R28,5M1,5 aos 28 dias.

Figura 4.10 – Ruptura dos corpos de prova dos compósitos S70R27M3 (a) e S50R47M3 (b).



Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Ruptura dos corpos de prova dos compósitos S70R28,5M1,5 (a) e S50R48,5M1,5 (b).

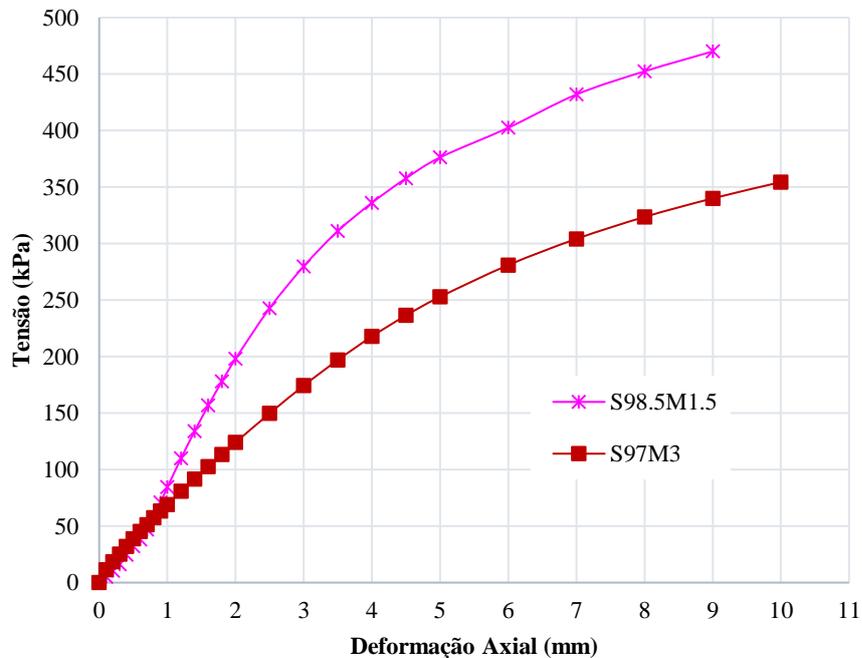


Fonte: Autor.

Os planos de ruptura com ângulos da ordem de 60° , observados aos 28 dias e nos subsequentes tempos de cura, caracterizam ruptura cisalhada, ou seja, há ausência de deformações plásticas no material. Portela (2019) evidenciou comportamentos similares para rupturas de compósitos preparados com solo e RCD de 7 a 120 dias de cura.

Para os compósitos formados por solo e RMC, foi possível identificar resultados elevados de resistência já nos estágios iniciais da análise, com 534 kPa e 408 kPa somente para os 7 dias de cura, nas incorporações de 1,5% e 3,0%, respectivamente. Quando comparados com o valor da RCS do solo, no mesmo período de tempo, ambos os compósitos praticamente dobram o valor de resistência. A Figura 4.12 apresenta as curvas dos compósitos de solo e RMC obtidos no ensaio, para 7 dias de cura.

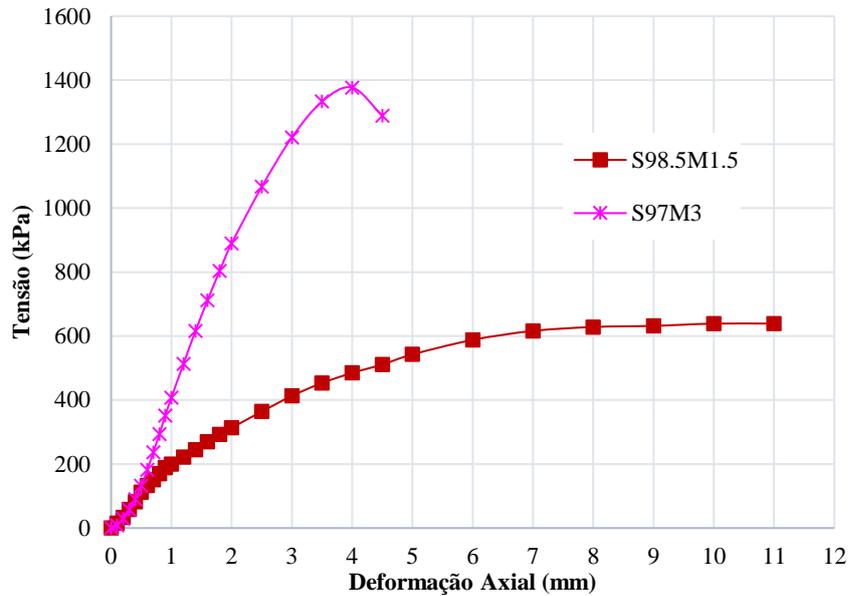
Figura 4.12 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos de solo e RMC para 7 dias de cura.



Fonte: Autor.

Aos 7 dias de cura, ambos os compósitos de solo e RMC não apresentaram comportamento pico de tensão e/ou rupturas bem definidas, apesar de valores relativamente elevados se comparado aos demais materiais nas mesmas condições. Contudo, aos 28 dias, esse comportamento mudou para o compósito S97M3, que apresentou pico de tensão com apenas 4% de deformação, atingindo 1377 kPa de RCS (Figura 4.13), sendo o maior valor entre todos os compósitos para o mesmo tempo de cura.

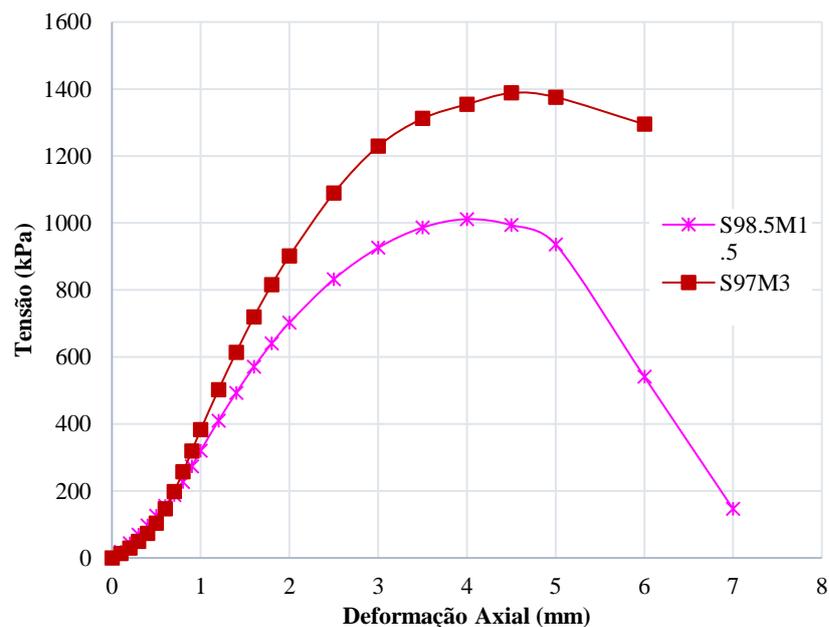
Figura 4.13 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos de solo e RMC para 28 dias de cura.



