



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

ELIVELTHON CARLOS DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO
DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMA DE
COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS**

Recife, PE

2019



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

ELIVELTHON CARLOS DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO
DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMA DE
COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS**

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

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Kalinny P. Vaz Lafayette

Recife, PE

2019

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

N244a

Nascimento, Elivelthon Carlos do

Avaliação das propriedades do agregado reciclado da construção civil para utilização em sistema de cobertura final de aterros sanitários./ Elivelthon Carlos do Nascimento. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2019.

118 f.: il.

Orientadora: Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Resíduos de Construção e Demolição. 2. Camada de Cobertura de Aterros. 3. Aterros Sanitários. I. Engenharia Civil – Dissertação. II. Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

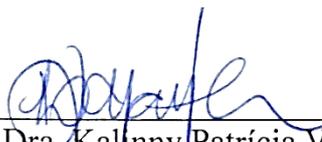
CDD: 690.0286

ELIVELTHON CARLOS DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMA DE COBERTURA
FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



Profa. Dra. Kaliny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco

Examinadores:



Profa. Dra. Simone Rosa da Silva
Universidade de Pernambuco



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

Recife, PE

2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana Lúcia e Edmilson Nascimento, e a minha irmã Monik Nascimento pelo apoio, conselhos e orientações ao longo da jornada.

A minha professora orientadora, Kalinny Lafayette, pelo apoio, paciência, incentivo, correções, pela confiança em meu trabalho e pelos ensinamentos que levarei daqui por diante.

A Fernanda Portela, amiga que levarei para a vida, por todo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa, seja coletando solo, realizando ensaios ou me ajudando no texto.

Aos meus amigos do mestrado em Engenharia Civil, em especial Nilberte Muniz e Amanda Almeida pelo grande companheirismo, estudos aprendizado e brincadeiras que amenizaram os momentos de estresses vividos no decorrer do mestrado.

Ao doutorando Jonas Bezerra, por me ajudar a coletar o solo em Itamaracá, e por todos os esclarecimentos de dúvidas.

Ao laboratorista da POLI/UPE, Fábio Ferreira, pelo auxílio na realização dos ensaios laboratoriais com importantes dicas de como fazer o ensaio da melhor maneira possível.

Aos docentes e demais funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia civil – PEC, por todo conhecimento compartilhado.

Aos laboratoristas do laboratório de Mecânica dos Solos da UFPE, Francisco e Gutemberg, por serem solícitos e pela orientação na realização dos ensaios de Pinhole.

A Professora Carlinda, do departamento de minas da UFPE, pela grande ajuda na interpretação do ensaio de difratometria de raios-X, e a professora Lúcia Valença do departamento de geologia da UFPE pela dedicação e análise do RCD com a lupa binocular.

A empresa, Ciclo Ambiental, por fornecer, gentilmente, o RCD utilizado nesta pesquisa e por fornecer todas as informações necessárias.

Ao Senhor Antônio Batista, por permitir a coleta de solo em sua propriedade, o que tornou viável a realização desta pesquisa.

A Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio financeiro.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu pudesse finalizar esta pesquisa com bom aprendizado e aproveitamento, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O crescimento populacional e econômico das cidades é responsável pelo aumento crescente da produção de resíduos sólidos. A grande parte destes resíduos, atualmente, é disposta em aterros sanitários com o objetivo de acomodá-los no menor espaço prático possível, causando o menor dano ao meio ambiente e à saúde pública. Um dos setores que contribuem para a geração de resíduos é o da indústria da construção civil, sendo um dos impactos a forte geração de Resíduos da Construção e Demolição (RCD). Em virtude disso é necessário encontrar alternativas adequadas à destinação final desse material. Assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar o uso do RCD em sistemas de cobertura final de aterro sanitário. Para isso, foi utilizado solo obtido de uma encosta localizada na Ilha de Itamaracá-PE e misturados com 10%, 30% e 50 % de RCD. O programa de investigação contou com a coleta e preparação das amostras, caracterização física, mecânica e mineralógica. Além disso, foram realizados *crumb test*, *pinhole teste* e ensaio de expansibilidade para verificação da erodibilidade. Nos ensaios de caracterização física, o solo foi classificado como uma argila de alta plasticidade e o RCD um material arenoso. A adição de RCD nas misturas fez com que diminuísse o teor de finos do solo, até chegar numa argila medianamente plástica, resultados esses, confirmados nos ensaios de Limites de Atterberg. A condutividade hidráulica do solo foi da ordem de 10^{-9} m.s^{-1} , identificando-se um acréscimo de até 580% com a incorporação do agregado reciclado. As curvas de compactação mostraram um aumento de até 75% no peso específico máximo e diminuição da umidade ótima de 12%, conforme o acréscimo do teor de resíduo. Os parâmetros de resistência à compressão simples das misturas foram superiores à resistência máxima do solo, nos períodos de 7 dias e 28 dias. Entretanto, apenas a mistura de 30% obteve valores superiores ao solo em todos os dias de rompimento dos corpos de prova: 231%, 133%, 42% e 6% aos 7 dias, 28 dias, 60 dias e 120 dias, respectivamente. Quanto aos ensaios de *crumb test* e *pinhole test*, verifica-se que o solo não apresenta tendência erodível, comportamento contrário do que é visivelmente observado em campo. Isto pode ser explicado devido à concepção dos ensaios que geralmente são para determinados climas ou tipos específicos de solos, os quais podem não apresentar resultados representativos com as metodologias propostas pelas normas. A incorporação de RCD provocou uma redução na expansibilidade, passando de 14,57% no solo para 2,13% na mistura de 50%. A adição de 50% de RCD ao solo provocou uma diminuição dos teores de fino e da plasticidade, o que facilita a compactação em camadas de cobertura de aterros sanitários, além de uma maior resistência a fissuras provocadas nos ciclos de secagem e umedecimento. Desta forma, conclui-se que a mistura solo-RCD é viável para utilização em sistemas de cobertura de aterros sanitários, sendo a mistura de 50% a que apresentou os melhores resultados, tanto do ponto de vista geotécnico quanto ambiental.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição. Camada de cobertura de aterros. Aterros sanitários

ABSTRACT

The population and economic growth of cities is responsible for the growing increase in solid waste production. Most of this waste is currently disposed of in landfills with the aim of accommodating them in the smallest practical space possible, causing the least damage to the environment and public health. One of the sectors that contribute to the generation of waste is the construction industry, one of the impacts being the strong generation of Construction and Demolition Waste (CDW). Due to this, it is necessary to find suitable alternatives for the final destination of this material. Thus, the objective of this research is to evaluate the use of CDW in final systems of landfill cover. For this, soil obtained from a slope located on the Island of Itamaracá-PE was used and mixed with 10%, 30% and 50% CDW. The research program included the collection and preparation of samples, physical, mechanical and mineralogical characterization. In addition, crumb test, pinhole test and expansibility assay were performed to verify erodibility. In the physical characterization tests, the soil was classified as a clay of high plasticity and the CDW a sandy material. The addition of CDW in the mixtures caused the soil fines to decrease until they reached a medium plastic clay, which were confirmed in the Atterberg Limits tests. The hydraulic conductivity of the soil was of the order of 10^{-9}m.s^{-1} , identifying an increase of up to 580% with the incorporation of the recycled aggregate. The compaction curves showed an increase of up to 75% in the maximum specific weight and a reduction of the optimum moisture of 12%, according to the increase of the residue content. The parameters of simple compressive strength of the mixtures were superior to the maximum resistance of the soil, in the periods of 7 days and 28 days. However, only the 30% mixture obtained values above the soil on all days of rupture of the specimens: 231%, 133%, 42% and 6% at 7 days, 28 days, 60 days and 120 days, respectively. As for the crumb test and pinhole test, it is verified that the soil presents no erodible tendency, contrary behavior of what is noticeably observed in the field. This can be explained by the design of the tests that are generally for certain climates or specific types of soils, which may not present representative results with the methodologies proposed by the standards. The incorporation of CDW caused a reduction in the expandability, going from 14.57% in the soil to 2.13% in the 50% mixture. The addition of 50% CDW to the soil caused a decrease in the fine and plasticity contents, which facilitates the compaction in layers of landfill cover, as well as a greater resistance to cracks caused in the drying and wetting cycles. In this way, it can be concluded that the soil-CDW mixture is viable for use in landfill cover systems, and the 50% mixture presented the best results both geotechnically and environmentally.

Keywords: Construction and Demolition Waste. Landfill cover layer. Sanitary landfills.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil.....	19
Figura 2 - Geração de RSU no nordeste.....	20
Figura 3 - Composição gravimétrica média do RCD no Brasil.....	24
Figura 4 - Resíduos dispostos de maneira irregular - comunidade Zeppelin, Recife-PE	27
Figura 5 - Esquema de um aterro sanitário.....	28
Figura 6 - Camada de cobertura de um aterro sanitário	31
Figura 7 - Esquema de uma camada convencional com geossintéticos.....	33
Figura 8 - Modelo de camada evapotranspirativa monolítica	34
Figura 9 - Modelo de camada evapotranspirativa barreira capilar	36
Figura 10 - Camadas oxidativas	37
Figura 11 - Componentes típicos de uma camada de cobertura.....	38
Figura 12 - Aterro Sanitário de Campina Grande/PB apresentando erosão.....	40
Figura 13 - Mapa de localização do ponto de coleta de amostras	41
Figura 14 - Encosta da área de estudo	42
Figura 15 - Vista aérea do Forte Orange	43
Figura 16 - Mapa da Vegetação na Ilha de Itamaracá-PE.....	45
Figura 17 - Mensais pluviométricos no período de 2004 a 2017 no município da Ilha de Itamaracá.	46
Figura 18 - Mapa de solos na Ilha de Itamaracá.....	49
Figura 19 - Mapa de formação geológica na Ilha de Itamaracá	52
Figura 20 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa.....	54
Figura 21 - Pontos escolhidos para as sondagens.....	55
Figura 22 - Encosta localizada no município da Ilha de Itamaracá.....	57
Figura 23 - Beneficiamento do RCD.....	58
Figura 24 - Percentuais das misturas utilizadas na pesquisa	59
Figura 25 - Ensaio de granulometria por sedimentação realizado no solo.....	60
Figura 26 - Execução de ensaio de massa específica	61
Figura 27 - Ensaio de condutividade hidráulica. Corpo de prova preparado para a colocação no permeâmetro (a). Saturação ascendente do material (b).....	62
Figura 28 - Execução do ensaio de compactação.....	63
Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão	64

Figura 30 - Controle tecnológico dos corpos de prova do solo.....	64
Figura 31 - Análise do RCD com a lupa binocular	67
Figura 32 - Difratômetro Shimadzu (XRD-6000).....	67
Figura 33 - Moldagem do corpo de prova para o ensaio de <i>Pinhole Test</i>	69
Figura 34 - Ensaio de pinhole: a) tanque para fornecimento de água com carga constante; b) cilindro metálico com diâmetro interno de 35,7mm e altura de 100 mm; c) marcações das cargas hidráulicas.	70
Figura 35 - Equipamentos utilizados no ensaio de expansibilidade: a) soquete de compactação; b) placa de plástico; c) molde cilíndrico fixado na base da pedra porosa; d) extensômetro.....	71
Figura 36 - Ensaio de expansibilidade em execução.....	71
Figura 37 - Curva granulométrica do solo e RCD.....	73
Figura 38 - Curvas do ensaio de compactação	79
Figura 39 - Variação dos parâmetros das mistura solo-RCD.....	80
Figura 40 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS no RCD.....	81
Figura 41 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS no solo.....	81
Figura 42 - Corpos de prova do solo puro antes e após o ensaio RCS em 28 dias	82
Figura 43 - Curvas Tensão x Deformação para o ensaio de RCS na mistura S90R10	82
Figura 44 - Curvas Tensão x Deformação para o ensaio de RCS na mistura S70R30	83
Figura 45 - Curvas Tensão x Deformação para o ensaio de RCS na mistura S50R50	83
Figura 46 - Resistência máxima à compressão simples	84
Figura 47 - Crescimento percentual da RCS dos materiais com o passar dos dias.....	85
Figura 48 - Análise mineralógica do RCD com lupa binocular	87
Figura 49 - Difratograma de raios-X da fração do RCD.....	87
Figura 50 - Difratograma de raios-X da fração do solo.....	88
Figura 51 - Resultados do ensaio de crumb test.....	89
Figura 52 - Resultado do ensaio de <i>pinhole test</i> no solo	90
Figura 53 - Água resultante do <i>pinhole test</i> sem partículas carregadas	90
Figura 54 - Furo antes (a) e depois (b) da realização do <i>pinhole test</i>	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coleta total de RCD em logradouros públicos no Brasil	23
Tabela 2 - Quantidade de RCD gerados em alguns municípios brasileiros.	23
Tabela 3 - Identificação das fases de obras e composição dos resíduos gerados.	24
Tabela 4 - Resultados dos ensaios solo/RCD	29
Tabela 5 - Características geotécnicas do solo para utilização em aterros sanitários.....	32
Tabela 6 - Análise granulométrica dos pontos realizados na encosta	56
Tabela 7 - Nomenclatura utilizada no programa experimental	59
Tabela 8 - Campanha de investigação geotécnica	60
Tabela 9 - Critérios adotados para aceitação dos corpos de prova	64
Tabela 10 - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.	66
Tabela 11 - Grau de dispersividade	69
Tabela 12 - Fração granulométrica dos materiais.....	74
Tabela 13 - Classificação dos materiais segundo o SUCS e a TRB.....	75
Tabela 14 - Densidade Real das amostras	76
Tabela 15 - Limites de Atterberg.....	77
Tabela 16 - Condutividade hidráulica à temperatura de 20°C.....	77
Tabela 17 - Umidades ótimas e densidades seca máxima	79
Tabela 18 - Resultado do critério de Chauvenet nas amostras	86
Tabela 19 - Resultado dos principais componentes do ensaio de fluorescência de raios no RCD e solo	88
Tabela 20 - Valores definidos por Santos e Castro (1965) para o solo	91
Tabela 21 - Resultados das caracterizações física, mecânica e ensaios de erodibilidade.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio ou alumina
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
C	Caulinita
CaO	Óxido de cálcio
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CC	Coefficiente de curvatura
CCL	<i>Compacted Clay Liner</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH	Argila inorgânica de alta plasticidade
CH ₄	Metano
CL	Argila inorgânica de mediana plasticidade
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
C _u	Coefficiente de uniformidade
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios-X
EDX	Fluorescência de Raios-X
EV	Evapotranspiração
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FeO ₃	Óxido de ferro
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liner</i>
GM	Geomembranas
H ₂ O	Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
K	Condutividade Hidráulica
K ₂ O	Óxido de potássio
LACC	Laboratório Avançado de Construção Civil

LAGESE	Laboratório de Geologia Sedimentar
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MgO	Óxido de magnésio
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Na ₂ O	Óxido de sódio
NL	Não líquido
NP	Não plástico
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
PE	Pernambuco
PF	Perda ao fogo
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POLI/UPE	Escola Politécnica de Pernambuco.
Q	Quartzo
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCS	Resistência a compressão simples
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SiO ₂	Dióxido de silício ou sílica
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SW	Areia bem graduada
TiO ₂	Dióxido de titânio
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UPE	Universidade de Pernambuco
USEPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
XRD	Difração de Raios-X
ε	Expansibilidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 Estrutura do Trabalho	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	19
2.2 Resíduos da Construção e Demolição (RCD)	21
2.2.1 Geração e Caracterização do RCD	22
2.2.2 Impactos ambientais provocados pela disposição irregular dos RCD.....	26
2.2.3 Uso alternativo do RCD	27
2.3 Sistema de Cobertura Final de Aterros.....	30
2.3.1 Tipos de cobertura final.....	32
2.3.1.1 Camadas convencionais ou resistivas.....	32
2.3.1.2 Camadas Evapotranspirativas.....	34
a) Camada evapotranspirativas do tipo monolítica	34
b) Camada evapotranspirativa do tipo barreiras capilares.....	35
2.3.1.3 Camadas Oxidativas	36
2.3.2 Componentes de um sistema de cobertura final de aterros	37
2.4 Solos erodíveis.....	39
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	41
3.1 Localização.....	41
3.2 Características socioeconômicas	42
3.3 Características fisiográficas do município.....	43

3.3.1 Vegetação	43
3.3.2 Clima	46
3.3.3 Relevo.....	46
3.3.4 Solo.....	47
3.3.5 Hidrografia	50
3.3.6 Geologia	50
4 METODOLOGIA.....	53
4.1 Etapa 1- Escolha dos materiais.....	55
4.2 Etapa 2 - Programa experimental	59
4.2.1 Ensaio de Granulometria	60
4.2.2 Densidade real	61
4.2.3 Limites de Atterberg.....	61
4.2.4 Condutividade Hidráulica.....	61
4.2.5 Compactação	63
4.2.6 Compressão simples	63
4.2.7 Ensaios de mineralogia.....	66
4.2.8 Ensaios de Erodibilidade	68
4.2.8.1 Ensaio crumb test	68
4.2.8.2 Ensaio de pinhole test.....	69
4.2.8.3 Ensaio de expansibilidade	70
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
5.1 Caracterização Física.....	73
5.1.1 Granulometria.....	73
5.1.2 Densidade real	76
5.1.3 Limites de atterberg.....	76
5.1.4 Condutividade hidráulica.....	77
5.2. Caracterização mecânica	78

5.2.1 Compactação	78
5.2.2 Resistência à compressão simples (RCS).....	80
5.3 Caracterização mineralógica.....	86
5.4 Ensaio de erodibilidade.....	89
5.4.1 Ensaio de crumb test.....	89
5.4.2 Ensaio de pinhole test.....	89
5.4.3 Ensaio de expansibilidade	91
5.5 Avaliação conforme os critérios adotados.....	92
6 CONCLUSÕES	94
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS	97
Apêndice A - Grau de compactação para controle tecnológico do ensaio de compressão simples.....	108
Apêndice B - Grau de compactação para controle tecnológico do ensaio de.....	114
condutividade hidráulica.....	114
Apêndice C - Cálculos do critério de Chauvenet	116

1 INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social de um país. Em 2015, os investimentos realizados nesse setor atingiram a marca de 9,3% do PIB - Produto Interno Bruto (*CONSTRUBUSINESS*, 2016). Por outro lado, segundo Brasileiro e Matos (2015) esse setor comporta-se ainda como grande geradora de impactos ambientais, consumindo cerca de 20% a 50% dos recursos naturais do planeta.

Esses impactos ambientais são causados na maioria das vezes pela grande geração de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) que comumente é disposto de maneira irregular. Na cidade do Recife/Brasil, Paz, Lafayette e Sobral (2018) georreferenciaram 565 pontos de RCD nesta situação. Entre os impactos ambientais, podem-se citar as inundações causadas pelo estreitamento das margens de rios, poluição das águas e solos, indução à deposição de outros tipos de rejeitos que são atrativos para vetores de doenças além da poluição visual (IKAU; JOSEPH; TAWIE, 2016).

Para auxiliar os municípios e as empresas privadas na gestão dos RCD foram criados dispositivos legais como a Resolução n° 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCD, a lei n° 12.305, a qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010a), além do Decreto n° 7.404, de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010b), que regulamentou a PNRS.