Fonte: Autor.

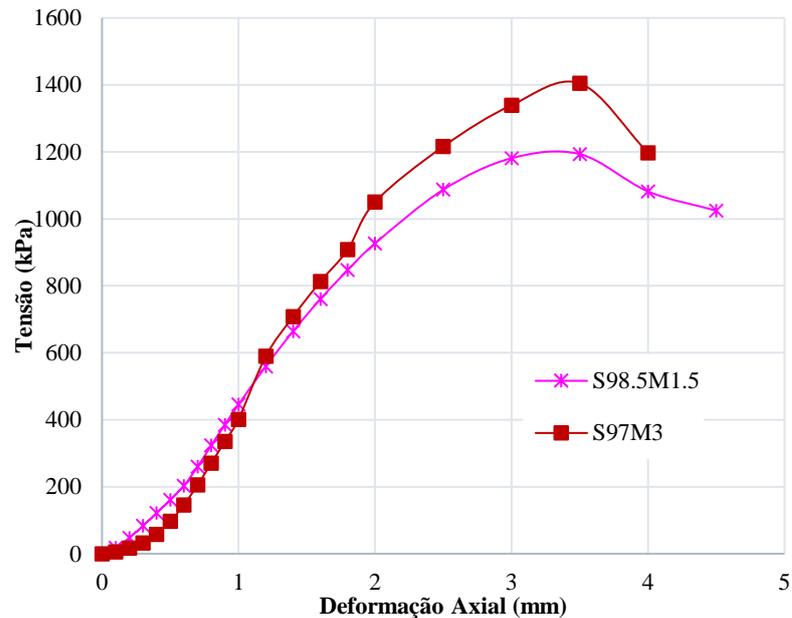
De acordo com Maleksaeedi *et al.* (2020), esse comportamento pode ser devido a: secagem contínua das interfaces próximas as fibras do RMC, que continuam a perder umidade em função da absorção e de possíveis variações do grau de compactidade do compósito. Resultado similar foi encontrado por Rahgozar, Saberian e Li (2018), em solo marginal da província de Isfahan no Iran. As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam as curvas dos compósitos solo e RMC obtidos no ensaio de RCS, para 60 e 120 dias de cura em câmara úmida.

Figura 4.14– Curvas de tensão x deformação dos compósitos de solo e RMC para 60 dias de cura.



Fonte: Autor.

Figura 4.15– Curvas de tensão x deformação dos compósitos de solo e RMC para 120 dias de cura.



Fonte: Autor.

Assim como os demais materiais, os compósitos praticamente mantiveram as deformações verticais aos 60 dias de cura, e reduziram em mais de 60% quando analisados para os 120 dias. Entretanto, diferentemente dos compósitos formados por solo, RCD e RMC, todos os corpos de prova com solo e RMC apresentaram comportamento de pico e rupturas clássicas no decorrer do ensaio.

No compósito de apenas solo e 3,0% de RMC, foram observados os maiores valores de resistência, com cerca de 1400 kPa, valor que praticamente se manteve dos 28 aos 120 dias de cura. Todavia, o teor de 1,5% apresentou crescimentos sucessivos até os 120 dias de cura, atingindo 1195 kPa para o desempenho máximo da RCS. Resultado similar foi apresentado no estudo de Rahgozar, Saberian e Li (2018), que realizou ensaios de RCS para 7, 14, 28 e 120 dias de cura, com incorporações de cinza de casca de alho e cimento em uma areia argilosa.

Verificou-se que, aos 28 dias de cura (Figura 4.7), para os compósitos S50R47M3 e S50R48,5M1,5, os valores da RCS decresceram em relação aos compósitos S70R27M3 e S70R28,5M1,5. Uma vez que se reduziu o teor de RCD nos compósitos a RCS aumentou, independente da retenção de umidade que o RMC conferiu ao material. Porém, nas incorporações de solo + RMC os compósitos apresentaram resultados positivos em relação ao solo natural.

Quanto ao comportamento das curvas de tensão x deformação axial dos compósitos, é seguro dizer que os RCD exercem maior influência no crescimento da RCS que o RMC, nos compósitos com solo + RCD + RMC. Assim, verifica-se que, até os 120 dias de cura, os RCD contribuem com o aumento da rigidez do compósito, que de acordo com Sharma e Hymavathi (2016), é o resultado das reações pozolânicas do material.

A ASTM D4609/08 (ASTM, 2008) definiu critérios de aceitação mínimos para estabilizações de solo com incorporações de materiais alternativos, sendo o valor de 345 kPa a referência para à RCS. Desse modo os resultados encontrados nesse estudo, para os compósitos com e sem RMC, foram comparados a esses parâmetros, conforme apresentado nas Tabela 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 – Efetividade de estabilização dos compósitos (7 e 28 dias de cura).

Identificação das amostras	7 dias		28 dias		Referência
	(kPa)	Aceitação	(kPa)	Aceitação	
S70R30	602	Sim	885	Sim	Nascimento (2019)
S50R50	417	Sim	670	Sim	
S70R28,5M1,5	287	Não	424	Sim	Autor.
S70R27M3	195	Não	331	Não	
S50R48,5M1,5	195	Não	203	Não	
S50R47M3	108	Não	333	Não	
S98,5M1,5	534	Sim	653	Sim	
S97M3	408	Sim	1377	Sim	

Tabela 4.9 – Efetividade de estabilização dos compósitos (60 e 120 dias de cura).

Identificação das amostras	60 dias		120 dias		Referência
	(kPa)	Aceitação	(kPa)	Aceitação	
S70R30	900	Sim	1058	Sim	Nascimento (2019)
S50R50	489	Sim	908	Sim	
S70R28,5M1,5	504	Sim	1288	Sim	Autor.
S70R27M3	415	Sim	949	Sim	
S50R48,5M1,5	605	Sim	1019	Sim	
S50R47M3	500	Sim	933	Sim	
S98,5M1,5	1012	Sim	1195	Sim	
S97M3	1388	Sim	1405	Sim	

Diante do exposto, verificou-se que o compósito S70R28,5M1,5 obteve o melhor resultado para a resistência à compressão, se comparado aos compósitos formados por solo, RMC e RCD. Todavia, todos os compósitos constituídos apenas de solo + RMC e solo + RCD foram aprovados nos critérios estabelecidos da ASTM D4609/08 (ASTM, 2008).

Os melhores desempenhos para a resistência à compressão simples foram identificados para as compósitos formados por S70R30, para os compósitos de (solo + RCD), e S97M3 para os compósitos de solo + RMC, resultado que também se aplica para todos os outros materiais estudados.

4.6. Análise estatística (RCS)

Determinados os valores de RCS para todos os materiais, realizou-se a modelagem estatística para descrever o comportamento da RCS. Para identificação do teor do compósito mais viável tecnicamente, foram definidos os parâmetros de maior influência no valor final da resistência. Segundo o modelo apresentado por Güllü e Fedakar (2017), o tempo de cura dos corpos de prova (TC) e os teores de inclusão dos materiais alternativos (RCD e RMC) são os fatores de maior influência para estudos de estabilização de solos (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Variáveis de análise selecionadas.

Parâmetro	Intervalo
Teor de RCD	0% a 100%
Teor de RMC	0% a 3%
Tempo de Cura (TC)	7 a 120 dias

Fonte: Autor.

Todas as interações experimentais entre as variáveis independentes (TC, RCD e RMC) e a variável de resposta (RCS) foram descritas na Tabela 4.11. Segundo Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), as interações entre as variáveis fornecem o ajuste do modelo estatístico, que está condicionado ao sucesso somente se as informações forem confiáveis. Na análise, a confiabilidade dos resultados foi conferida pelo controle tecnológico executado na moldagem dos corpos de prova.

Tabela 4.11 – Interações entre as variáveis independentes e de resposta.

RCD (%)	RMC (%)	Tempo de Cura (TC)				Referência
		07 Dias	28 Dias	60 Dias	120 Dias	
0	0	182	380	633	993	Nascimento (2019)
0	1,5	534	653	1012	1195	Autor
0	3,0	408	1377	1388	1405	Autor
27	3,0	195	331	415	949	Autor
28,5	1,5	287	424	504	1288	Autor
30	0	602	885	900	1058	Nascimento (2019)
40,4	0,078	534	586	1088	1181	Autor
47	3,0	108	333	500	1195	Autor

Fonte: Autor.

Tabela 4.11 – Interações entre as variáveis independentes e de resposta (continuação).

48,5	1,5	195	203	605	1019	Autor
50	0	417	670	489	908	Nascimento (2019)
90	10	378	488	547	824	Nascimento (2019)
100	0	132	147	546	759	Nascimento (2019)

Fonte: Autor.

A Tabela 4.12 apresenta os resultados encontrados pelo software para todas as interações aprovadas pelos critérios de aceitação. Foram excluídas 4 variáveis/interações (RMC*RMC, TC*TC, RCD*TC e RMC*TC) da formulação do modelo. Esse artifício foi necessário para garantir que o modelo fosse o mais próximo da realidade possível, atingindo assim melhores resultados.

Tabela 4.12 – Análise da variância entre as variáveis independentes.

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	5	4836302	967260	28,40	0,000
Linear	3	4736626	1578875	46,36	0,000
RCD	1	1460441	1460441	42,88	0,000
RMC	1	620593	620593	18,22	0,000
TC	1	3221299	3221299	94,59	0,000
Quadrados	1	229052	229052	6,73	0,013
RCD*RCD	1	229052	229052	6,73	0,013
Int. Dupla	1	843789	843789	24,78	0,000
RCD*RMC	1	843789	843789	24,78	0,000
Erro	42	1430365	34056		
Total	47	6266668			
R ² (Modelo)	0,772	R ² Ajustado (Modelo)	0,745	R ² Previsto (Modelo)	0,695

Fonte: Autor.

Os outros fatores apresentados na tabela como DF, Adj SS, Adj MS e Valor-F são medidas da amplitude de variação e da influência que as variáveis possuem na RCS, sendo a base para a determinação do Valor-P.

Foi observado que a influência dos teores de RCD e RMC, participando de duas interações cada um (RCD, RMC e RCD*RMC), praticamente ditam, positivamente, o comportamento do modelo. Todas as variáveis independentes aprovadas no critério de exclusão apresentaram valores muito abaixo do limite (Valor-P < 0,05), mostrando uma boa aderência para o modelo.

O valor de 77,2% encontrado para o R^2 indica um grau mediano de representação para o modelo no comportamento da RCS, conforme critérios definidos por Myers *et al.* (2009) e Güllü e Fedakar (2017) para estudos dessa natureza. Todavia, segundo DeLoach e Ulbrich (2007), a diferença entre os valores do R^2 Ajustado (74,5%) e do R^2 Previsto (69,5%) foi menor que 20% (6,71%), qualificando resultado como adequado.

Para Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), quando os valores do $R^2 < 95\%$ são encontrados em estudos com o *Central Composite Design*, há um indicativo de relativa simetria entre as variáveis independentes. Tal fato é observado na quantidade de pontos no intervalo da variável TC (apenas 7, 28, 60 e 120 dias) em relação ao RMC (0%, 0,078%, 1,5% e 3,0%) e RCD (0%, 27%, 28,5%, 30%, 40,4%, 47%, 48,5%, 50%, 90% e 100%), que varia muito entre cada um. O comportamento de regressão dos compósitos é apresentado no modelo da Equação 1.

$$RCS = 287,1 + 6,78 \times RCD + 145,4 \times RMC + 6,074 \times TC - 0,0863 * RCD * RCD - 6,01 * RCD * RMC \quad \text{eq. (1)}$$

Fonte: Autor.

Através da Equação 1, foi possível analisar o comportamento dos compósitos e prever os resultados da resistência à compressão simples a partir da variação dos teores de incorporação dos materiais (RCD e RMC) e do tempo de cura (TC). Com esse artifício, foi possível encontrar as quantidades necessárias para maximizar o valor da variável de resposta (RCS), conforme apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Variáveis de otimização do valor da RCS.

RCD (%)	RMC (%)	TC (Dias)	RCS (kPa)
7,62	2,61	120	1452,30

Fonte: Autor.

Entre as variáveis independentes, os RMC e o TC apresentaram valores praticamente iguais aos limites de seus intervalos (3,0% e 120 dias de cura, respectivamente), implicando na tendência de ambos a variar positivamente à medida que são incrementados. Contudo, os RCD, apesar de possuírem o maior intervalo de variação, ficaram próximos dos valores mínimos do seu intervalo, indicando que o seu incremento tende a aumentar a resistência dos compósitos até certo ponto.

Visando a verificar as limitações do modelo, foi verificada a sua capacidade de prever resultados para o quão próximo da realidade estão os resultados apresentados para a variável dependente (RCS). Para tanto, foram realizados testes com os valores dos compósitos existentes e ensaios laboratoriais complementares de RCS de um novo compósito (S59,52R40,4M0,078). A Tabela 4.14 demonstra os resultados para o teste de limitação e as taxas médias dos resultados experimentais e modelados da resistência à compressão simples (RCS).

Tabela 4.14 – Resultados de variação médias entre o modelo e os experimentos.