Outra maneira de minimizar os impactos oriundos da construção civil, além da gestão, é a reutilização e reciclagem dos RCD, diminuindo a extração de recursos naturais. Essa redução gera diversas vantagens do ponto de vista ambiental, como a redução de emissão dos gases do efeito estufa, diminuição dos depósitos de despejo ilegal e o aumento da vida útil dos aterros sanitários (DING et al., 2018).

Nesse sentido, algumas pesquisas têm procurado mostrar a viabilidade da utilização dos RCD em diversas áreas da engenharia como na fabricação de concreto e bloco de concreto sem função estrutural (LIMA, 2017; RODRIGUES, 2015; MESQUITA et al., 2015), camadas de

obras de pavimentação, melhoramento de solos em obras geotécnicas (ALMEIDA, 2017; BARBOSA, 2017; MACEDO, 2016; NETO, 2015) e o uso em sistemas de cobertura de aterros sanitários.

Em relação ao uso em sistemas de cobertura de aterros sanitários, autores como Oliveira e Braga (2017), Locastro e Angelis (2016), Rios (2016), Costa, C. (2015), Dias (2014) estudaram a possibilidade do uso da incorporação do RCD como material alternativo ou complementar, em diferentes proporções em camadas de aterros sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), com o objetivo de atingir características semelhantes ou até superiores as encontradas nas camadas convencionais.

As camadas de cobertura finais de aterros de RSU tem como função a separação física entre o resíduo e o meio ambiente, visando à proteção da saúde pública. Segundo Costa, M. (2015) essa camada também evita que águas pluviais infiltrem no interior do aterro, aumentando a produção de chorume e que não haja a emissão de gases gerados pela biodegradação dos resíduos sólidos como o metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), sendo esses gases os principais responsáveis pelo aquecimento global (MAJDINASAB; YUAN, 2017; ARAUJO; RITTER, 2016).

O sistema de cobertura final dos aterros sanitários deve ser projetado de maneira que se exija pouca manutenção, que possa acomodar os assentamentos sem grandes deformações, e possua coeficiente de permeabilidade inferior ao da área do aterro. Além disso, o solo utilizado deve não estar sujeito à erosão (SANTOS M., 2015; DIAS, 2014). Para isso, o sistema pode exigir que a camada de superfície seja composta de vegetação com o objetivo de minimizá-la.

1.1 Justificativa

O descarte irregular de resíduos da construção e demolição além de contribuir com inúmeros impactos negativos em áreas urbanas, também é responsável pela redução da vida útil dos aterros sanitários, visto que os RCD são materiais menos compressíveis que os resíduos sólidos urbanos, representando mais de 50% do volume total dos resíduos existentes nos aterros sanitários (LEITE, 2014).

Além disso, a deposição irregular dos resíduos de construção e demolição pode provocar fenômenos geológicos de superfície como a erosão, cujos efeitos podem ser potencializados em áreas de vegetação degradada a partir de atividades antrópicas, eventos atmosféricos, como chuvas abundantes, além de variações do tipo de solo e clima (XAVIER; SANTANA; LISTO, 2017).

Na Região Metropolitana do Recife (RMR) são identificadas diversas encostas com avançado processo erosivo, como no município da Ilha de Itamaracá-PE, que apresenta solos com alto índice de vulnerabilidade à erosão (SILVA et al., 2016). Esta é uma das características que faz com que no solo seja necessária a adição de materiais que melhorem as suas propriedades mecânicas, para aplicação em sistema de cobertura final de aterros sanitários.

Assim, esta pesquisa visa utilizar um solo erodível, proveniente do município da Ilha de Itamaracá - PE, e verificar o seu comportamento com a adição de RCD para ser utilizado em sistema de cobertura final de aterros sanitários.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades do solo e RCD e suas misturas para serem utilizados em um sistema de cobertura final de aterros sanitários.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física do solo, agregado reciclado e misturas, mediante ensaios empregados em agregados naturais;
- Verificar a composição mineralógica do solo e do agregado reciclado;
- Avaliar o comportamento hidráulico do agregado reciclado e misturas, comparando os resultados obtidos ao do solo;
- Realizar a caracterização mecânica do solo, agregado reciclado e misturas;
- Identificar percentual de solo-RCD, dos materiais estudados, que melhor se ajuste para camadas de cobertura de aterros sanitários.

1.2 Estrutura do Trabalho

A dissertação está dividida em 7 capítulos, organizados de acordo com a seguinte descrição:

O Capítulo I apresenta o tema de modo mais abrangente, os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa bem como a justificativa e relevância da pesquisa.

O Capítulo II trata-se da revisão bibliográfica onde são apresentadas as definições e características do RCD bem como o seu uso em sistemas de cobertura de aterro sanitário, os principais tipos de sistemas de coberturas de aterro sanitário e as características dos solos erodíveis.

O Capítulo III apresenta a caracterização da área de coleta do solo

O Capítulo IV apresenta os materiais e métodos utilizados para realização da pesquisa fazendo uma descrição de todos os ensaios realizados.

O Capítulo V apresenta os resultados dos ensaios e avalia o comportamento do solo diante das misturas realizadas.

O Capítulo VI apresenta as conclusões

O Capítulo VII apresenta as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

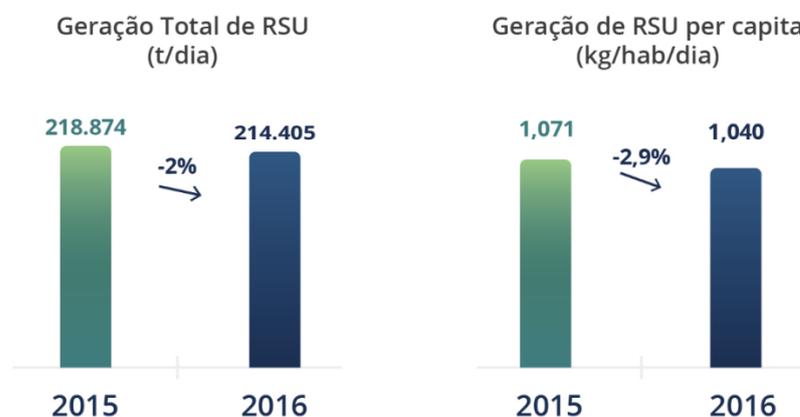
Neste capítulo são apresentados os principais temas referentes aos resíduos sólidos urbanos, resíduos da construção e demolição, explorando a conceituação, classificação, impactos decorrentes da deposição inadequada e usos alternativos em sistemas de coberturas de aterros sanitários.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004) conceitua os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como sendo resíduos que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de varrição podendo estar no estado sólido e semissólido. A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2014) define os resíduos como materiais que vão desde o lixo doméstico aos descartes industriais, que contêm uma complexidade na sua substância, além dos lodos de esgotos, resíduos agrícola, de demolição e mineração.

A sua geração está diretamente ligada ao crescimento econômico e demográfico de uma região. Entretanto, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2017) a população brasileira cresceu 0,8% entre 2015 e 2016, enquanto a geração per capita de RSU registrou queda de quase 3% no mesmo período. A geração total de resíduos sofreu queda de 2% e chegou a 214.405 t/dia de RSU gerados no país conforme apresentado na Figura 1.

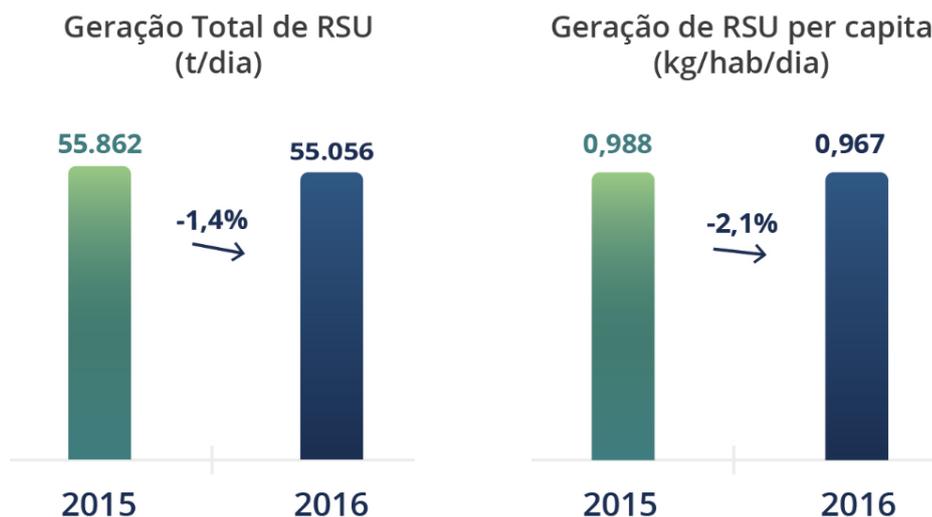
Figura 1 - Geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2017).

Na região nordeste em 2016, a quantidade de RSU gerada foi de 55.056 toneladas/dia de RSU, das quais 79% foram coletadas. Do montante coletado na região, 64,4% ou 27.906 toneladas diárias, ainda são destinadas para lixões e aterros controlados (Figura 2).

Figura 2 - Geração de RSU no nordeste



Fonte: ABRELPE (2017).

Uma maneira de minimizar os impactos decorrentes dessa grande geração de RSU é através da reciclagem. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece a reciclagem como sendo uma das ações prioritárias no princípio da hierarquia na gestão de resíduos, sendo descrita como um processo de transformação dos resíduos envolvendo a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação destes em insumos ou novos produtos (BRASIL, 2010a).

No que diz respeito à classificação, os RSU são classificados segundo a NBR 10.004 (2004) de acordo com o potencial de danos ambiental ou a saúde humana e com as condições de potabilidade da água em ensaios dos resíduos. Desta maneira, ela os classifica em:

- **Resíduos classe I - Perigosos:** são aqueles que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- **Resíduos classe II - Não perigosos:** são subdivididos em duas classes, os inertes e não inertes;
- **Resíduos classe II A - Não inertes:** são aqueles que apresentam características de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

- **Resíduos classe II B - Inertes:** são aqueles que à temperatura ambiente não tem seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, exceto aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor.

2.2 Resíduos da Construção e Demolição (RCD)

Os RCD são classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) em Classe II-B - inertes, pelo fato destes serem constituídos por componentes minerais não poluentes e praticamente inertes quimicamente. Entretanto, em alguns casos que há altos níveis de contaminação (tinta, solventes) podem ser inseridos em outra classe. São definidos pela Resolução nº 307 do CONAMA como:

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, dentre outros., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

No que se refere a sua classificação, a Resolução nº 307 do CONAMA os classificam em:

- **Classe A:** são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- **Classe B:** são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;

- **Classe C:** são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- **Classe D:** são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.2.1 Geração e Caracterização do RCD

Apesar da grande importância na economia a indústria da construção civil é uma das grandes responsáveis pela geração de resíduos sólidos, pelo significativo percentual de uso dos recursos naturais e pela degradação ao meio ambiente, sendo considerado como um dos maiores problemas na indústria da construção (PARK; TUCKER, 2016; UDAWATTA et al., 2015).

A quantidade de RCD gerado no Brasil, corresponde a 50% da massa total de RSU, onde cerca de 90% poderia ser reaproveitado (CAETANO; SELBACH; GOMES, 2016; CONTRERAS et al., 2016). Os fatores que influenciam na geração dos resíduos estão diretamente relacionados à produtividade deficiente, pois a falta de organização no armazenamento dos materiais, assim como na execução dos serviços, resultam em um aumento dos RCD (BEZERRA, 2015).

Segundo Pinto, Melo e Notaro (2016) a quantificação da geração dos RCD é uma etapa fundamental, pois é por meio dela que é possível estabelecer critérios para o gerenciamento, como: o tamanho dos recipientes, a frequência da coleta e a melhor forma de transporte. A quantidade de RCD gerada no mundo foi de 3,0 bilhões de toneladas em 2012, sendo a China o país que mais produz RCD com 1,13 bilhões de toneladas (AKHTAR; SARMAH, 2018).

No Brasil os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE, 2017), mostram que os RCD coletados de despejos clandestinos, por serviços de limpeza pública dos municípios, tiveram uma leve redução de 0,08% de 2015 para 2016, totalizando

123.619 toneladas por dia (Tabela 1). Entretanto, as regiões do Nordeste e Sul, no mesmo período, tiveram um aumento de 0,32% e 0,34%, respectivamente.

Tabela 1 - Coleta total de RCD em logradouros públicos no Brasil

Região	RCD Coletado - 2015 (t/dia)	RCD Coletado - 2016 (t/dia)
Norte	4.736	4.720
Nordeste	24.310	24.387
Centro-Oeste	13.916	13.813
Sudeste	64.097	63.981
Sul	16.662	16.718
Brasil	123.721	123.619

Fonte: ABRELPE (2017).

Mas, por se tratar apenas do que é coletado de despejos clandestinos, esses dados não refletem a quantidade real de RCD gerado no Brasil. Existem diversas pesquisas que buscam estimar a geração atual de resíduos da construção e demolição em inúmeros municípios brasileiros (Tabela 2).

Tabela 2 - Quantidade de RCD gerados em alguns municípios brasileiros.

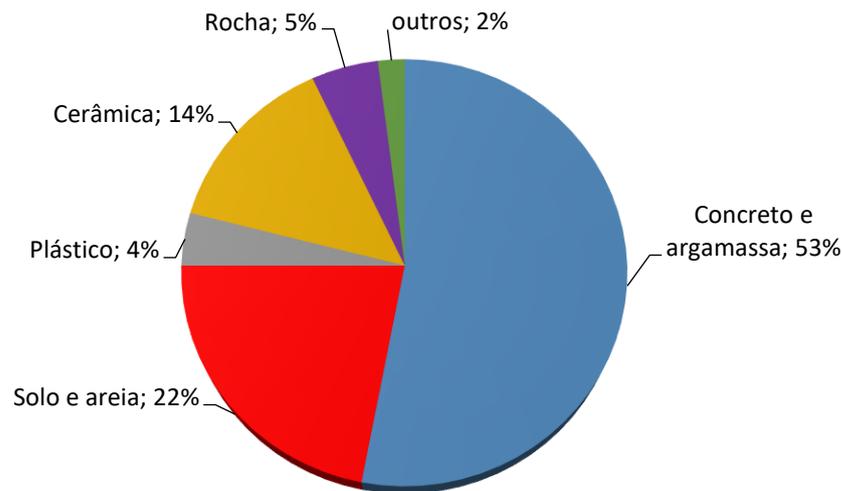
Município	População¹ (Habitantes)	Geração de RCD (t/dia)	Geração per capita de RCD (kg.hab.dia)	Fonte
Cabo de Santo Agostinho/PE	204.653,00	93,27	0,46	Silva (2017)
Cacoal/RO	86.556,00	210,00	2,43	Andrade, Joca e Borges (2017)
Curitiba/PR	3.537.894,00	5.040,29	1,42	Paraná (2017)
Londrina/PR	927.330,00	788,40	0,85	Paraná(2017)
Recife/PE	1.487.000,00	1.334,00	0,90	Albuquerque (2015)
Jaboatão dos Guararapes/PE	680.943,00	305,26	0,45	Santos, D (2015)
Ilha Solteira/SP	26.242,00	15,00	0,57	Oliveira (2014)
João Pessoa/PB	723.515,00	80,40	0,11	Pimentel (2013)
Viçosa/MG	72.244,00	51,10	0,71	Buselli (2012)
Olinda/PE	391.433,00	31,74	0,1	Falcão (2011)
Criciúma/SC	192.236,00	111,23	0,58	Cardoso (2011)
Icara/SC	58.859,00	30,50	0,52	Cardoso (2011)
São Leopoldo/RS	213.098,00	80,22	0,38	Silva (2011)
São Carlos/SP	226.789,00	204,71	1,04	Córdoba (2010)
Batatais/SP	54.525,00	25,16	0,5	Freitas (2009)

¹População do ano em que foi realizado a pesquisa

Fonte: O autor

No que diz respeito a caracterização dos RCD, a composição varia de acordo com a atividade e etapa em que a obra se encontra, havendo sempre um material que se sobressai (SANTOS D., 2015). É um material heterogêneo composto por concreto, alvenaria, argamassa, madeira, papel, plásticos, metais (incluindo o aço), solos de escavação, dentre outros a depender do tipo e etapa da obra como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Composição gravimétrica média do RCD no Brasil



Fonte: Nagalli (2014)

Nagalli (2014) analisou os tipos de resíduos gerados em cada fase de realização de uma obra desde a mobilização, instalação de canteiro e serviços preliminares, até desmobilização como mostrados na Tabela 3. O conhecimento do tipo de resíduo influencia a correta destinação e o possível reaproveitamento.

Tabela 3 - Identificação das fases de obras e composição dos resíduos gerados.

Fase da obra	Atividades	Tipo de resíduos
Mobilização, instalação e canteiro e serviços preliminares	Construções temporárias em madeira e/ou alvenaria para escritório, almoxarifado e instalações sanitárias	Madeira, cerâmica, gesso e plástico.
Atividades administrativas	Elaboração de diários de obra, revisão de projetos, contratos, pagamentos, processos de recursos humanos, compra e recebimento de materiais	Resíduos de escritório (papéis, grampos, plásticos). Paletes (decorrentes do recebimento)
Escavação e terraplenagem	Movimentação de solos ou rochas.	Solos ou rochas (em grande volume)

Tabela 3 - Identificação das fases de obras e composição dos resíduos gerados (continuação).

Fase da obra	Atividades	Tipo de resíduos
Fundações e infraestrutura	Execução de fundações rasas ou profundas	Concreto, aço, brita, solo de escavação e implantação das estruturas (fundações rasas); além dos materiais supracitados, lama bentonítica (fundações profundas)
Superestrutura	Execução de superestrutura em concreto armado	Resíduos de concreto e embalagens.
Escoramento para lajes e vigas	Sistema de escoramento em madeira	Madeiras e pinos metálicos
Impermeabilizações	Impermeabilização de lajes de cobertura, banheiros, piscinas e estruturas	Resíduos perigosos oriundos de produtos químicos como os originados de petróleo.
Coberturas	Coberturas em telhado	Resíduos classe A ou B oriundos do sistema de cobertura (calhas, rufos, telhados etc.)
Alvenaria de fechamento e revestimento interno e externo	Alvenaria em blocos de concreto e cerâmicos, revestimento interno (azulejos) e chapisco emboço e pintura. Revestimento externo (pastilhas cerâmicas, ladrilhos ornamentais)	Resíduos classe A (sobras de recortes de pisos, pastilhas e azulejos cerâmicos e de rocha, material excedente de preparo de alvenaria e argamassa); Classe B (embalagens e sobras de gesso acartonado ou vidro); Classe C ou D (estopas, panos, rolos, pincéis, latas de tintas, cera e vernizes)
Instalações	Elétricas, hidráulicas, gás	Sobras de recorte de tubos, condutores fios elétricos, parafusos, trilhos metálicos.
Esquadrias	Instalação de portas e janelas	Resíduos de argamassa para assentamento e/ou chumbamento (fixação)
Serralheria	Colocação de grades e portões, guarda-corpos, corrimões.	Resíduos classe A associados a argamassa de chumbamento; Classe B associados ao recorte de material metálico; Classe C tais como lixas, esmeris; Classe D oriundos de graxas e lubrificantes, estopas e panos contaminados
Limpeza da obra	Conclusão da obra ou de uma das etapas	Panos de limpeza, solo, resto de rejunte, embalagens de produtos de limpeza e instrumentos de limpeza (Resíduos classe C)
Desmobilização do canteiro	Remoção das estruturas provisórias da obra	Madeiras, instalações elétricas e hidrossanitárias, telhas e materiais sem uso futuro.