Resultados Experimentais				Resultados da Modelagem				Variação (%)	Variação Média (%)
RCD	RMC	TC	RCS	RCD	RMC	TC	RCS		
90	0	7	378	90	0	7	240,788	36,29947	33,20
40,4	0,078	7	534	40,4	0,078	7	455,0771	14,77957	
100	0	7	132	100	0	7	144,618	8,725055	
0	0	7	182	0	0	7	329,618	44,78457	
30	0	7	602	30	0	7	455,348	24,3608	
28,5	1,5	7	287	28,5	1,5	7	413,9233	30,66349	
27	3	7	195	27	3	7	399,1553	51,14683	
50	0	7	417	50	0	7	452,868	7,920189	
48,5	1,5	7	108	48,5	1,5	7	236,3213	54,29951	
47	3	7	195	47	3	7	46,4313	76,18908	
0	1,5	7	534	0	1,5	7	547,718	2,504574	
0	3	7	408	0	3	7	765,818	46,72363	27,06
90	0	28	488	90	0	28	368,342	24,52008	
40,4	0,078	28	586	40,4	0,078	28	582,6311	0,574901	
100	0	28	147	100	0	28	272,172	45,99004	
0	0	28	380	0	0	28	457,172	16,8803	
30	0	28	885	30	0	28	582,902	34,13537	
28,5	1,5	28	424	28,5	1,5	28	541,4773	21,69571	
27	3	28	331	27	3	28	526,7093	37,15699	
50	0	28	670	50	0	28	580,422	13,36985	
48,5	1,5	28	203	48,5	1,5	28	363,8753	44,21166	
47	3	28	333	47	3	28	173,9853	47,75216	
0	1,5	28	653	0	1,5	28	675,272	3,298226	20,25
0	3	28	1377	0	3	28	893,372	35,12186	
90	0	60	547	90	0	60	562,71	2,791847	
40,4	0,078	60	1088	40,4	0,078	60	776,9991	28,58464	
100	0	60	546	100	0	60	466,54	14,55311	
0	0	60	633	0	0	60	651,54	2,845566	
30	0	60	900	30	0	60	777,27	13,63667	
28,5	1,5	60	504	28,5	1,5	60	735,8453	31,50734	
27	3	60	415	27	3	60	721,0773	42,44722	
50	0	60	489	50	0	60	774,79	36,88612	
48,5	1,5	60	605	48,5	1,5	60	558,2433	7,728376	
47	3	60	500	47	3	60	368,3533	26,32934	

Tabela 4.14 – Resultados de variação médias entre o modelo e os experimentos (continuação).

0	1,5	60	1012	0	1,5	60	869,64	14,06719	20,25
0	3	60	1388	0	3	60	1087,74	21,63256	
90	0	120	824	90	0	120	927,15	11,12549	9,79
40,4	0,078	120	1181	40,4	0,078	120	1141,439	3,349782	
100	0	120	759	100	0	120	830,98	8,662062	
0	0	120	993	0	0	120	1015,98	2,261856	
30	0	120	1058	30	0	120	1141,71	7,331984	
28,5	1,5	120	1288	28,5	1,5	120	1100,285	14,57412	
27	3	120	949	27	3	120	1085,517	12,57624	
50	0	120	908	50	0	120	1139,23	20,29704	
48,5	1,5	120	1019	48,5	1,5	120	922,833	9,452078	
47	3	120	933	47	3	120	732,7933	21,45838	
0	1,5	120	1195	0	1,5	120	1234,08	3,166731	
0	3	120	1405	0	3	120	1452,18	3,248909	

Fonte: Autor.

Observa-se que os resultados experimentais apresentaram comportamentos muito similares às previsões feitas com o modelo. Essas variações entre os resultados demonstraram que existe uma melhor aderência do modelo à medida que a variável independente Tempo de Cura (TC) vai variando de 7 até 120 dias.

Mesmo com bons resultados acerca da aderência e do desempenho, o modelo apresentou essa limitação em função da variabilidade do tempo de cura. De acordo com Güllü e Fedakar (2017), essas diferenças de variabilidade média são em função do desvio padrão dos resultados da RCS, que apresentaram uma padronização maior entre os valores com tempos de cura mais elevados.

Diante do exposto, o modelo é melhor adequado para aplicação, nesse estudo de estabilização de solo, em tempos de cura mais elevados (como 60 e 120 dias de cura), viabilizando o compósito encontrado para a otimização do sistema (Tabela 4.13).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios realizados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A avaliação quantitativa dos níveis de risco ambiental demonstrou baixos níveis de risco em função dos impactos da deposição irregular de resíduos sólidos e construções próximas. Os maiores níveis para o Índice de Risco Ambiental foram identificados para a supressão vegetal e para a ação de processos erosivos, características inerentes às regiões de encosta.
- As curvas granulométricas dos compósitos apresentaram compatibilidade com as características dos materiais. Mesmo com incorporações de RCD da ordem de 50%, o solo, que é uma argila do grupo CH, não apresentou melhoria de gradação para ser classificado em relação à uniformidade dos grãos. Tal comportamento implica em maiores inclusões de RCD e RMC.
- Os RMC apresentaram reduzida influência no comportamento da granulometria dos compósitos, uma vez que sua inclusão resultou em pequenas variações das frações de silte e de areia fina dos compósitos.
- OS RCD praticamente impuseram a variação das curvas granulométricas nos compósitos. Foram classificados como uma areia bem graduada (SW), e influenciaram na variação do comportamento dos compósitos de argila de média plasticidade (CL) a uma areia argilosa (SC) nas incorporações de 30% e 50%, respectivamente.
- Os resultados da densidade real dos grãos demonstraram variações consideráveis para as incorporações de ambos os materiais na matriz do solo. OS RCD com reduções, para ambos os teores de incorporação, e o RMC demonstrando reduções mais discretas, em relação aos compósitos formados por solo + RCD e solo + RCD + RMC.
- Para os limites de consistência, os resultados indicaram redução do índice de plasticidade para todos os compósitos estudados. Entretanto, para o limite de liquidez, o RMC elevou consideravelmente em relação os pequenos teores utilizados.
- As curvas de compactação dos compósitos com RMC apresentaram comportamento intermediário em relação ao solo e aos RCD. Os RMC elevaram o teor de umidade devido a sua alta capacidade de reter de umidade.
- Tanto para os 7 quanto para os 28 dias de cura, as inclusões de RCD elevaram a RCS do solo, sendo o compósito S70R30 o de melhor desempenho. Os resultados da RCS para os compósitos formados por RMC revelaram que a retenção de umidade,

característica intrínseca da *Pinus elliottii*, propiciou aumentos consideráveis na RCS, para as idades de 60 e 120 dias, em todos os compósitos que variaram de 1,5% a 3,0%.