Fonte: Nagalli (2014)

2.2.2 Impactos ambientais provocados pela disposição irregular dos RCD.

A Resolução CONAMA nº 001 (BRASIL,1986) define impactos ambientais como sendo qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais.

A construção civil é um dos setores que causam esses impactos com a extração de recursos naturais não renováveis. Outros impactos também são gerados no seu ciclo de produção contribuindo significativamente para a degradação do meio ambiente. A relação entre a indústria da construção e o meio ambiente se analisa com frequência através dos efeitos negativos sobre o mesmo, como consumo de recursos e energia, contaminação, alteração do ecossistema, geração de resíduos, etc (KLEIN; DIAS, 2017; RIOS, 2014).

Segundo Gusmão (2008), os impactos ambientais e econômicos decorrentes dos RCD, na maioria das cidades brasileiras, deve-se à má ou à ausência de gestão desses resíduos no meio urbano, estando presente em todas as fases do processo de construção. Sendo a fase de execução de uma obra é responsável por um volume considerável de RCD de diferentes tipos decorrentes das várias atividades desenvolvidas, quer na preparação do terreno quer na execução propriamente dita. Altunku e Kasapseçkin (2011) estima que 8% do RCD provêm de novas construções, 44% das manutenções 38% das reformas.

Especificamente sobre os resíduos de construção civil muitas vezes eles são depositados de forma inadequada e em locais não regularizados pelo poder público (Figura 4), que por consequência atrai outros tipos de resíduos, para o qual não se tenha solução de captação rotineira (SANTOS D., 2015). Essa disposição irregular acaba acarretando não só impactos ambientais mas também sociais e econômicos.

Em relação aos impactos ambientais os RCD, quando dispostos de maneira irregular principalmente próximos à vegetação e margem de rios, provocam a destruição da fauna e da

flora, degradação das áreas hídricas, obstrução das redes de drenagem o que provoca alagamento e cheias; assoreamentos e aterramentos de rios e canais.

Figura 4 - Resíduos dispostos de maneira irregular - comunidade Zeppelin, Recife-PE



Fonte: O Autor

Do ponto de vista social, quando são dispostos em meio as vias públicas, há grandes chances de serem depósitos de resíduos domésticos o que ocasiona a proliferação de doenças, pois funciona como locais de atração a animais que são vetores de doenças (CRUVINEL, 2016). Por consequência, há um aumento dos gastos público, tanto com a retirada dos RCD das ruas quanto com o sistema de saúde quando eles ali persistem.

2.2.3 Uso alternativo do RCD

Com todos os impactos que os RCD trazem ao meio ambiente fica claro a necessidade de medidas que ajudem a mitigá-los. Atualmente, existem diversas possibilidades para o seu reaproveitamento através da reutilização ou reciclagem que tem cada vez maior aceitação no mundo, pois grande parte do RCD pode ser transformado em algo útil (SCHNEIDER, et al., 2015).

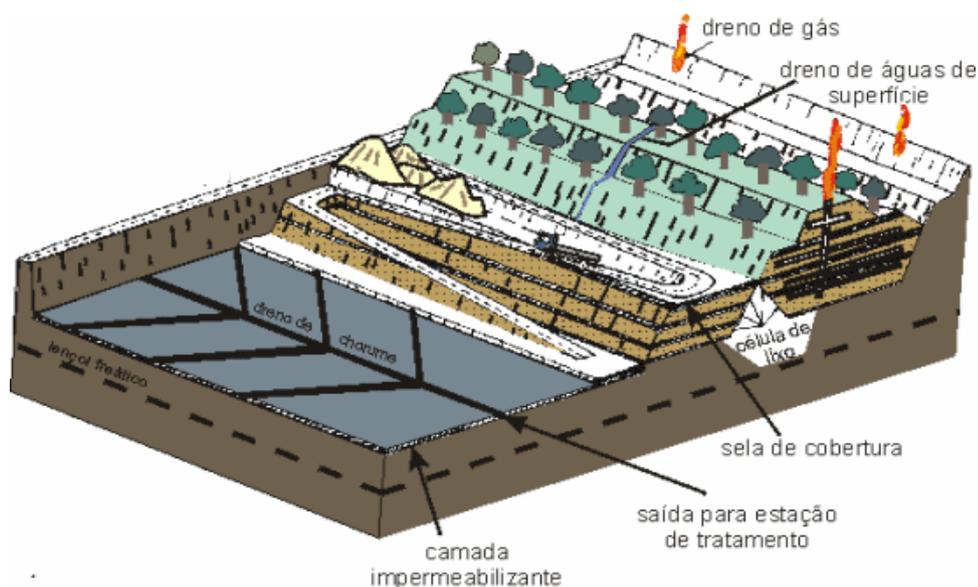
As várias formas de aproveitamento do RCD podem ser observadas em diversas pesquisas diretamente focadas em usos na construção civil, entre elas pode-se citar:

- Pavimentação (OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016);
- produção de argamassas (GOMES et al., 2015);

- blocos e artefatos de concreto sem função estrutural (MESQUITA et al., 2015);
- melhoramento de solos para fins geotécnicos (MACEDO; LAFAYETTE; BEZERRA, 2015);
- sistemas de cobertura de aterros sanitários (MENDOZA; ALTABELLA; IZQUIERDO, 2017).

Os aterros sanitários constituem uma técnica bastante antiga utilizada pelo homem para descarte de seus resíduos, que é o aterramento. É uma obra de engenharia que tem como objetivo acomodar resíduos nos solos no menor espaço possível, minimizando os danos ao meio ambiente e à saúde pública (CETESB, 2018). Um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado um reator biológico, onde as principais entradas são os resíduos e a água, e as principais saídas são os gases e o chorume, conforme mostrado na Figura 5 (Ministério Brasileiro do Meio Ambiente - MMA, 2018).

Figura 5 - Esquema de um aterro sanitário



Fonte: UNESP (2018)

A NBR 8419 (ABNT, 1992) define aterro sanitário de RSU como sendo uma obra de engenharia, onde a disposição final no solo não cause danos à saúde pública e à sua segurança, mitigando assim seus impactos ambientais. Tem como principal objetivo o de melhorar as condições sanitárias relacionadas aos descartes sólidos urbanos, evitando os danos da sua degradação descontrolada.

Segundo Costa, C. (2015) o bom funcionamento de um aterro depende de um conjunto de células de resíduos que devem ser recobertos, diariamente, por uma camada de solo evitando que possa haver proliferação de vetores. O seu desempenho se deve em grande parte à eficiência dos sistemas de impermeabilização tanto do fundo das células quanto dos sistemas de coberturas.

Especificamente sobre sistemas de cobertura de aterros, quando não existe a disponibilidade de solos com características e em quantidades adequadas nas proximidades do aterro, ou que se deseje melhorar as suas características, é possível utilizar materiais alternativos para execução das camadas de cobertura.

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas ao longo do tempo com o objetivo de utilizar os resíduos da construção para tal fim. Locastro e Angelis (2016) citam como ponto positivo do uso de RCD em sistema de cobertura de aterros a diminuição do custo final da obra, pois o custo de impermeabilização diminui, visto que, geralmente se utiliza materiais do próprio aterro.

Costa, C. (2015) avaliou percentuais de adição, em relação à massa de solo seco, de 10%, 20%, 30% e 40% de RCD para coberturas finais de aterros sanitários. A autora observou a viabilidade da utilização de RCD em camadas de cobertura, conforme mostrado na Tabela 4. Verifica-se que nos valores de 20% e 40% todos os ensaios foram satisfatórios, superando até o solo puro no ensaio de retração, ou seja, o RCD provocou uma diminuição no surgimento das fissuras.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios solo/RCD

Amostra	Ensaio			
	Resistência a compressão	Resistência ao cisalhamento	Tração	Ressecamento Preliminar
Solo Puro	Sim	Sim	Não	Sim
10%	Sim	Sim	Não	Não
20%	Sim	Sim	Sim	Sim
RCD	30%	Sim	Sim	Não
40%	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Adaptado de Costa, C. (2015)

Pascoal e Mesquita (2014) estudaram o comportamento do solo com a adição de 10%, 20% e 30% de RCD, sendo a última a que trouxe melhores resultados, havendo um aumento de 57% na resistência. Foi verificado que o aumento do RCD provocou redução das deformações devido a diminuição dos índices de vazios, além das propriedades cimentícias do próprio RCD. Outras características físicas como peso específico seco máximo também foram melhoradas, tornando essa mistura viável em camadas de coberturas de aterros sanitários.

Dias (2014) observou que o acréscimo de 50% de solo tropical no RCD, melhora as suas características hidromecânicas se comparado ao RCD puro. Essa mistura se assemelha tecnicamente aos materiais que compõem um sistema de cobertura de aterro sanitário, o que prova a viabilidade de uso em camada superficial e de proteção.

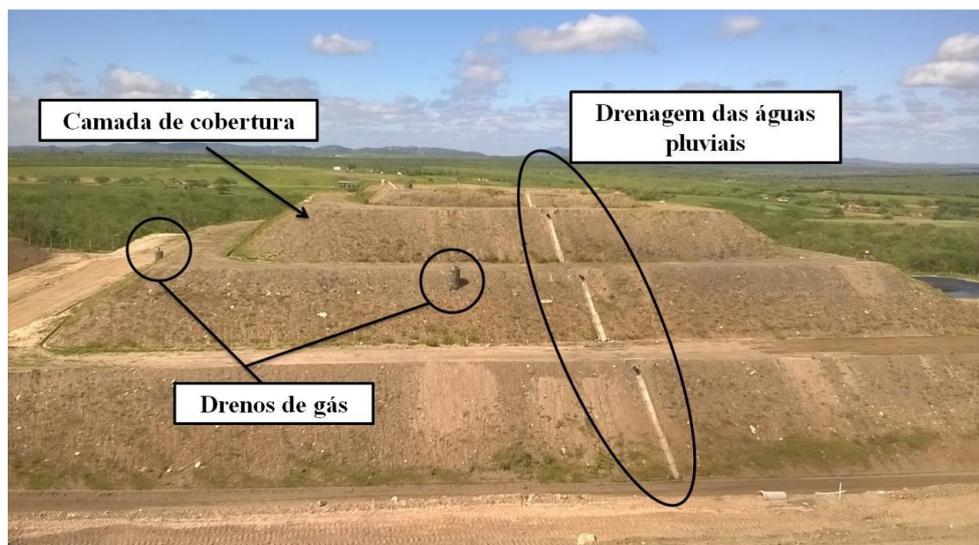
Catapreta e Simões (2011) apontam como sendo viável a utilização de RCD como material de cobertura diária de RSU dispostos em aterros sanitários, pois os mesmos exercem adequadamente a função sanitária, evitando a proliferação de vetores e exalação de odores, além de proporcionar boas condições para o tráfego de máquinas e veículos durante a operação dos aterros sanitários.

2.3 Sistema de Cobertura Final de Aterros

Quando os aterros sanitários se encontram com suas áreas que foram projetadas para ocupação dos resíduos sólidos urbanos completamente utilizados, e se deseja prover a separação física entre o resíduo e o meio ambiente, existe a necessidade da construção de um sistema de cobertura final (Figura 6).

Um dos principais objetivos da camada de cobertura é um sistema é impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro e a saída de gases para a atmosfera, funcionando como uma barreira física com a finalidade de confinar os RSU, isolando-os do meio externo. Existem vários métodos de construção da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o método mais empregado (ARAÚJO, 2017; HUSE, 2007).

Figura 6 - Camada de cobertura de um aterro sanitário



Fonte: Araujo (2017)

Para que o desempenho do aterro sanitário seja considerado satisfatório, é necessário um sistema de cobertura eficiente e duradouro. Tal sistema é constituído por uma série de camadas de solo, algumas vezes combinadas com geossintético (geotêxteis, geomembranas, geocompostos argilosos, resíduos, entre outros), que devem controlar a infiltração de água para a massa de resíduos (TEXEIRA, 2008).

Carvalho et al. (2015) descrevem que é prática comum no Brasil que a impermeabilização da cobertura de aterros sanitários seja executada em camadas de solo compactado na umidade ótima, principalmente com solos argilosos, uma vez que a principal preocupação é promover uma cobertura com baixa permeabilidade ao fluxo descendente de água pela camada, evitando o acréscimo de umidade à massa de resíduos e o fluxo ascendente de gases para a atmosfera.

No que diz respeito às características que os solos de cobertura de aterros sanitários devem possuir para funcionar como barreira hidráulica, as normas brasileiras estabelecem a condutividade hidráulica da ordem de $k = 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ como único critério a ser alcançado. A NBR 13896 (ABNT, 1997) e a NBR 15849 (ABNT, 2010) não especifica as orientações práticas para operação e cuidados com a camada de cobertura (ARAUJO, 2017).

Os manuais e guias fornecidos pela Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency* - USEPA) e as legislações e diretrizes europeias são

utilizadas para suprir essa carência de especificações técnica. A Tabela 5 apresenta as principais características geotécnicas que a camada de cobertura deve possuir, de acordo com várias normas. Nesse caso o solo funciona como uma barreira hidráulica de baixa condutividade.

Tabela 5 - Características geotécnicas do solo para utilização em aterros sanitários

Normas	Classificação do solo	Porcentagem de finos (%)	Condutividade hidráulica (m.s⁻¹)	Espessura (m)	Limites de consistência
CETESB (1993)	CL, CH, SC ou OH	>30%	-	-	IP≥15% LL≥30%
USEPA (2004)	Solos ricos em argila	30 - 50%	10 ⁻⁹	0,30 -0,60	IP: 7 - 15%
Norma Alemã (1993)	-		5x10 ⁻¹⁰	>0,50	-
FEAM (2006)	-		-	0,20 - 0,60	-
ABNT (1997)	-		10 ⁻⁸	-	-

Fonte: Adaptado de Araujo (2017)

2.3.1 Tipos de cobertura final

Existem dois tipos de camadas de cobertura final para aterros de resíduos sólidos urbanos: as convencionais que são as confeccionadas com camadas de solo natural argiloso ou camadas intercaladas de solo natural argiloso e geossintéticos, com vistas à impermeabilização do topo das células; e as alternativas que são compostas por solos, ou misturas de solos com outros materiais que não são geossintéticos (COSTA, C., 2015; MARIANO, 2008).

2.3.1.1 Camadas convencionais ou resistivas

As camadas convencionais de cobertura, que podem ser chamadas também de camadas resistivas, são aquelas executadas com camadas de solo natural argiloso (*compacted clay liner* - CCL), compactado na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima; geocomposto argiloso (*geosynthetic clay liner* - GCL); geomembranas (GM); ou executadas em uma combinação desses materiais (ARAUJO, 2017) (Figura 7).

Figura 7 - Esquema de uma camada convencional com geossintéticos



Fonte: Mariano (2008)

O solo utilizado como camada de argila compactada funciona como barreira hidráulica e deve apresentar um índice de plasticidade (IP) entre 7% a 15%, o que proporciona uma capacidade de moldagem e resistência às fissuras ocasionadas pelas variações de umidade. Além disso, a condutividade hidráulica do solo recomendada não deve ser superior a 10^{-9} m.s^{-1} (USEPA, 2004).

A camada de cobertura convencional possui baixa condutividade hidráulica sendo, o excesso de chuva transformado em escoamento superficial. Em locais de clima semiárido, árido ou mesmo em locais com longos períodos de seca, problemas de fissuras ocasionados por ciclos de secagem e umedecimento podem aumentar a condutividade hidráulica do sistema, tornando a barreira resistiva ineficiente (COSTA, M., 2015).

Em relação ao custo de construção das camadas de cobertura convencional, Costa, M. (2015) afirma que devem ser considerados os custos de médio e longo prazo, como o de manutenção, devido à possibilidade de aparecimento de fissuras em sistemas de cobertura de argila compactada, o que proporciona a formação de caminhos preferenciais de infiltração de água para o interior do maciço, e saída de gás para a atmosfera (LU et al., 2015).

2.3.1.2 Camadas Evapotranspirativas

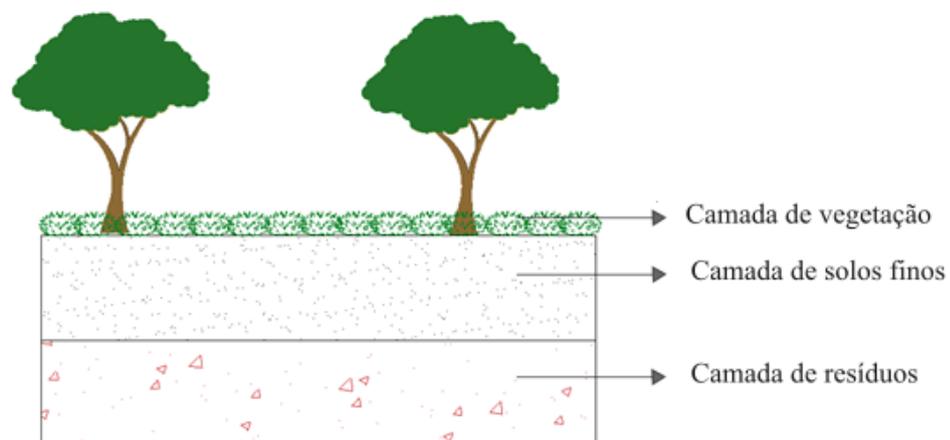
As coberturas evapotranspirativas (EV) são sistemas de camada de cobertura que tem se mostrado viável em regiões de clima árido e semiárido, com as baixas taxas de precipitação e elevado potencial de evapotranspiração comuns a estes climas (COSTA, C., 2015). As camadas evapotranspirativas podem ser divididas em dois tipos: monolíticas e barreiras capilares.

O projeto desse tipo de camada é baseado no uso do balanço hídrico de um aterro, o qual inclui capacidade de armazenamento de água do solo, precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração. Tendo um solo uma maior capacidade de armazenamento de água e suas propriedades evapotranspirativas, menor será, o potencial de percolação através do sistema de cobertura (USEPA, 2004).

a) Camada evapotranspirativas do tipo monolítica

A camada evapotranspirativa monolítica é caracterizada quando um solo é colocado sobre a camada de resíduos e atua como um substrato para a vegetação e como barreira hidráulica, conforme a Figura 8. As variações na umidade, devido o ressecamento, ocorrerão logo no topo da camada. As camadas monolíticas exigem uma espessura variando entre cerca de 0,90 m e mais de 2 m, sendo usada para suportar a vegetação, proteção contra a erosão e controle da infiltração (USEPA, 2004).

Figura 8 - Modelo de camada evapotranspirativa monolítica



Fonte: Adaptado de Catapreta (2008)

Esse tipo de camada se baseia no princípio do balanço hídrico de que a percolação para o interior do maciço sanitário pode ser minimizada, armazenando água na cobertura durante os períodos de chuvas e removida por evapotranspiração, através da vegetação ou evaporada da superfície do solo (ZHANG; SUN, 2014; SUN; YUEN; FOURIE, 2010). Por isso, a água de chuva que não escoar superficialmente é rapidamente armazenada próximo à superfície, de onde pode ser evaporada (CATAPRETA, 2008).

Diferente da camada convencional a USEPA (2004) recomenda sua utilização em regiões áridas e semiáridas, pois são áreas com baixo volume de precipitação e elevados percentuais de evaporação, possuindo vegetação escassa com predominância de gramíneas, funcionando como uma espécie de esponja ou reservatório (ZORNBERG; LAFOUNTAIN; CALDWELL, 2003), que armazena umidade durante a precipitação, e a libera de volta para a atmosfera, como evapotranspiração em momentos de estiagem.

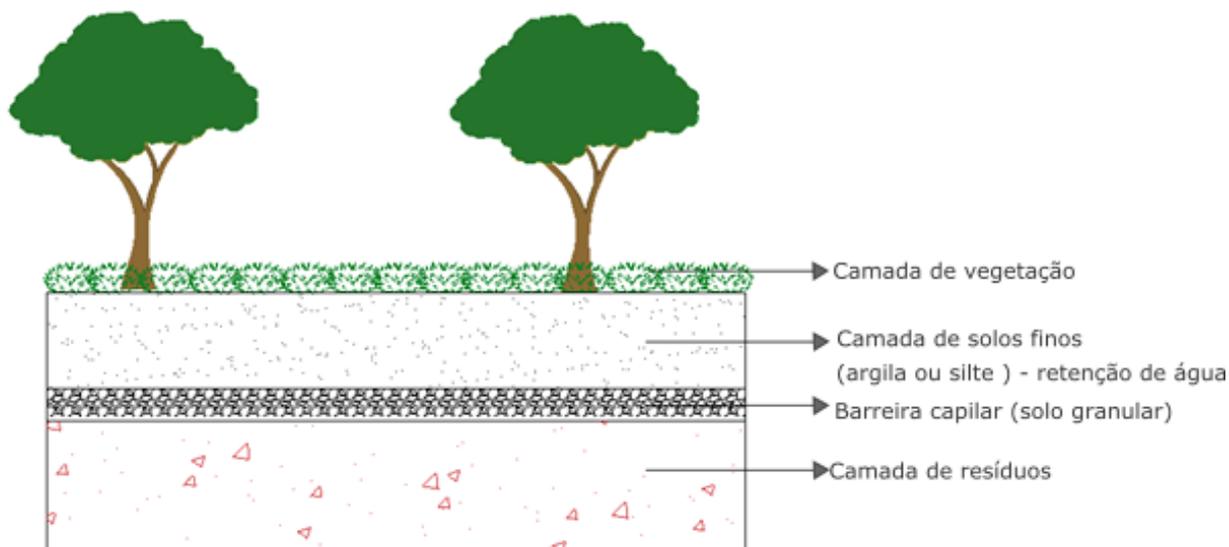
b) Camada evapotranspirativa do tipo barreiras capilares

Esse sistema de cobertura consiste numa camada de solo fino (argila ou silte-argiloso), que se sobrepõe a uma camada de solo granular (areia ou cascalho) (COSTA, C., 2015; KHIRE; BENSON; BOSSCHER, 2000). Segundo Vieira (2005) tem duas funções básicas: limitar a quantidade de água que atinge as camadas de resíduos, reduzindo a lixiviação de material; e reduzir a entrada de oxigênio, que pode reagir quando em contato com alguns resíduos, elevando a produção de gases contaminantes como o metano (CH₄).

Os solos finos e granulares possuem diferenças de propriedades hidráulicas não saturadas, com isso, as duas camadas proporcionam uma minimização da percolação na camada de solo granular, sob condições não saturadas. A camada de solo fino tem a mesma função de uma camada de solo monolítico, que é armazenar água até esta ser removida do solo pelos mecanismos de evaporação ou evapotranspiração (COSTA, C., 2015).

A camada de solo granular forma uma descontinuidade hidráulica (Figura 9), ou sistema de ruptura capilar (*capillary break*) na interface entre as duas camadas, o qual permite à camada de solo fino reter mais água que o sistema de cobertura monolítica de igual espessura (ARAUJO, 2016; USEPA, 2004).

Figura 9 - Modelo de camada evapotranspirativa barreira capilar



Fonte: Adaptado de Catapreta (2008)

Para funcionar as barreiras capilares necessitam de, no mínimo, duas camadas, uma com a finalidade de barrar e armazenar água, e a outra com finalidade de fornecer descontinuidade hidráulica, entre as camadas de resíduo e a de retenção de água. A eficiência da barreira capilar está ligada à capacidade de retenção e distribuição de água nos poros, ou seja, ao fenômeno da capilaridade nos solos (VIEIRA, 2005).

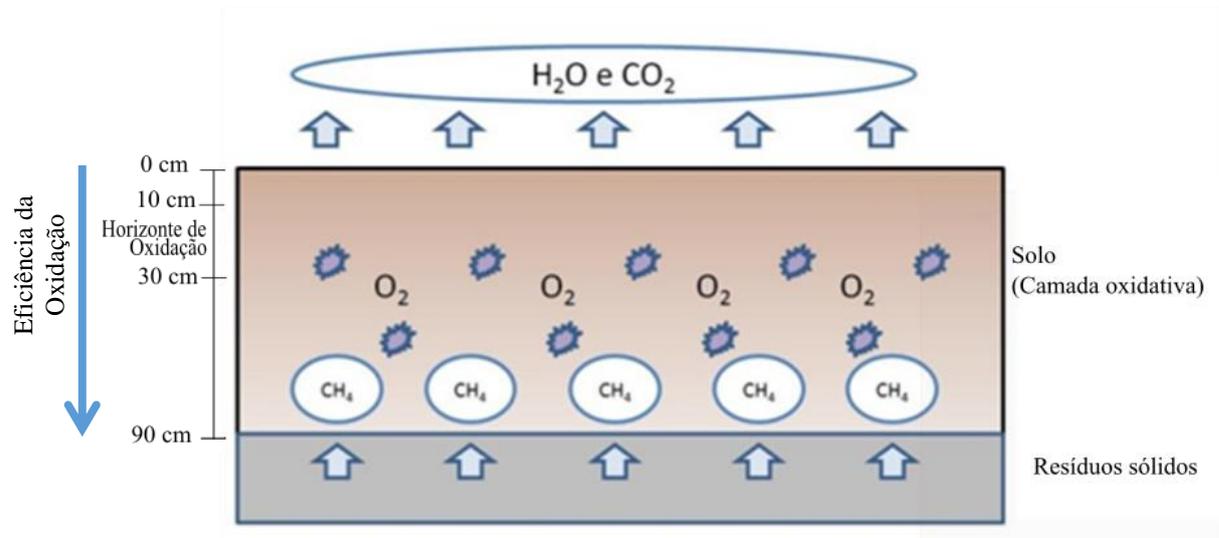
Por precisar trabalhar em condição não saturada, o seu uso é favorecido em regiões de clima árido ou semiárido, uma vez que, a camada sofre perdas constantes de água pelos mecanismos de evaporação e transpiração da vegetação, devido à intensa radiação solar. A utilização desse sistema de cobertura em regiões com elevados totais pluviométricos pode aumentar a taxa de infiltração da água para o interior de aterro sanitário (ARAUJO, 2017).

2.3.1.3 Camadas Oxidativas

As camadas oxidativas são aplicadas com o objetivo de controlar a emissão de gases pela camada de cobertura, minimizando os efeitos danosos ao meio ambiente provocado pela grande liberação de metano (CH_4). É necessário que o biogás gerado atravesse a camada de cobertura, para que ocorra a oxidação do metano. A oxidação do metano (CH_4) é realizada por bactérias metanotróficas que se converte em água, dióxido de carbono, biomassa e calor

(Figura 10). Ocorre naturalmente em solos e aterros sanitários e podem ser promovidos por meio da otimização de parâmetros ambientais e físicos (ARAUJO, 2014).

Figura 10 - Camadas oxidativas



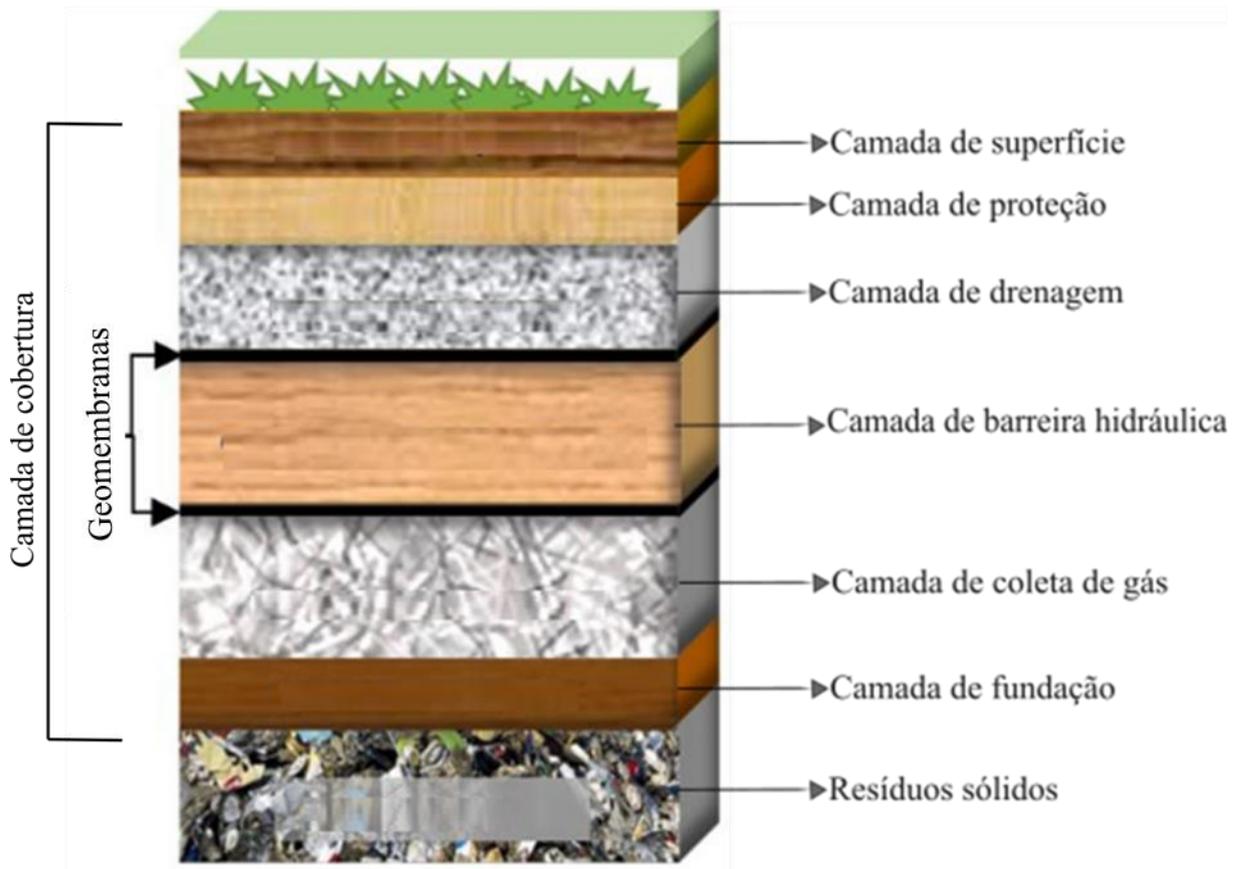
Fonte: Adaptado de Araujo (2017)

Pratt et al. (2012) afirmam que a oxidação ocorre próximo à superfície da camada de cobertura, na maioria dos casos entre 10 cm e 30 cm (horizonte de oxidação de metano). À medida que se aumenta a profundidade se reduz a eficiência da oxidação do metano. Essa cobertura é eficiente nos lixões cujas atividades foram encerradas, alcançando uma oxidação de cerca de 80% do metano que atravessa a camada (SCHEUTZ et al., 2014).

2.3.2 Componentes de um sistema de cobertura final de aterros

O sistema de cobertura final de aterros de resíduos sólidos urbanos, aterros de resíduos perigosos e os projetos de ações corretivas, possuem um número muito semelhante de componentes em todas estas condições. A Figura 11 apresenta a identificação de cada camada, que constitui o sistema de cobertura final de aterros sanitários: camada de superfície para fins de vegetação; camada de proteção; camada de drenagem; camada impermeabilizante ou barreira hidráulica; camada de coleta de gás e camada de fundação (USEPA 2014).

Figura 11 - Componentes típicos de uma camada de cobertura



Fonte: Adaptado de Oliveira e Braga (2017)

A utilização ou não de cada componente é determinada pelo tipo de aterro sanitário e pelas condições climáticas e geográficas do local de implantação, não sendo obrigatório o uso de todas as camadas. Pode haver a combinação de duas camadas, como ocorre muito frequentemente com a camada de coleta de gás com a da base.

Segundo a USEPA (2014) a camada de superfície é a que está em contato direto com a atmosfera por isso, ela tem a função de diminuir os efeitos da erosão causada pelas chuvas e pelo vento, proporcionando condições para o crescimento da vegetação, quando for o caso, além de facilitar a evapotranspiração e atender a critérios estéticos de projeto. Para esta camada podem ser utilizados cascalhos, solos naturais ou mistura de argila, silte e areia, concreto asfáltico e agregados recicláveis.

A camada de proteção ou biótica tem como funções proteger as camadas subjacentes dos processos erosivos, minimizar os ciclos de secagem e umedecimento dos solos além de servir como um anteparo físico para camada drenante. Além disso, pode armazenar temporariamente

a água que se infiltra pela da camada superficial, até que ela retorne à atmosfera pelo processo de evapotranspiração, e ainda restringir as emissões de gases.

A camada de drenagem é responsável por remover a água que penetra para o interior da camada de cobertura, minimizando a percolação e conduzindo-a para fora do aterro. Para isso, essa camada deve possuir uma condutividade hidráulica superior a 10^{-4} m.s^{-1} (KOERNER; DANIEL, 1997).

A barreira hidráulica tem como função impedir a percolação de líquido e gases, que entra em contato com esta camada. Estas barreiras devem apresentar como características principais a baixa condutividade hidráulica, estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries (LUKIANANTCHUKI, 2007).

A camada de coleta de gás é responsável por direcionar os gases, gerados pela massa de resíduos para os drenos de gás. Os materiais utilizados nesta camada deverão ser granulares e altamente permeáveis, como cascalho e pedregulho.

Camada de fundação ou de regularização da base é o componente mais inferior do sistema de cobertura, servindo de base para compactação de camadas sobrepostas aos resíduos. Essa camada deve reduzir os possíveis recalques diferenciais.

2.4 Solos erodíveis

Uma das funções das camadas de coberturas do aterro sanitário é minimizar a erosão (Figura 12), pois ela possibilita a entrada das águas de chuvas e do ar atmosférico para o interior do maciço, o que provoca o aumento da produção de chorume, além da saída de gases poluentes para a atmosfera, como o metano (CH_4) (ARAÚJO, 2017). Neste caso, o solo deve ser menos erodível possível.

Figura 12 - Aterro Sanitário de Campina Grande/PB apresentando erosão



Fonte: Araujo (2017)

A erosão no solo é um fenômeno natural, que está presente na terra desde a sua formação, sendo sujeita a interferências antrópicas como o aumento da exposição do solo, o que ocasiona o aumento de sua vulnerabilidade e, conseqüentemente sua erodibilidade. Fatores como o clima, relevo, cobertura vegetal, além do próprio solo, são condicionantes para o processo de erosão (COUTO, 2015, CORRÊA, 2015, CAMPOS; RODRIGUES, 2014).

No que diz respeito ao clima, os aspectos mais importantes no desenvolvimento dos solos são a precipitação (fluxos superficiais e subsuperficiais) e a temperatura. A intensidade, duração, frequência, particularidades das gotas de chuva e energia cinética da chuva natural, influenciam diretamente na erosão (CORRÊA, 2015; GUERRA; MENDONÇA, 2004).

As formas de relevo, declividade e comprimento de rampa (encosta), também contribuem para o processo erosivo. Nas encostas mais íngremes a taxa de infiltração diminui, enquanto a de escoamento aumenta, assim como, a velocidade do escoamento superficial e conseqüentemente o potencial erosivo.

A cobertura vegetal funciona como uma espécie de defesa contra a erosão contribuindo, segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), com a proteção direta contra o impacto das gotas de chuva (diminuição do efeito *splash*) e com a dispersão da água por interceptação direta.

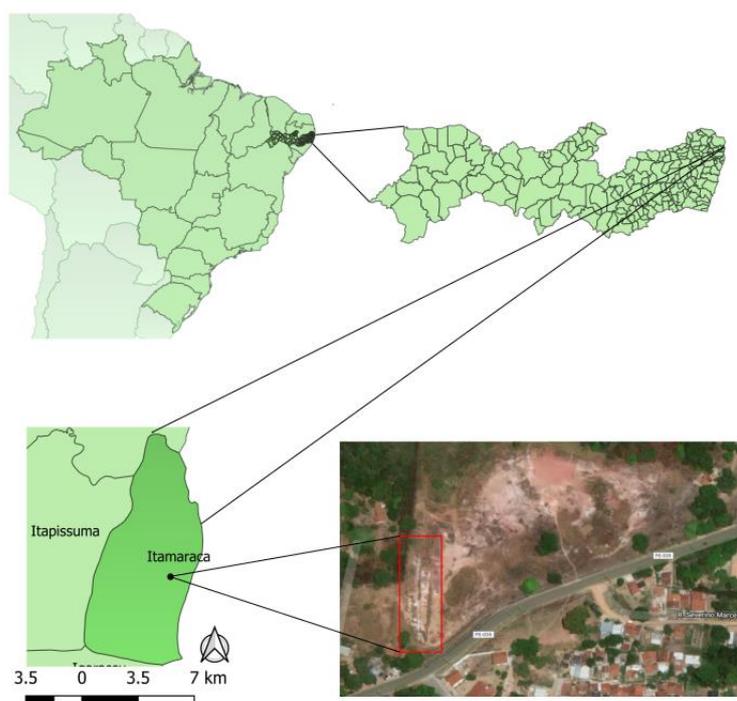
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

As informações apresentadas neste capítulo estão relacionadas à caracterização da área de coleta de solo, quanto aos aspectos de localização, características socioeconômicas e características fisiográficas, como a vegetação, clima, solo, hidrografia e geologia. Sendo escolhida em virtude da presença de encostas com processos erosivos.

3.1 Localização

A área selecionada para coleta do solo está localizada no Litoral Norte de Pernambuco na Ilha de Itamaracá às margens da PE-035, nas coordenadas $7^{\circ} 46' 9''$ S e $34^{\circ} 50' 28''$ W, no município, homônimo que integra a Região Metropolitana do Recife e ocupa uma área de 66,684 km² (Figura 13). A cidade está localizada a 46 km da capital e possui uma população estimada de 25.789 pessoas em 2017 e uma densidade demográfica de 328,17 hab/km² (IBGE, 2018). A Ilha de Itamaracá limita-se ao Norte com o município de Goiana, ao Sul com o município de Igarassu, ao Leste com o Oceano Atlântico e ao Oeste com o município de Itapissuma.