- A deformabilidade dos compósitos variou bastante com o envelhecimento dos corpos de prova. Aos 7 dias de cura, praticamente todos os compósitos apresentaram deformabilidade acima dos 10%, se aproximando do comportamento de materiais dúcteis. Porém, a partir dos 28 dias de cura, esse comportamento se alterou significativamente com reduções elevadas de deformabilidade, principalmente com as inclusões de RMC, contribuindo de forma direta com o comportamento de ruptura frágil.
- Conforme a normativa, todos os compósitos formados apenas por solo e RMC, ou solo e RCD, passaram no teste de efetividade para uso na estabilização de solos em todos os tempos de cura estudados. Dos compósitos formados pelos três materiais utilizados, até os 28 dias de cura, somente o compósito S70R28,5M1,5 pôde ser considerado adequado. Entretanto, a partir dos 60 dias de cura, todos se encontram apropriados para aplicação nesse tipo de obra.
- A análise estatística resultou na construção de um modelo matemático com $R^2 = 77,2\%$, com mais de cinco termos (variáveis independentes) aprovados nos testes da análise de variância. A etapa de adequação do modelo à realidade apresentou resultados satisfatórios para estabilizações de solo com duração maior que 60 e 120 dias de cura, que demonstraram variação média dos resultados de 20,25% e 9,79%, respectivamente.
- A otimização estatística do estudo de estabilização identificou que as incorporações de 7,62% de RCD e 2,61% de RMC aos 120 dias de cura (TC) atingiram 1452,30 kPa de resistência à compressão simples (RCS). Como o compósito identificado está estabilizado para 120 dias de cura, o valor se encontra inserido no intervalo aceitável do modelo, garantindo maior confiabilidade ao resultado.

Diante do exposto, é possível atestar que, para o presente estudo de estabilização, tanto os RCD quanto os RMC apresentaram grande influência na capacidade de carga do solo, sendo possível realizar aplicações de ambos os materiais para esse fim sustentável em estudos com tempos de cura mais elevados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados encontrados na presente dissertação, sugere-se:

- Realizar a caracterização química para as fibras de serragem do Resíduo de Madeira da Construção Civil (RMC) e verificar os teores de lignina, hemicelulose e celulose;
- Analisar estatisticamente a moldagem dos corpos de prova por meio do Critério de Chauvenet, verificando o grau de representatividade para cada uma dos compósitos;
- Realizar os ensaios de caracterização mecânica (RCS) para o compósito resultante da otimização do modelo estatístico, de forma a verificar a taxa de variação dos resultados;
- Complementar a análise experimental dos materiais com ensaios de adensamento e tomografia computadorizada de Raio X.

REFERÊNCIAS

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez (Versão Corrigida).** Rio de Janeiro. 2017a.

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solos - Análise Granulométrica (Versão Corrigida).** Rio de Janeiro. 2017b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro. 2016d.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491: Tijolo maço de solo-cimento.** Rio de Janeiro. 2012.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro. 2004a.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.** Rio de Janeiro. 2004b.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. 2018. **Panorama nacional dos resíduos sólidos 2017.** Disponível em:< <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017>> . Acesso em 3 de novembro de 2018.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Monitoramento pluviométrico.** 2018. Disponível em:< <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

AMADO, F. **Resumo direito ambiental: Esquematizado**. 1. Ed. São Paulo: Método Ltda., 2013.

ANWAR HOSSAIN, K.M. A. Stabilized soils incorporating combinations of rice husk ash and cement kiln dust. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 23, n. 9, p. 1320–1327, 2010.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4609-08. Standard guide for evaluating effectiveness of admixtures for Soil Stabilization (Withdrawn 2017)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5102-09. Standard test methods for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.

ALMEIDA; T. L. M. **Sedimentologia e batimetria da plataforma interna adjacente à Ilha de Itamaracá**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2011.

AMORIM, A. P. **Uso de indicadores químicos na avaliação da qualidade do Argissolo vermelho amarelo distrocoeso em um sistema de cultivo em aleias**. 2016. 111 f. Tese (Doutorado em Química do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede Bionorte, Universidade Federal do Maranhão. São Luís, MA. 2016.

ARAÚJO JR, E. L. **Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos**. 2010. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica de Pernambuco. Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2010.

ARAÚJO, F. N. F.; ARAUJO, V. B.; MARTINS, M. F.; BARBOSA, M. F. N. Impactos socioambientais provocados por resíduos sólidos em terrenos baldios de Campina Grande-PB; um olhar fotográfico. In: EL-DEIR, S. G.; SANTOS, J. P. O.; SILVA, R. C. P.; MELLO, D. P. (Org.). **Resíduos Sólidos: impactos socioeconômicos e ambientais**. Recife: EDUFRPE, 2018. p. 104-120.

ARRIVABENI, B. S. **Alternativas para a estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. 2017, 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2017.

AWOYEMI, L.; COOPER, P. A.; UNG, T. Y. In-treatment cooling during thermal modification of wood in soy oil medium: soy oil uptake, wettability, water uptake and swelling properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 67, n. 4, p.465-470, 2009.

BDE - BANCO DE DADOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **História municipal da Ilha de Itamaracá**. 2018. Disponível em: <http://www.bde.pe.gov.br/visualizacao/VISUALIZACAO_FORMATO2.ASPX?COD=1&codPermissao=&codFormatacao=745&codInformacao=915>. Acesso em: 17 de julho de 2019.

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe-PE**. 2003, 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 2003.

BEZERRA, J. S. **Análise dos custos de resíduos da construção civil em canteiro de obras em cidades do nordeste do Brasil**. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2015.

BEZERRA, J. S. **Análise do processo erosivo de uma encosta no bairro de Bom Jesus – Ilha de Itamaracá/PE**. 2018. Seminário do Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2018.

BORDIGNON, V. R.; PUPPI, R. F. K.; IZZO, R. L. S.; JOHANN, A. D. R. Estudo da viabilidade tecnológica do emprego de cal em um solo da formação guabirotuba para fins de pavimentação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016, p. 1-9.

BOUHICHA, M.; AOUISSI, F.; KENAI, S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 617-621, 2005.

BRASIL. **Constituição Federal do Brasil**. Brasília: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 6.931, de 31 de agosto de 1981. Institui a Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 ago. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 05 de abril de 2019.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Institui a Lei de Crimes Ambientais. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 fev. 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm>. Acesso em: 04 de abril de 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 22 de dezembro de 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de Julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Indicadores econômicos gerais. **Boletim Estatístico**. Rio de Janeiro. N. 10, out. 2019. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/Boletim_Ano15n10_1.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2019.

CARMO, D. C. **Fundação sobre solo melhorado com cimento: estudo de caso do bloco de sala de aula do curso de engenharia civil**. 2015. 58 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Paraíba. João Pessoa, PB. 2015.

CONTE, B.; MISSIO, A. L.; PERTUZZATTI, A.; CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretificada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, 2014.

CONDEPE/FIDEM – AGÊNCIA ESTADUAL E PESQUISAS DE PERNAMBUCO. **Estudos para controle ambiental nas áreas estuarinas de Pernambuco, Canal de Santa Cruz**. Recife: PER-CONDEPE/FIDEM. 1987. 133 p.

CÓRDOBA, R. E.; MARQUES NETO, J. C.; SANTIAGO, C. D.; PUGLIESI, E.; SCHALCH, V. Alternative construction and demolition (C&D) waste characterization method proposal. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 24, n.1, p. 199-212, 2019.