Figura 13 - Mapa de localização do ponto de coleta de amostras



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da malha cartográfica do IBGE (2015)

O município tem uma grande importância histórica e cultural, cuja história está associada ao Brasil colônia. Seus primeiros habitantes foram náufragos, havendo também registros sobre a passagem dos portugueses João Coelho da Porta da Cruz e Duarte Pacheco Pereira em 1493 e 1498, respectivamente. A Ilha serviu de abrigo aos holandeses, quando foi invadida em 1631 e construído o Forte Orange, em homenagem ao Príncipe holandês Frederico Henrique de Orange (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAMARACÁ, 2018).

No município de Itamaracá, observa-se a presença de inúmeras encostas com sinais avançados de processo erosivo. A região foi uma antiga área de extração de saibro, desativada há mais de 30 anos. A encosta, que tem em torno de 14 metros, passou por um retaludamento, onde foram inseridas duas bermas, além de um sistema de drenos constituídos de canaletas para aumentar sua estabilidade (BEZERRA, 2018) (Figura 14).

Figura 14 - Encosta da área de estudo



Fonte: Bezerra (2018)

3.2 Características socioeconômicas

A economia da região está fortemente ligada ao setor turístico, tendo como principais atrativos a beleza de suas praias e importantes monumentos históricos como a Praia do Forte

Orange (Figura 15), Praia Coroa do Avião, Praia do Sossêgo, Praia Pontal da Ilha, Vila Velha, além das igrejas Nossa Senhora do Pilar e Bom Jesus dos Passos.

Além do setor turístico que reflete no setor imobiliário e de alugueís, no interior da Ilha há a monocultura do coco-da-bahia, sendo esta a atividade de agricultura mais marcante chegando a ser a sexta maior produtora do Estado. Nas áreas de mangue têm-se as capturas de caranguejos e ostras como principais atividades econômicas (ALMEIDA, 2011; CPRH, 2001).

Figura 15 - Vista aérea do Forte Orange



Fonte: Guia do Turismo do Brasil (2018)

3.3 Características fisiográficas do município

3.3.1 Vegetação

As vegetações expressivas são as de Mata Atlântica e Mangue (Figura 16). As matas ocorrem na porção ocidental da ilha em terras públicas, em áreas integrantes dos presídios, além de recobrir quase totalidade das terras na porção sul do território (CPRH, 2001).

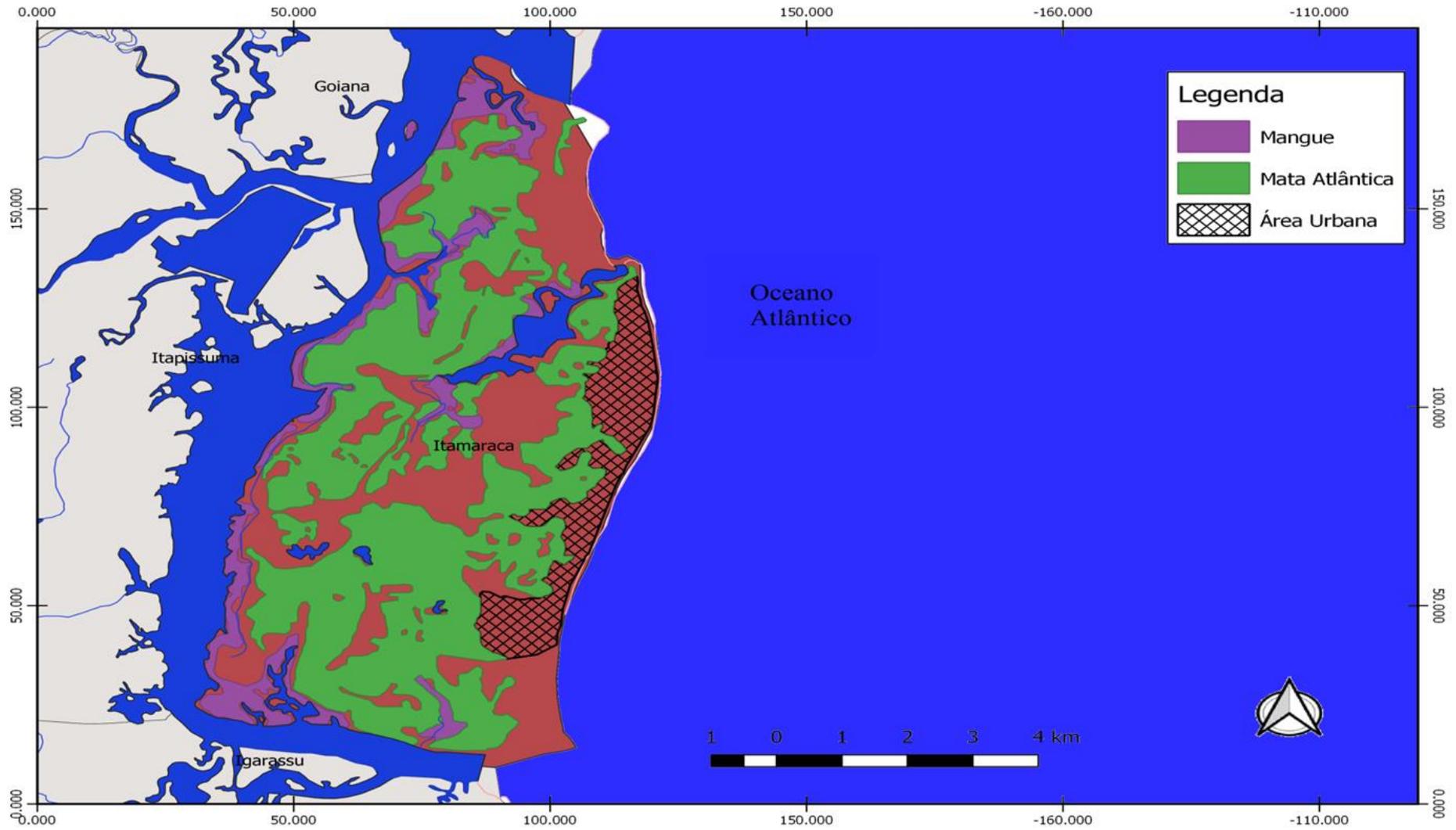
Segundo Januario et al. (2017) a Mata Atlântica é um biomas com maior diversidade no mundo. Na Ilha de Itamaracá a sua preservação se dá através de reservas, criadas pela Lei nº.

9.989 de Janeiro de 1987, sendo identificadas como: Lance dos Cações, Santa Cruz Jaguaribe, Engenho Macaxeira, Engenho São Jose e Engenho Amparo (BARTHEL, 2007).

Almeida (2011) relatou que existem indícios de substituição da mata nativa por uma mata secundária, sendo ela alterada pela ação antrópica ou, mais amplamente, pelo agroecossistema do coco-da-bahia, ocupando as colinas esculpidas nos sedimentos Barreiras e no cristalino, principalmente no setor sul da ilha.

Os mangues têm um importante papel na manutenção da vida marinha e para o equilíbrio ambiental, pois funcionam como áreas estaurinas (berçário natural) na fase inicial de vida de várias espécies marinhas, onde peixes, moluscos e crustáceos se reproduzem e se alimentam (ASCHENBRENNER, 2014).

Figura 16 - Mapa da Vegetação na Ilha de Itamaracá-PE



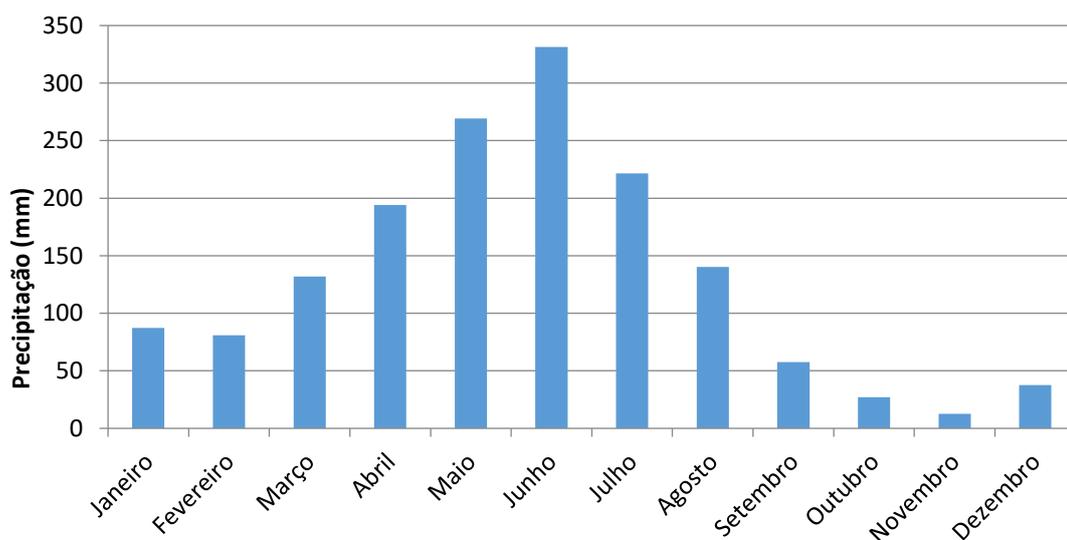
Fonte: Elaborado pelo autor a partir do banco de dados da SOS Mata Atlântica (2018)

3.3.2 Clima

O clima na região é classificado como tropical úmido do tipo As' ou pseudo-tropical da classificação climática proposta por Köppen com temperaturas médias sempre acima dos 18°C, com temperaturas máximas e mínimas variando de 34°C a 20°C, respectivamente, e umidade relativa do ar entono de 95%.

De acordo com dados da APAC (2018), as precipitações no município de Ilha de Itamaracá ocorrem em todos os meses do ano, com um índice pluviométrico anual entre 1250 mm a 2300 mm, sendo os meses compreendidos entre outubro e dezembro os mais secos do ano (Figura 17).

Figura 17 - Mensais pluviométricos no período de 2004 a 2017 no município da Ilha de Itamaracá.



Fonte: APAC (2018)

3.3.3 Relevo

O município apresenta uma diferenciação geomorfológica distinta, ao norte é observado o predomínio dos Tabuleiros e da Planície Costeira, enquanto que no sul há presença de domínio Colinoso. Em geral, podem-se observar as seguintes manifestações geomorfológicas: Domínio Colinoso, Tabuleiros Costeiros, Terraços Marinheiros Superiores e Inferiores, Baixios de Maré, Flechas Litorâneas Arenosas e Recife de Barreiras (VARELA, 2010).

A ocorrência do Domínio Colinoso se dá na porção central da ilha na forma de morros isolados, entendendo-se de norte e sul, margeando o compartilhamento geomorfológico dos tabuleiros. No Domínio Colinoso é encontrada a ocorrência das Formações geológicas cretácicas e paleocênias da Formação Gramame e Maria Farinha (ALMEIDA, 2011).

Os Tabuleiros Costeiros correspondem a Unidade Geológica da Formação de Barreiras, e são superfícies de erosão planas, inclinadas em direção ao litoral, que ocorrem distribuídos em uma faixa paralela à linha da costa, avançando no interior do continente por algumas dezenas de quilômetros. Por ter natureza sedimentar e níveis de permeabilidade e porosidade das rochas que lhe compõem, essa Unidade gerava áreas de fundo chatos, com grandes espaços entre as drenagens (MELIANI, 2012; ALMEIDA, 2011).

Os Terraços Marinheiros são depósitos de areias quartzosas inconsolidadas, cuja origem está associada às oscilações do nível do mar ocorridas durante o período Quaternário (CPRH, 2001). Os Recifes de Barreiras estão localizados paralelamente à linha costeira, podendo se estender por cerca de 10 km. Afloram na baixamar, sendo que alguns podem ser vistos ligeiramente acima do nível médio do mar (ALMEIDA, 2011).

Os Baixios de Maré são encontrados em locais onde não há declividades, estando sujeitos à ação das marés. Na Ilha de Itamaracá, estão localizados em todas as desembocaduras de rios, com destaque para o lado oeste, banhada pelo canal de Santa Cruz, que tem o seu contorno externo praticamente todo ocupado por esta sub-unidade (ALMEIDA, 2011).

3.3.4 Solo

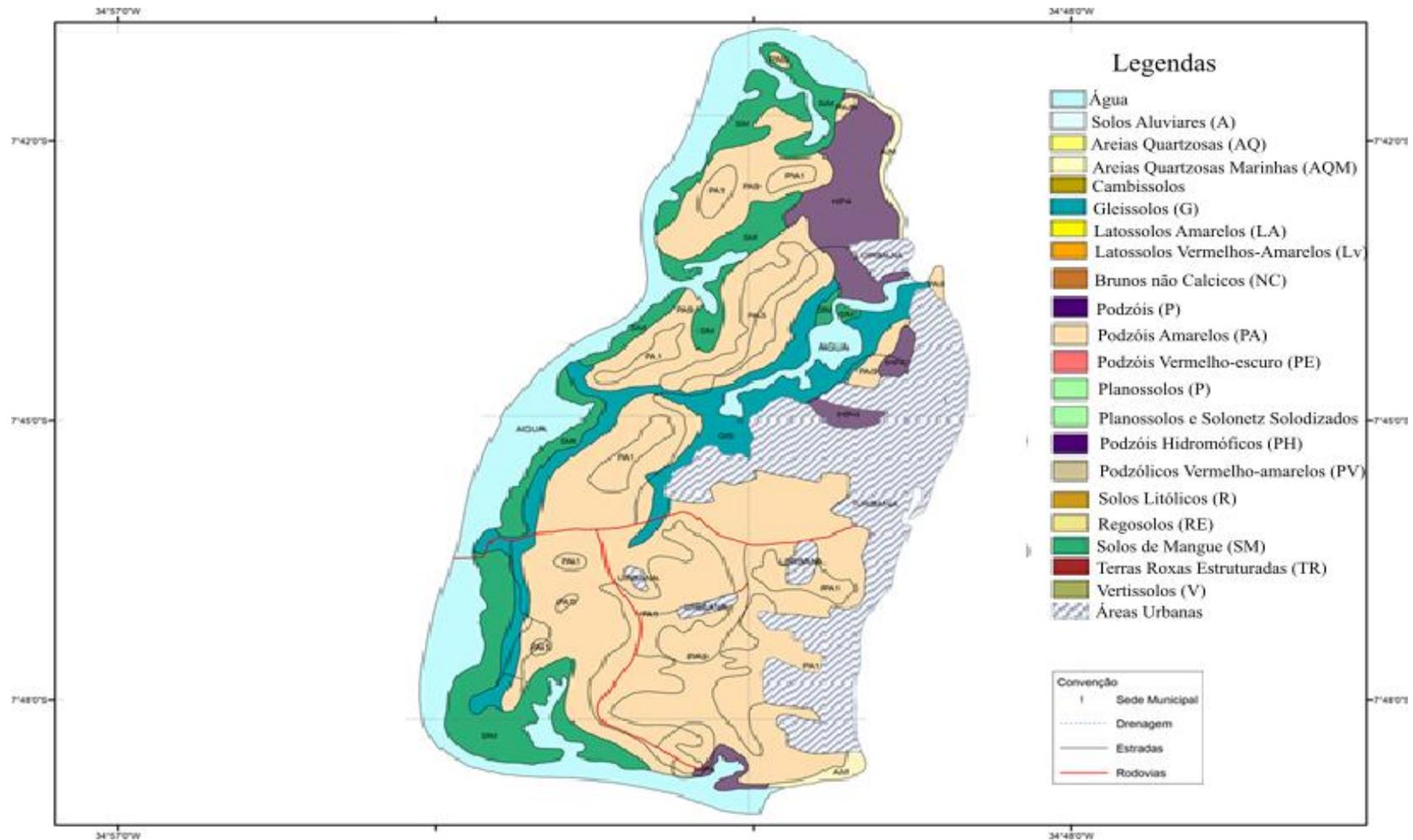
Os solos predominantes podem ser classificados em três tipos (Figura 18): Gleissolos (areias quartzosas marinhas distróficas), Argissolos (podzólico amarelo) e Espodossolos (solos indiscriminados de mangues), CPRH (2001).

Os Gleissolos são solos que apresentam horizonte diagnóstico do tipo glei, que se inicia dentro de 40 cm ou abaixo desse limite, mas dentro de 150 cm de profundidade; nessa condição, ocorre subjacente ao horizonte A ou E (EMBRAPA, 2013). Os solos do tipo Podzólico Amarelo ou Argissolos Amarelos são minerais, não-hidromórficos, com horizonte

A ou E seguido de horizonte B, de cor avermelhada até amarelada com teores de óxidos de ferro inferiores a 15% (ALMEIDA, 2011).

Os solos de Mangue são solos halomórficos muito pouco desenvolvidos, formados em ambientes de mangues a partir de sedimentos flúvio-marinhos recentes misturados com detritos orgânicos, o que faz com que apresente altos teores de sais provenientes do mar, sejam lamacentos e possua uma coloração escura (NETO; SILVA, 2011).

Figura 18 - Mapa de solos na Ilha de Itamaracá



Fonte: EMBRAPA (2001)

3.3.5 Hidrografia

O município de Itamaracá encontra-se no Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL-1), cujos únicos rios que nascem na ilha são o rio Jaguaribe e o rio Paripe. O principal corpo de acumulação é a Lagoa Pai Tomé. Por tratar-se de uma ilha, o município é banhado em todo o seu entorno pelo Oceano Atlântico. (ALMEIDA, 2011)

O elemento hidrográfico de maior importância na Ilha de Itamaracá é o Canal de Santa Cruz, que contorna a porção continental da ilha possuindo uma extensão de 22 km. Liga-se ao oceano nas extremidades norte na Barra de Catuama e ao sul na Barra Sul ou de Orange. O Canal de Santa Cruz possui 3602,76 ha compartilhados pelos municípios de Itamaracá, Itapissuma, Igarassu e Goiana, sendo a maior parte (41,3%) localizada em Itamaracá (CPRH, 2001). Além disso, tem uma grande importância ambiental, pois funciona como renovação periódica do ecossistema (SILVA et al., 2016).

A bacia do rio Jaguaribe ocupa 24,9% da Ilha de Itamaracá e 1,2% da superfície do Litoral Norte (VARELA, 2010). Limita-se ao norte, ao sul e a oeste com as microbacias insulares que circundam o Canal de Santa Cruz e, a leste, com as microbacias insulares atlânticas (CPRH, 2001). Ele nasce na porção centro-sul, na Reserva Ecológica da Mata Atlântica e segue a direção noroeste até as proximidades da PE-035, e deságua na praia do Sossego, isso numa extensão de pouco mais de 10 km (ALMEIDA, 2011).

3.3.6 Geologia

As principais formações geológicas são: formação Barreiras, Maria Farinha, Gramame, Beberibe e Depósitos do Quaternário que integram a Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba (Figura 19), e cuja sequência estratigráfica vai do Cretáceo ao Pleistoceno, e mergulha suavemente para leste, com inclinação da ordem de 28 m/km (CPRH, 2001).