CPRH – AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Diagnóstico socioambiental do litoral norte de Pernambuco: o meio físico da área**. 2001. Disponível em: <http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/23_Vegetacao_e_Fauna.pdf>. Acesso em: 17 de julho de 2019.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. 2014a. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16771>>. Acesso em: 17 de julho de 2019.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geológico folha Itamaracá SB.25-Y-C-VI – Escala 1:100000**. 2014b. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17760/3/folha_itamaraca.pdf>. Acesso em: 11 de julho de 2019.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do Estado de Pernambuco: diagnóstico do município de Ilha de Itamaracá**. 2005. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16285/Rel_Ilha%20de%20Itamarac%C3%A1.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 de julho de 2019.

CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25, n. 10, p. 1568-1573, 2013.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. The behavior of a fiber reinforced cemented soil. **Ground Improvement**, v. 3, n. 3, p. 21-30, 1999.

CREMIATO, R.; MASTELLONE, M. L.; TAGLIAFERRI, C.; ZACCARIELLO, L.;

LETTIERI, P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production. **Renewable Energy**. v. 124, p. 180-188, 2018.

CUNHA, C. E. A. **Adição de agregado reciclado de resíduo da construção civil para estabilização de um solo expansivo**. 2018. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE. 2018.

DAHER, A. M.; FABRI, E. S. **Gestão de rejeitos de madeira na construção civil: Impactos no empreendimento Way Pampulha. Pós Em Revista**, v. 6, p. 151-156, 2012.

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.

DIAS, D.; COELHO, J. G. M.; DIAS, C. G. B. T. Polipropileno reciclado modificado com pó de madeira em solos do município de Macapá/AP. In: 71º CONGRESSO ANUAL ABM WEEK, v. 71, 2016, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Embrapa solos UEP Recife**. 2006. Disponível em < www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html >. Acesso em: 15 de julho de 2019.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria RS**. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2015.

FUCALE, S. P.; PROENÇA, F. Analysis of Physical and Mechanical Properties of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste for Paving Work. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 3797-3806, 2014.

GARBARINO, E; BLENGINI, G. A. The economics of construction and demolition waste (C&DW) management facilities. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.W.Y.; LABRINCHA, J.A.; DING, Y.; BRITO, J. (Ed.). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 1a. ed. Cambridge, UK: Elsevier, 2013. 646 p. ISBN 978-0-85709-690-6.

GASQUES, A. C. Impactos Ambientais dos Materiais da Construção Civil: Breve Revisão Teórica. **Revista Tecnológica**, v. 23, n. 1, p. 13-24, 2015.

GHOSH, Sadhan K.; GHOSH, Sannidhya K. Construction and Demolition Waste. In: WONG, J.W.C.; SURAMPALLI, R.Y.; ZHANG, T.C.; TYAGI, R.D.; SELVAM, A. (Org.). **Sustainable Solid Waste Management**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016. p. 511-547.

GOULART, C. G. P.; MARÇAL, G. S.; NASCIMENTO, M. C.; RAMOS, R. C.; MARINHO, R. S.; PITANGA, H. N. Estudo do comportamento mecânico de misturas solo-resíduo compactadas a diferentes energias. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016, p. 2-8.

GUEDES, S. B. **Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento microreforçado com fibras sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas**. 2013. 426 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2013.

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.

GUSMÃO, A. D. **Manual de gestão de Resíduos Sólidos da construção civil**. 1 ed. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, Brasil, 2008.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**. v. 30, p. 100-116, 2011.

HILL, C. A. S. **Wood Modification: Chemical, thermal and other processes**. 1st. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C.; CHINKULKIJNIWAT, A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 24, n. 2, p. 184–193. 2012.

HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R.; REN, J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources Conservation and Recycling**. v. 129, p. 36-44, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260760>>. Acesso em: 31 de julho de 2019.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Sistema de Informações de Madeiras Brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 291p. (Relatório N° 27 078).

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT, 2013. 103 p. (Relatório n° 4371).

JAISWAL, M.; LAL, B. Stabilization of clayey soil with garlic skin and rice husk ash for flexible pavement construction. **Geotechnical Testing Journal**. v. 40, n. 6, p. 1071–1082, 2017.

JAYANTHI, P. N. V.; SINGH, D. N. Utilization of sustainable materials for soil stabilization: State-of-the-Art. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 5, n. 1, p. 46-79, 2016.

JIN, R. Y.; LI, B. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. **Resources Conservation and Recycling**. v. 126, p. 86-98, 2017.

KAVITHA, S. M.; MOHAMED, B. S.; MUNIYAPPAN, C.; ELAVASARAN, R.; KUMAR, V. S. Stabilization of soil using sisal, polypropylene and hybrid fibers. **International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology**. v. 5, n. 3, p. 765-768, 2019.

KAMPALA, A.; HORPIBULSUK, S. “Engineering properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25, n. 5, p. 632–644, 2013.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Estimation of construction waste generation and management in Thailand. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 731-738, 2009.

LAFAYETTE, K. P V. **Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE**. 2006. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2006.

LAFAYETTE, K. P. V; PAZ, D. H. F.; HOLANDA, M. J. O.; COSTA, L. A. R. C. Analysis of generation and characterization of construction and demolition waste on construction sites in the city of Recife, Brazil. **Revista Matéria**. v. 23, n. 3, p. e12169, 2018.

LATIFI, N.; VAHEDIFARD, F.; GHAZANFARI, E.; RASHID, A. S. A. Sustainable usage of calcium carbide residue for stabilization of clays. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 30, n. 6, p. 04018099, 2018.

LIMA, J. P.; GONÇALVES, R. M.; SCHMIDT, M. A. R. Avaliação da eficácia do gerenciamento costeiro integrado utilizando AHP (Analytic Hierachy Process) para a Ilha de Itamaracá, Pernambuco, Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 743-753, 2017.

LLATAS, C. Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.W.Y.; LABRINCHA, J.A.; DING, Y.; BRITO, J. (Ed.). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 1a. ed. Cambridge, UK: Elsevier, 2013. 646 p. ISBN 978-0-85709-690-6.

LI, T. Z.; YANG, X. L. Stability of plane strain tunnel headings in soils with tensile strength cut-off. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 95, p. 103138, 2020.

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2016.

MACEDO, M. C. ; FUCALE, S. P. ; FERREIRA, S. R. M. Geomechanical Behavior of Soil Mixtures with Tire Residues and Construction and Demolition Waste. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 21, p. 6393-6410, 2016.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. 2013. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2013.

MACEDO, T. F.; LIMA, A. C. L.; LAFAYETTE, K. P. V. Evaluation and Comparison of Recycled Soil-Aggregate Composites and Recycled-Soil-Fiber Aggregate for Applications in Pavement. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 3201-3213, 2014.

MALEKSAEEDI, E.; NUTH, M.; MOMOH, N.; CHEKIREN, M. A modified oedometer setup for simultaneously measuring hydromechanical stress-strain for soils in the unsaturated state. **Geotechnical Testing Journal**. v. 43, n. 2. p. 1-23, 2020.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Indicadores de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**. v. 11, n. 3, p. 117-130, 2011.