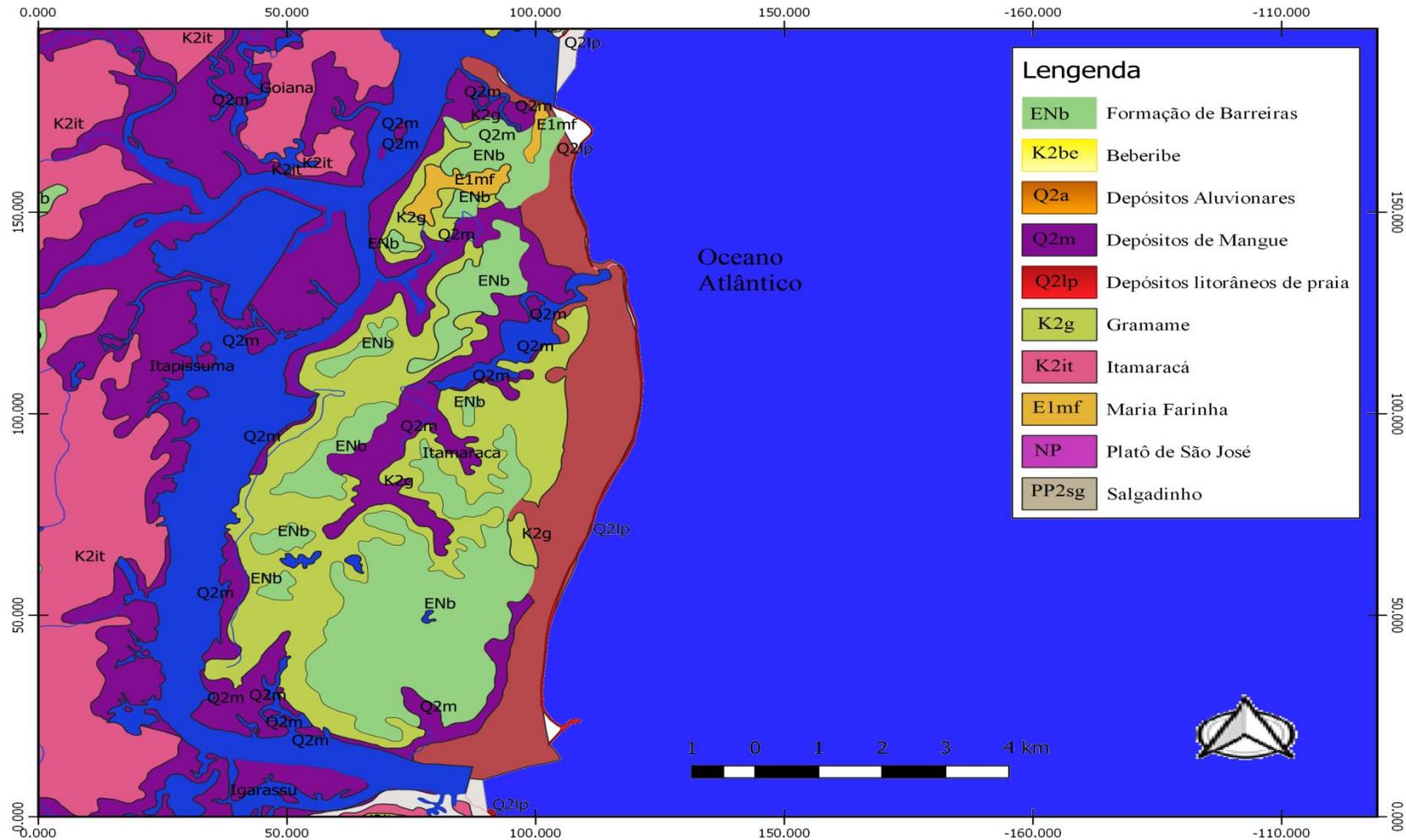
A Formação Barreiras é a mais extensa dentre as unidades geológicas presentes no litoral norte de Pernambuco aflorando em toda ilha. Sua espessura é bastante variável, em função de seu relacionamento com a superfície irregular do embasamento, sobre o qual repousa em

discordância erosiva regular. A Formação Maria Farinha se constitui por calcários detríticos de cizentos a cremes, intercalados de argilas (ALMEIDA, 2011).

A Formação Gramame está dividida em duas fácies, a fosfática que repousa diretamente sobre os arenitos da Formação Beberibe e à qual estão associadas às jazidas de fosforita existentes na área; uma calcária sobreposta à anterior e constituída por calcários areno-argilosos e argilosos (CPRH, 2001).

Segundo Almeida (2011) os Depósitos Quaternários encontrados na ilha são representados por Terraços Pleisocênicos e Holocênicos, depósitos de mangues e aluvionais, bancos de arenito, recifes de corais e depósitos flúvio-lagunares.

Figura 19 - Mapa de formação geológica na Ilha de Itamaracá



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do banco de dados do CPRM (2017)

4 METODOLOGIA

As informações apresentadas nesse capítulo estão relacionadas à apresentação dos tipos de materiais utilizados para realização dos ensaios, misturas e as suas caracterizações física e mecânica, além das análises mineralógicas e de erodibilidade. Para uma maior compreensão e clareza das ideias referentes ao tema, a pesquisa foi estruturada em 3 etapas, conforme identificados na Figura 20.

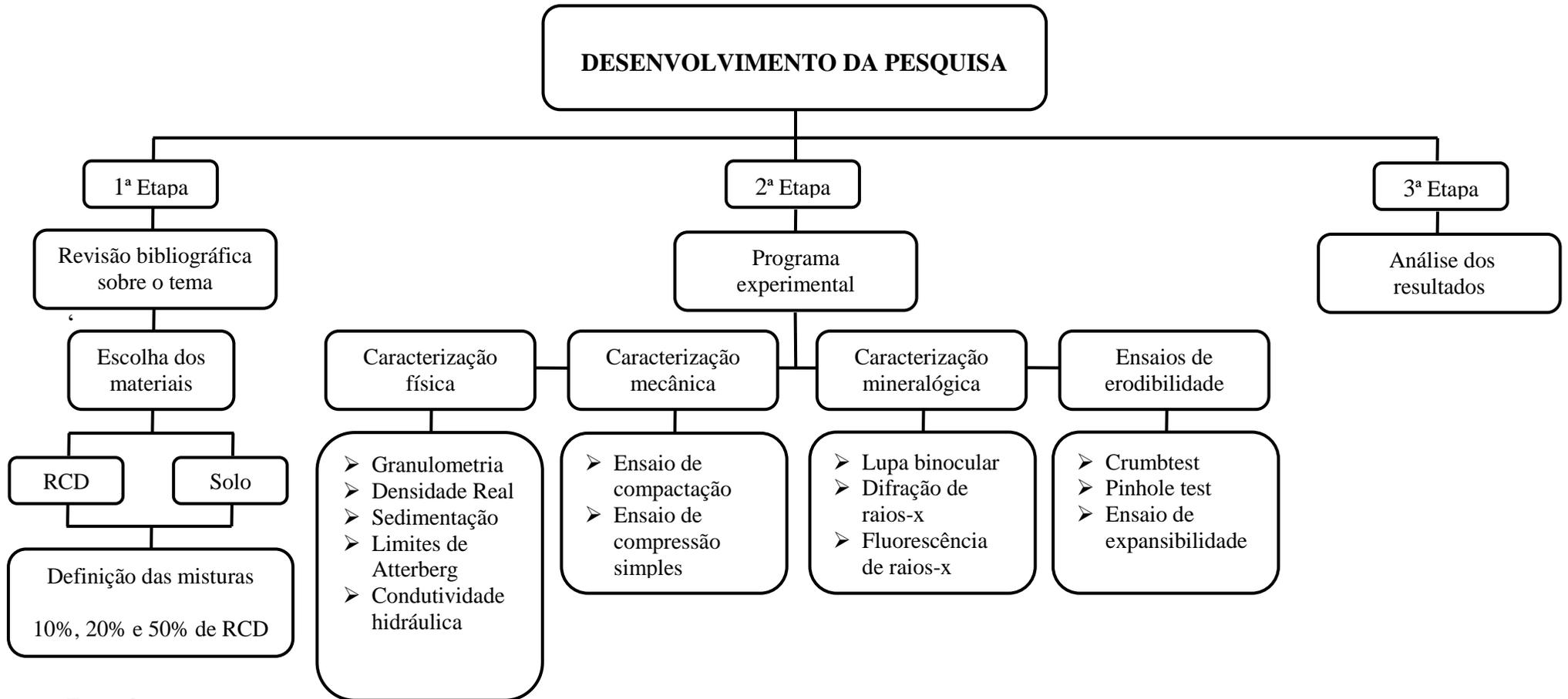
Na primeira etapa foi realizado um levantamento bibliográfico acerca do tema proposto. Em seguida, foi feita a escolha e coleta dos materiais e posteriormente a definição dos percentuais solo-RCD a serem utilizados para a realização dos ensaios.

Na segunda etapa foram realizados os ensaios de caracterização física (granulometria, densidade real, limites de *Atterberg* e condutividade hidráulica) e caracterização mecânica (compactação e compressão simples), utilizado o solo e o RCD, individualmente, e suas misturas. Foram realizados ensaios de caracterização mineralógica através da Lupa binocular, Difratometria de raios-X e Fluorescência de raios-X.

Especificamente no solo foi necessário estudar o seu comportamento frente à erosão, para isso, foram realizados os ensaios de *crumb test*, *pinhole test* e ensaio de expansibilidade, sendo o último, pelo comportamento apresentado, realizado também no RCD e nas misturas.

Na terceira etapa, foi realizada uma análise criteriosa dos dados obtidos e analisado a viabilidade de uso dos materiais em sistemas de cobertura de aterros sanitários.

Figura 20 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa



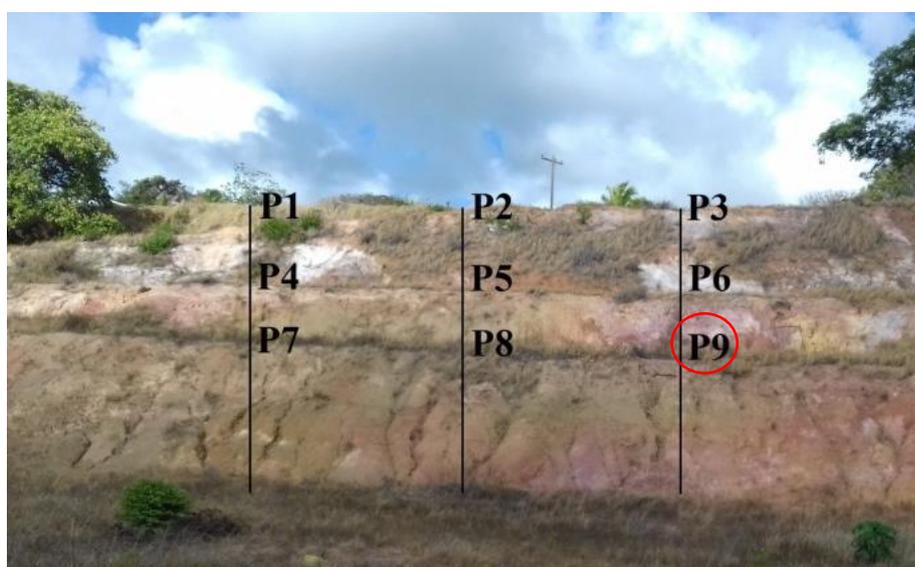
Fonte: O autor

4.1 Etapa 1- Escolha dos materiais

Na primeira etapa foi realizada a escolha e coleta dos materiais para o desenvolvimento da pesquisa e a preparação das amostras. Durante a inspeção na encosta, Bezerra (2018) observou diferenças significativas quanto ao tipo de solo. Diante disto, foram realizadas sondagens a trado em nove pontos, em diferentes profundidades devido à heterogeneidade do material (Figura 21).

Foi realizado o ensaio de granulometria de cada amostra de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2017). Por se tratar de um solo cujo objetivo é a utilização em sistema de cobertura de aterros sanitários, foi necessário a obtenção de um solo argiloso. Com a análise dos resultados foi identificado o ponto 9 (Tabela 6), por apresentar um maior percentual de finos (argila e silte), para ser utilizado em cada de cobertura final de aterros sanitários.

Figura 21 - Pontos escolhidos para as sondagens



Fonte: Bezerra (2018)

Foram coletados aproximadamente 250 kg de amostra de solo a uma profundidade de 10 cm, o suficiente para não possuir matéria orgânica (Figura 22). A amostra obtida foi transportada em sacos plásticos e levada ao Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco.

Tabela 6 - Análise granulométrica dos pontos realizados na encosta

Pontos	Camada	Argila	Silte	Areia	Pedregulho
P1	1 ^a	27%	4%	69%	-
	2 ^a	24%	2%	75%	-
	3 ^a	16%	3%	81%	0%
	4 ^a	13%	-	87%	-
	5 ^a	27%	3%	70%	-
	6 ^a	23%	2%	75%	-
	7 ^a	54%	4%	42%	-
P2	1 ^a	25%	1%	74%	-
	2 ^a	18%	-	82%	-
	3 ^a	18%	-	82%	-
P3	1 ^a	15%	-	85%	-
	2 ^a	24%	-	75%	1%
	3 ^a	18%	1%	81%	-
P4	1 ^a	25%	3%	72%	-
	2 ^a	57%	5%	38%	-
P5	1 ^a	16%	-	83%	1%
	2 ^a	20%	1%	79%	-
	3 ^a	22%	1%	77%	-
	4 ^a	32%	3%	65%	-
	5 ^a	37%	1%	62%	-
	6 ^a	30%	3%	65%	2%
	7 ^a	56%	2%	42%	-
P6	1 ^a	29%	2%	66%	3%
	2 ^a	10%	0%	90%	-
	3 ^a	13%	-	86%	1%
P7	1 ^a	63%	7%	27%	3%
P8	1 ^a	46%	7%	46%	1%
	2 ^a	57%	7%	36%	-
P9	1 ^a	66%	7%	27%	-
	2 ^a	27%	1%	72%	-
	3 ^a	35%	3%	62%	-
	4 ^a	40%	6%	54%	-
	5 ^a	57%	8%	35%	-
	6 ^a	16%	1%	83%	-

Fonte: Bezerra (2018)

Figura 22 - Encosta localizada no município da Ilha de Itamaracá



Fonte: O autor

A coleta do RCD foi realizada na Ciclo Ambiental, uma empresa de beneficiamento dos resíduos da construção civil localizada na cidade de Camaragibe-PE e que recebe os RCD provenientes da Região Metropolitana de Recife, que são pesados e depois são postos na área de transbordo e triagem, onde possíveis contaminantes são retirados.

Os resíduos passam pelo processo de beneficiamento que se dá com a máquina Gipokombi (Figura 23), com a qual se obtém os agregados reciclados por meio da britagem do material. Sua dimensão é reduzida pela britadora e um sistema de peneiras mecânicas que separa os agregados. Com essa máquina, é possível obter areia grossa, expurgo para aterro, brita cascalhento, brita 19 e brita 25.

Figura 23 - Beneficiamento do RCD



Fonte: O autor

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi coletado aproximadamente 250 kg de agregados correspondentes à granulometria de materiais passantes na peneira de 4,8 mm. Esse material foi levado em sacos plásticos para o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco onde foi realizado um novo peneiramento, com o objetivo de confirmar a granulometria do material.

De posse dos materiais foi definido as misturas de solo-RCD em 10%, 30% e 50% da massa seca do solo. As amostras foram então preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016) a qual prescreve o método de preparação para os ensaios de caracterização, conforme apresentado na Figura 24. A Tabela 7 apresenta as nomenclaturas que foram utilizadas nessa pesquisa de acordo com o percentual de RCD.

Figura 24 - Percentuais das misturas utilizadas na pesquisa

Fonte: O autor

Tabela 7 - Nomenclatura utilizada no programa experimental

Nomenclatura	% de Solo	% de RCD
SOLO	100	-
RCD	-	100
S90R10	90	10
S70R30	70	30
S50R50	50	50

Fonte: O autor

4.2 Etapa 2 - Programa experimental

Para avaliação das propriedades do agregado reciclado da construção civil para utilização em sistema de cobertura final de aterros, foi realizada a caracterização do solo e do RCD, a fim de obter suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e mineralógicas.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica de Pernambuco - POLI/UPE e no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Foram realizados ensaios no solo natural e em misturas com RCD em diferentes proporções, com o objetivo de avaliar a que melhor se adequa no sistema de cobertura final de aterros sanitários. A Tabela 8 apresenta a quantificação dos ensaios realizados.

Tabela 8 - Campanha de investigação geotécnica

	Ensaio	Quantidade
Caracterização física	Granulometria	5
	Densidade real	5
	Limites da Atterberg	10
	Condutividade hidráulica	15
Caracterização mecânica	Compactação	25
	Ensaio de compressão simples	60
Caracterização mineralógica	Lupa binocular	1
	Difratometria de raios-X	2
	Fluorescência de raios-X	2
Ensaio de erodibilidade	Ensaio de Crumb test	3
	Ensaio de Pinhole test	3
	Ensaio de expansibilidade	5
Total		136

Fonte: O autor

4.2.1 Ensaio de granulometria

Para a realização desse ensaio, utilizou-se a NBR 7181 (ABNT, 2017), em que foi possível determinar cada fração do material, conforme a Figura 25. Com isso, foi possível identificar a curva granulométrica do solo, do agregado reciclado e das misturas. Os materiais foram identificados de acordo com a Classificação Unificada de Solos (SUCS) e conforme a *Transportation Research Board (TRB)*.

Figura 25 - Ensaio de granulometria por sedimentação realizado no solo

Fonte: O autor

4.2.2 Densidade real

A determinação da massa específica do solo, do RCD e das misturas, foram obtidas de acordo com a execução de ensaio proposta pela NBR 6508 (ABNT, 1984), com aplicação do método do picnômetro e bomba à vácuo, conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Execução de ensaio de massa específica



Fonte: O autor

4.2.3 Limites de atterberg

Foram determinados os limites de liquidez e plasticidade de acordo com as metodologias propostas pelas NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016), com o objetivo de identificar a influência ou não dos finos de argilas presente no solo e nas misturas.

4.2.4 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica foi definida conforme a NBR 14545 (ABNT, 2000), sendo um dos principais ensaios para a seleção de materiais indicados para as camadas de aterro sanitário. Foram moldados corpos de prova compactados no peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de cada material, obtidos nos ensaios de compactação. Durante o processo de moldagem dos corpos de prova foi realizado o controle tecnológico do ensaio.

Durante a execução do ensaio uma pequena porção das amostras foi separada para a determinação da umidade, e depois de moldados os corpos de provas foram pesados e

medidos, o que permitiu determinar o seu grau de compactação. Para cada material (solo, RCD e misturas) foram executados três corpos de prova compactados, utilizando a energia proctor normal, sendo o coeficiente de condutividade hidráulica obtida através da média dos três ensaios.

Depois de moldados, os corpos de prova foram extraídos e transferidos para a câmara do permeâmetro de carga variável para a saturação ascendente do corpo de prova (Figura 27). A execução da montagem foi realizada de acordo com o método B descrito na NBR 14545 (ABNT, 2000).

Figura 27 - Ensaio de condutividade hidráulica. Corpo de prova preparado para a colocação no permeâmetro (a). Saturação ascendente do material (b)



Fonte: O autor

Após a saturação, foram realizadas as leituras para determinação da condutividade hidráulica (k). As medições foram finalizadas após três leituras de valores iguais. O “ k ” é encontrado conforme a Equação 1.