MENESES FILHO, A. S. **Temas de engenharia civil: Questões comentadas**. 7ª ed. Fortaleza, Brasil: Expressão Gráfica e Editora, 2016. 896 p. ISBN 978-85-420-0854-8.

MENEZES, L. C. P. **Análise do comportamento mecânico de solo areno-argiloso reforçado com fibras do coco verde**. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2018.

MENGUE, E.; MROUH, H.; LANCELOT, L.; EKO, R. M. Mechanical improvement of a fine-grained lateritic soil treated with cement for use in road construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 29, n. 11, p. 04017206, 2018.

MEENA, S. K.; SAHU, R.; AYOTHIRAMAN, R. Utilization of waste wheat straw fibers for improving the strength characteristics of clay. **Journal of Natural Fibers**. p. 1-15, 2019.

MIRZABABAEI, M.; MIRAFATAB, M.; MOHAMED, M.; MCMAHON, P. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 139, n. 3, p. 483–493, 2012.

MOHEBBY, B.; KEVILY, H.; NAJAFI, S. K. Oleothermal modification of fir wood with a combination of soybean oil and maleic anhydride and its effects on physico-mechanical properties of treated wood. **Wood Science Technology**, v. 48, n. 4 p. 797-809, 2014.

MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. **Revista Solos e Rochas**. v. 24, n. 3, p. 191-209, 2001.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia: subsídios para uma gestão sustentável**. 2006. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2006.

MUNTOHAR, A. S.; WIDINATI, A.; HARTONO, E.; DIANA, W. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25, n. 9, p. 1260–1270, 2013.

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

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. Oficina de Textos, 2014, 176 p.

NASCIMENTO, E. C. **Avaliação do agregado reciclado da construção civil para utilização em sistema de cobertura final de aterros sanitários**. 2019, 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, PE. 2019.

NASCIMENTO, L. A.; SILVA, T. A.; SANTOS, M. J. P.; LAFAYETTE, K. P. V. Análise dos riscos ambientais decorrentes de ocupações irregulares em uma encosta do município de Olinda/PE. In: AGUIAR, A. C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G. (Org.). **Resíduos Sólidos: impactos socioeconômicos e ambientais**. Recife: EDUFRPE, 2019. p. 103-113.

NASCIMENTO-SILVA, M.; SIAL, A. N.; FERREIRA, V. P.; NEUMANN, V. H. BARBOSA, J. A.; PIMENTEL, M. M.; LACERDAM L. D. Cretaceous-Paleogene transition at the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: Carbon-isotope and Mercury subsurface stratigraphies. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 32, n. 4, p. 379-392, 2011.

NEJAD, M.; SHAFAGHI, R.; ALI, H.; COOPER, P. Coating performance on oil-heat treated wood for flooring. **BioResources**, v. 8, n. 2, p. 1881-1892, 2013.

NICHOLSON, P. G. **Soil improvement and ground modification methods**. 1a. ed. Butterworth-Heinemann, 2015. 472 p. ISBN 978-0-12-408076-8.

NORDIN, M. Y.; VENKATESH, V. C.; SHARIF, S.; ELTING, S.; ABDULLAH, A. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 104 steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 145, p. 46-58, 2004.

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

OLIVEIRA, L. E. E. **Estudo da matéria orgânica sedimentar como indicador ambiental nas adjacências do porto do Recife, Ilha de Itamaracá e Arquipélago de Fernando de Noronha (Pernambuco)**. 2016. 187 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

OLIVEIRA NETO, G. C.; CORREIA, J. M. F. Environmental and economic advantages of adopting reverse logistics for recycling construction and demolition waste: A case study of Brazilian construction and recycling companies. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 2, p. 176-185, 2019.

PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.W.Y.; LABRINCHA, J.A.; DING, Y.; BRITO, J. (Ed.). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 1a. ed. Cambridge, UK: Elsevier, 2013. 646 p. ISBN 978-0-85709-690-6.

PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V. Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 8, p. 708-716, 2016.

PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; SOBRAL, M. C.; HOLANDA, M. J.; XIMENES, T. Riscos de impactos ambientais proveniente da deposição irregular de Resíduos da Construção Civil em bacias hidrográficas da Região Metropolitana do Recife. **Águas Subterrâneas**. v. 32, n. 3, p. 325-336, 2018.

PEREIRA, L. B. F.; OLIVEIRA, J. F. **Soluções de reforço e recuperação de solos em processos erosivos urbanos em Aparecida de Goiânia**. 2018. 75p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Áreas Acadêmicas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiana, GO, 2018.

PERTUZZATTI, A.; MISSIO, A. L.; CONTE, B.; SOUZA, S. C.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, R. Propriedades físicas da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* termorretrificada sob diferentes atmosferas. **Brazilian Journal of Wood Science**. v. 7, n. 1, p. 7-15, 2016.

PINTO, T. P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: experiência do SINDUSCON-SP**. São Paulo: SINDUSCON-SP, 2005.

PIVETTA, C. P.; VENDRUSCOLO, M. A. Análise de solo compactado com resíduo de construção e demolição. In: Seminário de Iniciação Científica, 25., 2017, Rio Grande do Sul. **Anais...** Rio Grande do Sul, 2017, p. 1-5.

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

PROENÇA, F. T. T. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, PE. 2012.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 68, p. 333-359, 2017.

RAHGOZAR, M. A.; SABERIAN, M.; LI, J. Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. **Transportation Geotechnics**, v. 14, p. 52-60, 2018.

REPSOLD, L. M.; CASAGRANDE, M. D. T. Análise do desempenho de novos materiais geotécnicos para aproveitamento em reforço de solos: Avaliação do Comportamento de Solos Reforçados com Resíduos de Madeira para Aplicação em Geotecnia. In: XXII Seminário de Iniciação Científica da PUC-RIO, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

RIOUSSET, P.; FLACHSLAND, C.; KOWARSCH, M. Global environmental assessments: Impact mechanisms. **Environmental Science & Policy**, v. 77, p. 260-267, 2017.

RODRÍGUES-ROBLES, D.; GÁRCIA-GONZALES, J.; JUAN-VALDÉS, A.; POZO, A. M. M.; GUERRA-ROMERO, M. I. Overview regarding construction and demolition waste in Spain. **Environmental Technol.** v. 36, p. 3060-3070, 2015.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção Civil e a Degradação Ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, v. 7, n. 13, p. 111-128, 2009.

SABERIAN, M.; KHABIRI, M. M. Effect of oil pollution on function of sandy soils in protected deserts and investigation of their improvement guidelines (case study: Kalmand area, Iran). **Environ Geochem Health**. v. 40, n. 1, p. 243-254, 2016.

SALOMÃO, L. Senado aprova prorrogação do prazo para extinção dos lixões. **G1 Política**, Brasília, Jul. 2015. Disponível em: < <http://g1.globo.com/politica/noticia/2015/07/senado-aprova-prorrogar-por-2-anos-extincao-de-lixoes.html> >. Acesso em: 03 de abril de 2015.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2015.

SANTOS, M. J. P. **Melhoramento de um solo erodível com resíduos de construção e fibras de coco babassu**. 2019. Seminário do Exame de Qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2019.

SANTOS, M. J. P.; SILVA, T. A.; LAFAYETTE, K. P. V. Impactos ambientais causados por resíduos sólidos numa encosta no município de Recife-PE. In: AGUIAR, A. C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G. (Org.). **Resíduos Sólidos: impactos socioeconômicos e ambientais**. Recife: EDUFRPE, 2019. p. 83-92.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2008.

SANTOS, M. P. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2009.

SANTOS NETO, F. C. **Uso de resíduos da construção civil para melhoramento de solos colapsíveis**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 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.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, C. F. **Report 6 Recycling of demolished Concrete and Masonry**. London, EF&N Spon, 1992.

SEN, R.; SWAMINATHAN, T. Application of response-surface methodology to evaluate the optimum environmental conditions for the enhanced production surfactin. **Applied Microbiology and Biotechnology**. v. 47, n. 4, p. 358-363, 1997.

SHARMA, R. K. Laboratory study on stabilization of clayey soil with cement kiln dust and fiber. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 35, n. 5, p. 2291-2302, 2017.

SHARMA, R. K.; HYMAVATHI, J. Effect of fly ash, construction demolition waste and lime on geotechnical characteristics of a clayey soil: a comparative study. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 5, p. 377, 2016.

SILVA, A. C. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. Recife: UPE, 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2018.

SILVA, C. L.; BIERNASKI, I. Planejamento e gestão de resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso na região metropolitana de Belo Horizonte à luz da PNRs. **Gestão & Regionalidade**. v. 34, n. 101, p. 184-199, 2018.

SILVA, F. A. N. **Análise do comportamento sedimentológico e hidrodinâmico da desembocadura norte do canal de Santa Cruz – PE**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2012.

SILVA, L. R. M.; MATOS, E. T. A. R.; FISCILETTI, R. M. S. Resíduo sólido ontem e hoje: evolução histórica dos resíduos sólidos na legislação ambiental. **AREL FAAR – Amazon's Research and Environmental Law**, v. 5, n. 2, p. 126-142, 2017.

SILVA, S. R. **Tijolos de solo-cimento reforçados com serragem de madeira**. 2005. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2005.

SILVA, T. A.; SANTOS, M. J. P.; LAFAYETTE, K. P. V.; SILVA, S. R. Impactos ambientais provenientes da expansão urbana em uma encosta do bairro de dois unidos em Recife-PE: Um olhar fotográfico. In: V Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 5, 2018, Juazeiro, BA, Brasil. **Anais...** Juazeiro, BA, Brasil, 2019.

SINDUSCON-DF – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO DISTRITO FEDERAL. **Gerenciamento de resíduos de madeira industrializada na construção civil**. Brasília, DF: SINDUSCON-DF, 2011.

SIVAKUMAR, G. L. B.; VASUDEVAN, A. K. Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. **Journal of materials in civil engineering**, v. 20, n. 9, p. 571-577, 2008.

SRIVASTAVA, S.; CHINI, A. Construction Materials and C&D waste in India. In: CIB W115 Construction Material Stewardship, p. 72-76, 2009, Holanda. **Proceedings...** Netherland: International Council of Building Research Studies and Documentation, 2009.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. ASQC Quality press, 2003.

SUDENE – SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Inventário hidrogeológico básico do Nordeste: Folha nº 21**. 1978. Recife: No. Recife, 183 p.

SUDHAKARAN, S. P.; SHARMA, A. K.; KOLATHAYAR, S. Soil stabilization using bottom ash and areca fiber: Experimental investigations and reliability analysis. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 8, p. 04018169, 2018.

TÁVORA, V. A.; DIAS, J. J.; FERNANDES, A. C. S. New records and redescrptions of brazilian Scleractinia corals (Itamaracá, Maria Farinha and Pirabas Formations). **Paleontología Mexicana**. v. 5, n. 1, p. 71-86, 2016.

TEIXEIRA, W. G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C.; LIMA, H. N.; RODRIGUES, T. E. **Solos**. 1 ed. Brasília: EMBRAPA, 2010.

UE - UNIÃO EUROPÉIA. **Diretiva 75/442/CEE**. 1975. Disponível em: <<http://europa.eu>>. Acesso em: 04 de abril de 2019.

UE - UNIÃO EUROPÉIA. **Diretiva 91/156/CEE**. 1991. Disponível em: <<http://europa.eu>>. Acesso em: 04 de abril de 2019.

UE - UNIÃO EUROPÉIA. **Diretiva 2008/98/EC**. 2008. Disponível em: <<http://europa.eu>>. Acesso em: 04 de abril de 2019.

UE – UNIÃO EUROPÉIA. **Construction and demolition waste management protocol**. 2016. Disponível em: < https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en>. Acesso em: 04 de abril de 2019.

VANDERLEI E SILVA, F. M. **Potencial energético dos resíduos de biomassa oriundos da construção civil**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, PE. 2014.

VARELA, J. A. C. G. **Influência dos recifes na evolução da linha de costa na Ilha de Itamaracá -PE**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2010.

VEDRONI, J. W. **Estudo de caso sobre a utilização dos RCD (resíduos de construção e demolição) em reaterros de valas nos pavimentos de Piracicaba SP**. 2007. 202f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2007.

VERAS, L. M. **Estudo das propriedades do concreto com diferentes proporções de agregados de resíduos de construção civil com e sem saturação prévia**. 2012. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE. 2012.

XUE, X.; ZHANG, X.; WANG, L.; SKITMORE, M.; WANG, Q. Analyzing collaborative relationships among industrialized construction technology innovation organizations: a combined SNA and SEM approach. **Journal of Cleaner Production**. v. 173, p. 265-277, 2018.

WANG, J. Y.; YUAN, H. P. Factors affecting contractors risk attitudes: case of study from China. **International Journal of Project Management**. v. 29, p. 209-219, 2010.

WENCESLAU, F. F.; ROCHA, J. M. A ferramenta de análise FMEA como suporte para a identificação dos aspectos e impactos ambientais em uma agroindústria de arroz. **Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 56-66, 2012.

YEHEYIS, M.; HEWAGE, K.; ALAM, M. S.; ESKICIOGLU, C.; SADIQ, R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. **Clean Techn. Environemntal Policy**. v. 15, n. 1, p. 81-91, 2013.

ZHAO, L. S.; ZHOU, W. H.; SU, L. J.; GARG., A.; YUEN, K. V. Selection od physical and chemical properties of natural fibers for predicting soil reinforcement. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 31, n. 10, p. 04019212. 2019.

ZHAO, W.; ROTTER, S. The current situation of construction and demolition waste management in China. In: 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008, Shanghai, China. **Proceedings...** Shanghai, China, 2008, p. 4747-4750.

ZEMAD. **A madeira pinus e sua história**. 2001. Disponível em: < <http://www.zemad.com.br/a-madeira-pinus-e-sua-historia/> >. Acesso em: 27 de abril de 2019.