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- k é coeficiente de condutividade hidráulica, expresso de forma exponencial (base 10) com dois algarismos significativos, em cm^2 ;
- Δt é a diferença entre os instantes t_2 e t_1 , em s;
- h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 , em cm;
- h_2 é a carga hidráulica no instante t_2 , em cm;
- a é a área interna da bureta de vidro, em cm^2 ;
- H é a altura inicial do corpo de prova, em cm;
- A é a área inicial do corpo de prova, em cm^2 .

4.2.5 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016) e tem a finalidade, obter o peso específico aparente máximo e a umidade ótima do solo para uma determinada energia de compactação (Figura 28). O ensaio foi realizado com utilização de energia Proctor Normal e com reuso de materiais.

Figura 28 - Execução do ensaio de compactação



Fonte: O autor

4.2.6 Compressão simples

Esse ensaio seguiu a NBR 12770 (ABNT, 1992), que tem por objetivo determinar a compressão, não confinada (ou simples), de corpos de prova constituídos por solos coesivos, mediante aplicação de carga axial com controle de deformação. Para moldagem dos corpos de prova foi adicionado água ao material até chegar à sua umidade ótima e em seguida foi separado em três partes iguais, sendo envolvidas por papel alumínio e armazenadas em uma câmara úmida, evitando a perda da umidade para posterior moldagem.

A moldagem dos corpos de prova foi feita de forma estática em três camadas no interior de um molde cilíndrico com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (Figura 29). Para promover uma maior interação entre estas camadas, cada superfície compactada foi levemente escarificada antes da prensagem da camada superior.

Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão



Fonte: O autor

Durante o processo de execução dos corpos de prova foi feito o controle tecnológico. Para isso, durante a execução, uma pequena porção das amostras foi separada para a determinação da umidade, e depois de moldados os corpos de prova foram pesados e medidos, o que permitiu determinar o seu grau de compactação (Figura 30). De acordo com os critérios da Tabela 9 os corpos de provas puderam ser aceitos ou descartados para o rompimento, sendo a memória de cálculo apresentada no Apêndice A.

Figura 30 - Controle tecnológico dos corpos de prova do solo



Fonte: O autor

Tabela 9 - Critérios adotados para aceitação dos corpos de prova

Parâmetros	Critérios
Grau de compactação (GC)	100% \pm 3%
Teor de umidade (%)	Valor \pm 3%
Dimensões (mm)	Diâmetro 50 \pm 0,5; Altura 100 \pm 1

Fonte: Macedo (2013)

Foram confeccionados, para cada rompimento três corpos de prova, totalizando 60 corpos de prova. O tempo de cura até ocorrer o rompimento foi de 7 dias, 28 dias, 60 dias e 120 dias, sendo rompidos a uma velocidade de $0,040 \text{ mm.s}^{-1}$ com a prensa de CBR no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Pernambuco.

4.2.6.1 Análise estatística dos valores de resistência à compressão simples

Para verificar a representatividade da média dos valores individuais de resistência à compressão simples das amostras estudadas, é preciso utilizar técnicas estatísticas, com as quais se verifique a presença de dados inconsistentes. Dentre as técnicas, tem-se o Critério de Chauvenet, uma análise estatística comumente utilizada por autores, tais como Neves e Silva (2016) e Callegaro (2014).

O critério utiliza o descarte de dados inconsistentes no ensaio de compressão simples, sendo possível especificar se o valor medido pode ser aceito ou descartado, dependendo de critérios estabelecidos. O tamanho da amostra é um importante fator para o método, pois, quanto menor a amostra, maiores são as chances dos valores obtidos influenciarem a média. Isso faz com que a utilização de poucos dados tenha exigências mais rígidas (CALLEGARO, 2014).

Segundo Soares (2013), um valor pode ser rejeitado se a probabilidade de se obter um desvio da média for menor que $1/2n$, sendo n a quantidade de repetições, para $n \geq 3$. Os resultados aceitáveis devem estar dentro da faixa, cuja probabilidade é $1-1/(2n)$. Para aplicação do Critério de Chauvenet basta calcular a média (Equação 2), o desvio padrão (Equação 3) e a razão do desvio individual para o desvio padrão (Equação 4). Comparando-se com um valor de referência ΔR_0 (Tabela 10) e obtendo-se o valor menor que ΔR , deverá ser excluído o resultado do corpo de prova.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_1^N x_1 \quad \text{Equação 2}$$

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sum [(x_1 - \bar{x})^2]^{1/2} \quad \text{Equação 3}$$

$$\Delta R = \frac{|(x_1 - \bar{x})|}{\sigma} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

\bar{x} = média dos valores de RCS de cada material e idade de rompimento

σ = desvio padrão

N = repetição do número dos ensaios

x_1 = valor de RCS de cada corpo de prova

Tabela 10 - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.

Número de medidas	ΔR_0 (valor de referência)
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57

Fonte: Adaptado de Neves e Silva (2016)

4.2.7 Ensaios de mineralogia

A caracterização mineralógica, para determinação da composição qualitativa e quantitativa do solo e do RCD, foi realizada no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Minas da UFPE, Laboratório de Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos da Universidade Federal de Pernambuco. Foram feitas as análises por lupa binocular, difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (EDX).

O estudo morfológico e composicional dos grãos foi feito sobre a fração total de areia em lupa binocular. A análise só foi realizada na amostra de RCD, visto que, o solo apresentava muitos finos, os quais não seriam possíveis serem identificados com o uso da lupa binocular. A metodologia com uso da lupa binocular STEMI 508, Figura 31, baseia-se na secagem prévia da amostra de RCD ao ar, em seguida, o material é passado na peneira de abertura de 2 mm sob água corrente. O material retido foi colocado na estufa a 100° C, e depois armazenado em saco plástico, etiquetado e levado ao laboratório.

Figura 31 - Análise do RCD com a lupa binocular



Fonte: O autor

A difração por raios-X, por sua vez, foi realizado na fração fina do solo e RCD no Laboratório de Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e interpretado no Departamento de Engenharia de Minas da UFPE. Consiste em uma técnica de caracterização microestrutural de materiais cristalinos que permite determinar qualitativamente a composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes no solo tais como quartzo, feldspato, mica, caulinita, dentre outros (ARAUJO, 2017).

O ensaio foi realizado com um difratômetro da marca Shimadzu (XRD-6000), com radiação K-alfa do cobre, sendo o pó natural não orientado a forma de análise e com as seguintes condições do equipamento: voltagem de 40kV, amperagem de 30 mA, intervalo de 5 a 70 graus e velocidade de análise 2°/min (Figura 32).

Figura 32 - Difratômetro Shimadzu (XRD-6000)



Fonte: O autor

A fluorescência de raios-X (EDX) é uma técnica que permite caracterizar os elementos presentes na amostra de solo, de forma quantitativa estabelecendo a proporção em que cada elemento (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , MnO , ZrO_2 , SrO , K_2O e Fe_2O_3) se encontra presente na amostra. Para a sua realização as amostras foram levadas em forma de pó (material passante na peneira 0,075mm) ao Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos da Universidade Federal de Pernambuco, onde foram realizados os ensaios no solo e RCD.

Para isso, as amostras foram secas em estufa a 110°C , enquanto que uma porção da amostra seca foi levada a uma mufla, a 1000°C , por 2 horas, para determinação de perda ao fogo. Outra porção de amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados da varredura semiquantitativa foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo.

4.2.8 Ensaios de erodibilidade

Foram realizados ensaios que permitem analisar qualitativamente a suscetibilidade dos solos aos processos erosivos.

4.2.8.1 Ensaio de crumb test

Para o conhecimento do comportamento do solo, foi realizado o ensaio de *crumb test* que possibilita caracterizar uma susceptibilidade à dispersão de uma amostra associada a solos dispersivos. Foram escolhidos três torrões de solo com diâmetro entre 6 mm e 10 mm, em formato arredondado, de acordo com a NBR 13601 (ABNT, 1996).

Em seguida, cada torrão foi colocado em um béquer contendo 150 ml de água destilada, permanecendo em repouso durante uma hora. Foram observadas as reações ocorridas e classificado o solo de acordo com a dispersão, por meio da análise visual, obedecendo aos critérios propostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Grau de dispersividade

Graus	Características
Grau 1 - Comportamento não-dispersivo	O torrão de solo pode absorver água, sofrer esboroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido, provocado por coloides em suspensão.
Grau 2 - Comportamento levemente dispersivo	Há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão (se a turvação for facilmente visível, registrar como grau 3).
Grau 3 - Comportamento moderadamente dispersivo	Observa-se uma nuvem de coloides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer, facilmente reconhecível.
Grau 4 - Comportamento fortemente dispersivo	Observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água torna-se turva.

Fonte: NBR 13601 (1996).

4.2.8.2 Ensaio de *pinhole test*

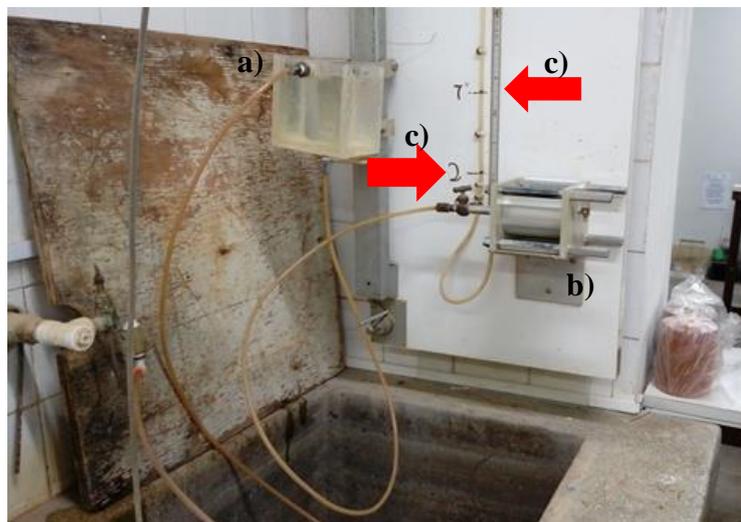
A realização do ensaio do furo de agulha (*pinhole test*) seguiu a metodologia da NBR 14114 (ABNT, 1998). Consiste na aplicação de fluxo sobre diferentes cargas hidráulicas (50 mm, 180 mm, 380 mm e 1020 mm), através de um furo de 1 mm de diâmetro em intervalos de tempo iguais. Para isso, foram moldados 3 corpos de prova de 38 mm de altura compactados em cinco camadas de 16 golpes, cujo solo foi mantido, previamente, em câmara úmida por 24 horas em seu limite de plasticidade (Figuras 33 e 34).

Figura 33 - Moldagem do corpo de prova para o ensaio de *pinhole test*



Fonte: O autor

Figura 34 - Ensaio de pinhole: a) tanque para fornecimento de água com carga constante; b) cilindro metálico com diâmetro interno de 35,7mm e altura de 100 mm; c) marcações das cargas hidráulicas.



Fonte: O autor

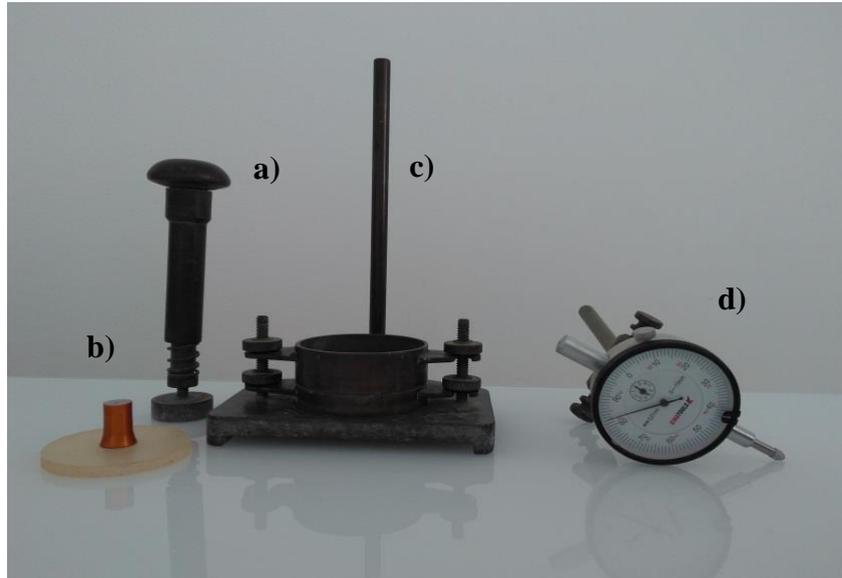
Durante o ensaio foi determinada a variação da vazão e coloração da água, enquanto que ao seu término foi avaliada a variação do diâmetro do furo, e de acordo com o obtido se classifica o solo como dispersivo ou não. Conforme a NBR 14114 (ABNT, 1998) o solo pode ser classificado em seis categorias: ND1, ND2, ND3, ND4, D2 e D1, em ordem crescente de dispersividade.

4.2.8.3 Ensaio de expansibilidade

O ensaio de expansibilidade foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT 160/2012, no solo puro, RCD e misturas (Figura 35). A expansibilidade é uma característica que deve ser evitada em aterros sanitários, visto que ela pode provocar fissuras que comprometem a estanqueidade da cobertura.

Para a realização foi necessário homogeneizar uma amostra com cerca de 100 g passante na peneira 0,42 mm (Nº 40), obtido de acordo com o método do DNER-ME 041/94. Em seguida, a amostra foi seca em estufa a $60^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ}$ durante 16 h e depois posta para secar em um recipiente hermeticamente fechado. Depois do processo de preparação da amostra, o solo foi compactado em duas camadas aproximadamente iguais, de tal forma que o total excedeu ligeiramente a borda do molde.

Figura 35-Equipamentos utilizados no ensaio de expansibilidade: a) soquete de compactação; b) placa de plástico; c) molde cilíndrico fixado na base da pedra porosa; d) extensômetro



Fonte: O autor

Cada camada foi compactada por 50 golpes uniformemente distribuídos, com frequência de uma compressão por segundo. Em seguida foi nivelado o solo, e sobre a superfície plana foi colocada uma placa de acrílico para apoiar a haste do deflectômetro. O aparelho foi então colocado dentro de um recipiente de vidro e foi adicionado água até a face superior da pedra porosa que está em contato com o solo (Figura 36).

Figura 36 - Ensaio de expansibilidade em execução



Fonte: O autor

As leituras foram realizadas em intervalos de 15 min, durante a primeira hora de ensaio, e posteriormente a cada hora, até completar um total de 24 h, ou até que duas leituras com intervalos de 2h apresentem os mesmos valores ou valores decrescentes. O resultado do ensaio de expansibilidade é dado pela Equação 5:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{15} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

l_0 = leitura inicial do deflectômetro

l_1 = leitura final do deflectômetro

Santos e Castro (1965) investigaram, em Lisboa, um grande número de propriedades mecânicas físicas e químicas, que influenciam a resistência do solo frente à erosão. Dentre essas propriedades, tem-se a granulometria, limites de Atterberg, expansibilidade e análises químicas.

- Os solos que apresentam comportamento de regular a bom frente à erosão seguem as seguintes condições:

- 49% < % que passa # 40 < 96%;
- expansibilidade (ε) \leq 11% e
- $0,52 < a < 0,92$, onde “a” é obtido pela Equação 6

$$a = \frac{\sum Y}{100 n} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

Y = porcentagem que passam nas peneiras: #7, #14, #25, #50, #100, #200.

n = número de peneiras

- Solos de mau comportamento frente à erosão: fora dos limites estabelecidos anteriormente

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

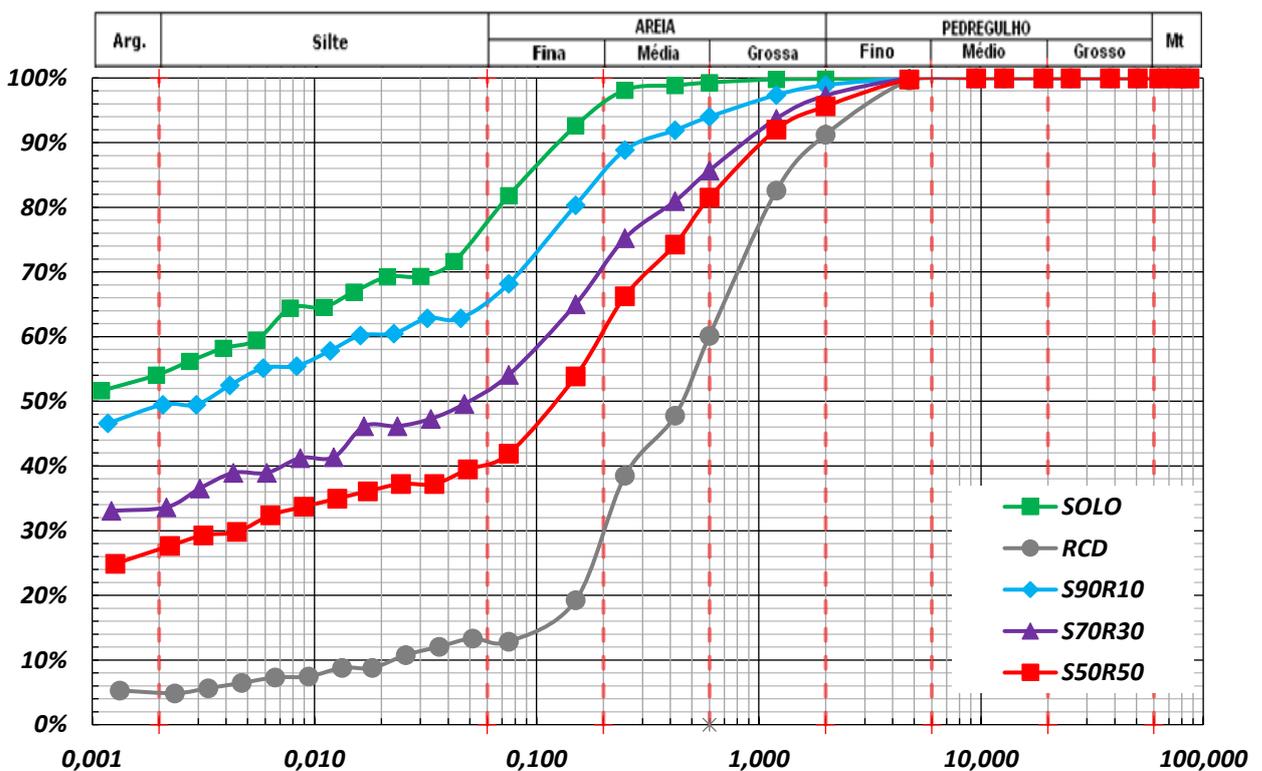
Neste capítulo, serão apresentados os resultados provenientes do programa experimental de laboratório compreendendo os resultados e análises das caracterizações físicas, caracterização mecânica e ensaios de erodibilidade.

5.1 Caracterização Física

5.1.1 Granulometria

Na análise granulométrica, o solo se apresentou como material argiloso com 54%, enquanto o RCD, arenoso com 77%. Como esperado, à medida que o percentual de agregado reciclado incorporado na mistura aumentava, o material se tornou mais granular, com maiores percentuais de areia, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Curva granulométrica do solo e RCD



Fonte: O autor

O RCD apresentou um coeficiente de uniformidade (Cu) de 24,00 e de curvatura (Cc) de 2,67, que segundo a NBR 6502 (ABNT, 1999) se classifica como um solo bem graduado, enquanto que os solos e as misturas não apresentaram coeficientes de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc), visto que não apresentaram um diâmetro efetivo, ou seja, nas suas curvas granulométricas, não foi possível identificar o diâmetro na peneira para a qual, 10% das partículas do material ficaram retidos.

De acordo com a USEPA (2004), o solo para utilização em aterros deve possuir porcentagem de finos (argila e silte) entre 30% a 50%. Já para a CETESB (1993), deve conter mais de 30% de granulometria fina. Diante disso, o solo e as misturas possuem características adequadas considerando os parâmetros da CETESB (1993), entretanto, pela limitação de até 50% de finos pela USEPA (2004), apenas as misturas S70R30 e S50R50 apresentam granulometrias adequadas para uso em aterro sanitário.

A Tabela 12 apresenta os percentuais das frações das amostras de solo, RCD e misturas destes materiais no presente estudo. Por meio das curvas granulométricas foi possível obter a classificação para o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e *Transportation Research Board* (TRB), em que os solos são reunidos em grupos e subgrupos a partir de sua granulometria, limites de consistência e do índice do grupo (Tabela 13).

Tabela 12 - Fração granulométrica dos materiais

Fração (mm)	Misturas				
	SOLO	RCD	S90R10	S70R30	S50R50
Argila	54%	5%	49%	33%	27%
Silte	22%	9%	14%	16%	13%
Areia	24%	77%	36%	48%	56%
Pedregulho	0%	9%	1%	3%	4%

Fonte: O autor

No que diz respeito ao Sistema de Unificado dos Solos (SUCS) o solo foi classificado como uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH). Comparativamente, autores que estudaram solos de aterros sanitários como Araujo (2017) chegou à classificação CL, ou seja, uma argila inorgânica de mediana plasticidade. Essa diferença de plasticidade se deu pela grande presença de finos (silte e argila) que chegou a 76% contida no solo em estudo.

Tabela 13 - Classificação dos materiais segundo o SUCS e a TRB.

Materiais	SUCS	TRB
SOLO	CH argila inorgânica de alta plasticidade	A-7-5 solo argiloso
RCD	SW areia bem graduada	A-2-4 solo arenoso
S90R10	CL argila inorgânica de mediana plasticidade	A-6 solo argiloso
S70R30	CL argila inorgânica de mediana plasticidade	A-6 solo argiloso
S50R50	CL argila inorgânica de mediana plasticidade	A-6 solo argiloso

Fonte: O autor

O agregado reciclado por sua vez, foi classificado como areia bem graduada (SW), sendo esta classificação também obtida por Macedo (2016). Esta classificação não é recomendada, para ser utilizada em camadas de cobertura de aterros sanitários como barreira hidráulica, segundo CETESB (1993). Entretanto, poderá ser utilizada como camada de proteção, drenagem ou fundação. Já as misturas S90R10, S70R30 e S50R50 foram classificadas como inorgânica de mediana plasticidade, o que segundo a CETESB (1993) pode ser utilizado em camadas de aterros sanitários.

De acordo com a classificação do TRB o solo foi enquadrado no subgrupo A-7-5 o que de acordo com o DNIT (2006), trata-se de um material com índice de plasticidade moderado em relação ao limite e liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume. O RCD por sua vez foi enquadrado no subgrupo A-2-4, ou seja, um material constituído principalmente de areia. As misturas se enquadraram no subgrupo A-6, sendo tratadas como materiais argilosos.

5.1.2 Densidade real

A Tabela 14 apresenta os valores para densidade real dos grãos, solo, RCD e misturas. Observou-se que o solo foi o material com maior densidade real e o RCD o de menor densidade.

Tabela 14 - Densidade Real das amostras

Amostra	Densidade Real (g/cm³)
Solo	2,73
RCD	2,61
S90R10	2,66
S70R30	2,66
S50R50	2,61

Fonte: O autor

Especificamente sobre o RCD, a densidade real foi de 2,61 g/cm³, tais valores são próximos aos encontrados por Silva (2018), Macedo (2016), Costa, C (2015) e Macedo (2013), que encontraram 2,64 g/cm³; 2,62 g/cm³; 2,65 g/cm³; 2,63 g/cm³, respectivamente. Nota-se ainda que à medida que o percentual de agregado reciclado incorporado na mistura aumentava, a sua densidade real diminuía. Isso se deve ao fato de que o RCD é constituído por grãos maiores aos do solo, o que faz com que a sua área específica seja menor e, conseqüentemente, tenha uma densidade menor.

5.1.3 Limites de atterberg

Os resultados obtidos para os limites de liquidez e plasticidades do solo, RCD e misturas solo-RCD são apresentados na Tabela 15. Vale ressaltar que para o RCD o resultado foi de não líquido (NL) e não plástico (NP).

Observa-se que a adição do RCD nas misturas ocasiona uma diminuição no índice de plasticidade. Esta tendência também foi observada por Silva (2018), Costa, C. (2015) e Dias (2014). Vale destacar que com 50% de RCD no solo, o material deixou de ser altamente plástico para medianamente plástico. Esta redução é um fator positivo, visto que solos altamente plásticos, segundo Moraci et al. (2017), são difíceis de compactar, principalmente em cobertura de aterros sanitários.

Tabela 15 - Limites de atterberg

	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação
Solo	53,28	21,75	31,53	Altamente Plástico
RCD	NL	NP	-	Não Plástico
S90R10	42,98	20,97	22,01	Altamente Plástico
S30R70	36,87	20,72	16,15	Altamente Plástico
S50R50	31,68	20,69	10,99	Medianamente Plástico

Fonte: O autor

Outra análise que pode ser feita com base nos limites de Atterberg é a sua viabilidade em uso em aterros sanitários com base nos requisitos propostos pela CETESB (1993) que determina um $IP \geq 15\%$ e um $LL \geq 30\%$. Nesse caso, todas as misturas solo-RCD possuem características adequadas para o uso em aterros sanitários. Já a USEPA (2004) determina um IP entre 7% a 15%, sendo apenas a mistura S50R50 adequada para este objetivo.

5.1.4 Condutividade hidráulica

Os resultados encontrados para a condutividade hidráulica do solo, RCD e misturas são apresentados na Tabela 16 e os critérios quanto à aceitação dos corpos de provas são mostrados no Apêndice B. Como esperado, o solo apresentou a menor condutividade hidráulica e à medida que o RCD foi incorporado na mistura, o valor da condutividade aumentou. A adição de RCD provocou uma diminuição dos índices de vazios, o que reduz as deformações na camada de camada de cobertura do aterro.

Tabela 16 - Condutividade hidráulica à temperatura de 20°C

Material	Densidade Real (g/cm³)	Condutividade Hidráulica (m.s⁻¹)
Solo	2,73	$1,05 \times 10^{-9}$
RCD	2,61	$3,86 \times 10^{-6}$
S90R10	2,66	$1,22 \times 10^{-9}$
S70R30	2,66	$1,77 \times 10^{-9}$
S50R50	2,61	$7,18 \times 10^{-9}$

Fonte: O autor

O solo apresentou uma condutividade hidráulica de $1,05 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$, sendo possível o seu uso em camada que tenha função de barreira hidráulica, ou ainda em camadas convencionais, desde que não seja em lugares de clima árido e semiárido, o que pode provocar fissuras por ressecamento, devido a seu alto teor de finos (silte e argila).

O solo estudado possui uma condutividade hidráulica menor, quando comparados aos dados de Araujo (2017), que analisou o uso de solo compactado no aterro de resíduos sólidos de Campina Grande-PB; Santos, D. (2015), que analisou a camada de cobertura de solo compactado do aterro de Muribeca (Jaboatão dos Guararapes-PE); e Dias (2014), que estudou solo tropical para utilização em camada de cobertura de aterros sanitários.

As misturas S90R10, S70R30 e S50R50 apresentaram condutividades hidráulicas de $1,22 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$; $1,77 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ e $7,18 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. Ou seja, a incorporação do RCD na mistura provocou um aumento da condutividade hidráulica em até 580% na mistura S50R50. Apesar disso, todas elas continuaram sendo compatíveis com o uso em aterros sanitários, segundo as normas NBR 13896 (ABNT, 1997) e USEPA (2004).

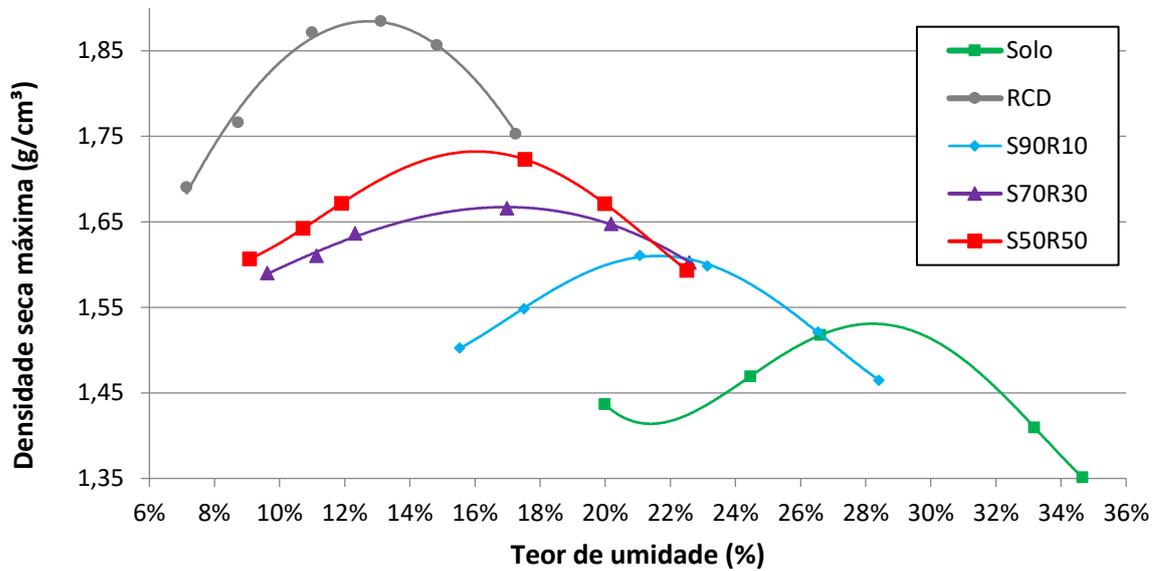
Pode-se ainda definir que a mistura S50R50 foi a que apresentou melhores resultados. Além disso, esse teor diminuiu a quantidade de finos (silte e argila) do material, reduzindo assim a sua plasticidade, bem como a sua susceptibilidade às fissuras por retração, nos ciclos de secagem e umedecimento, o que aumenta a sua condutividade hidráulica (MORACI et al., 2017).

O RCD apresentou um coeficiente de condutividade hidráulica de $3,86 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, sendo indicado apenas para camada de superfície ou camada de fundação. Para as demais camadas o material não é indicado, conforme a NBR 13896 (ABNT, 1997) e USEPA (2004).

5.2. Caracterização mecânica

5.2.1 Compactação

As curvas de compactação do solo, RCD e misturas solo-RCD são apresentadas na Figura 38, enquanto que os valores relacionados ao peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótima são mostrados na Tabela 17.

Figura 38 - Curvas do ensaio de compactação

Fonte: O autor

Tabela 17 - Umidades ótimas e densidades seca máxima

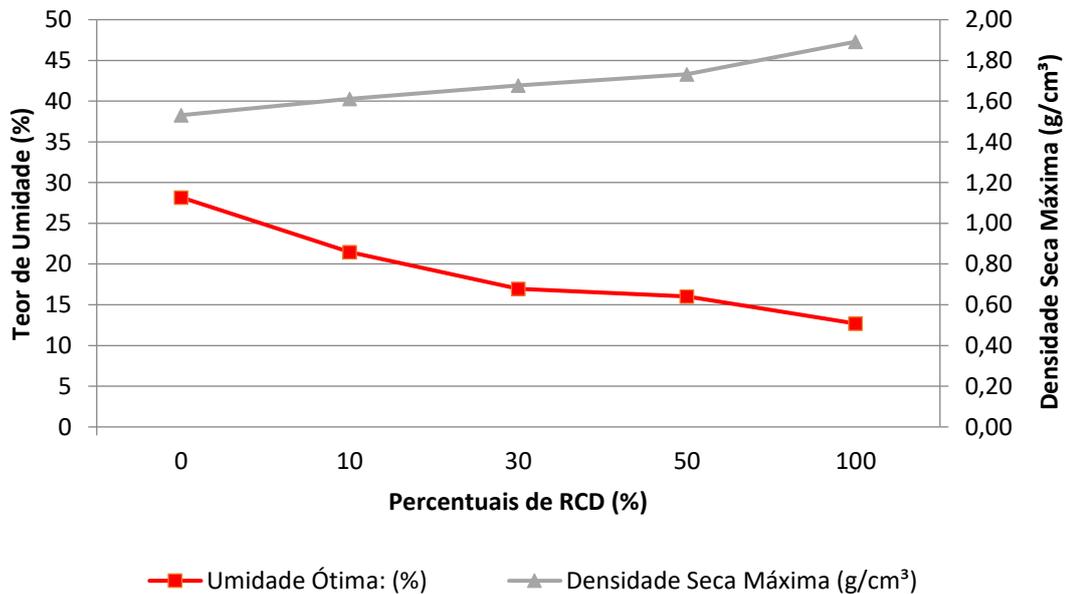
	Solo	RCD	S90R10	S30R70	S50R50
Umidade Ótima: (%)	28,19	12,69	21,47	16,95	16,02
Densidade Seca Máxima (g/cm³)	1,531	1,892	1,612	1,677	1,732

Fonte: O autor

Observou-se que o solo apresentou um peso específico seco máximo de 1,531 g/cm³ e umidade ótima de 28,19%, valores próximos ao encontrado por Costa, C. (2015), que foi 1,34 g/cm³ para o peso específico máximo e 30,80% para umidade ótima. Por sua vez, o RCD apresenta um peso específico seco máximo de 1,892 g/cm³ e umidade ótima de 12,69%, valores próximos ao encontrado por Macedo (2016) que foi 1,91 g/cm³ para o peso específico máximo e 13,40% para umidade ótima.

Verificou-se ainda que houve um aumento do peso específico máximo e diminuição da umidade ótima, conforme o acréscimo do teor de resíduo na mistura, Figura 39. Esta tendência é compatível com os resultados alcançados por diversos autores como Pivetta (2017), Macedo (2016) e Costa, C. (2015).

Figura 39 - Variação dos parâmetros das mistura solo-RCD

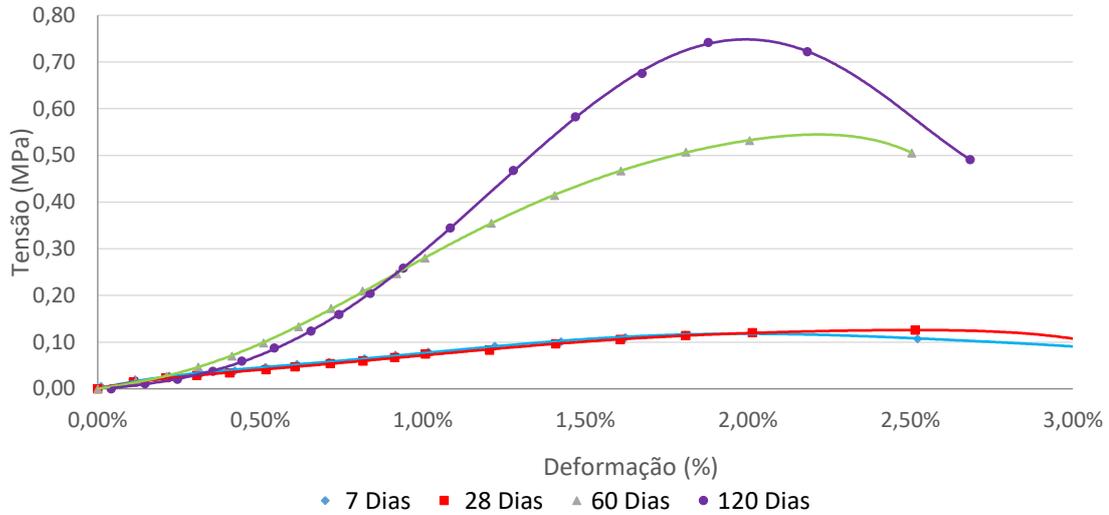


Fonte: O autor

Essa relação pode ser explicada devido ao tamanho das partículas do solo, que está relacionada com a sua área específica, que quanto menor (no caso do solo) precisa de mais água para ser envolvida, e conseqüentemente apresentará uma menor densidade seca máxima. Ao acrescentar RCD, que tem partículas maiores, a quantidade de água diminui e a densidade seca máxima aumenta.

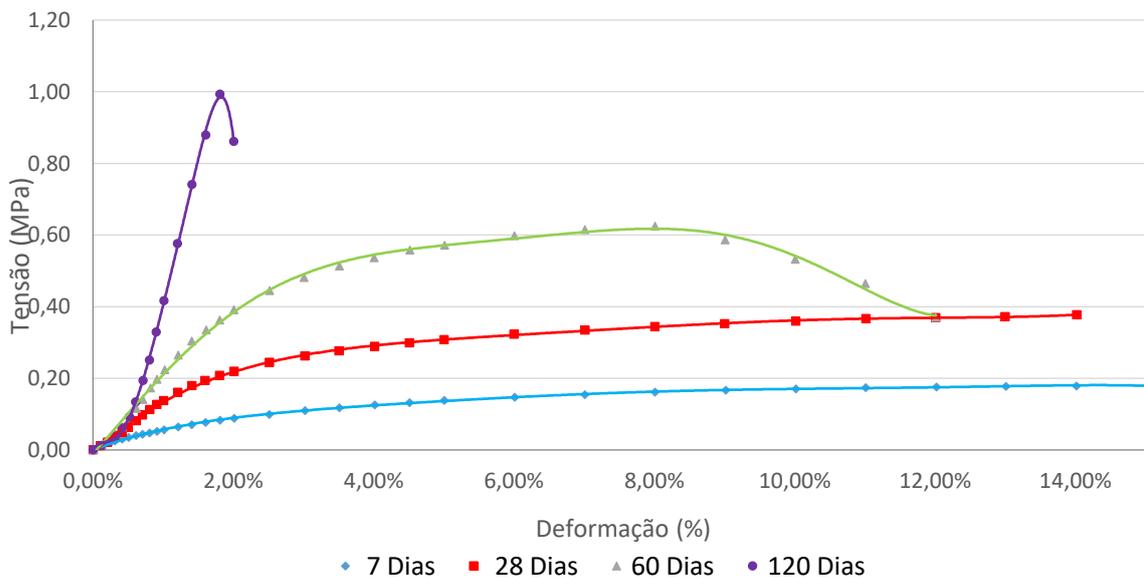
5.2.2 Resistência à compressão simples (RCS)

A Figura 40 apresenta as curvas tensão x deformação, obtidas no ensaio de resistência à compressão simples realizado no RCD. O agregado reciclado teve um incremento de 480% de resistência entre os rompimentos de 7 e 120 dias, passando de 0,132MPa para 0,759 MPa.

Figura 40 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS no RCD

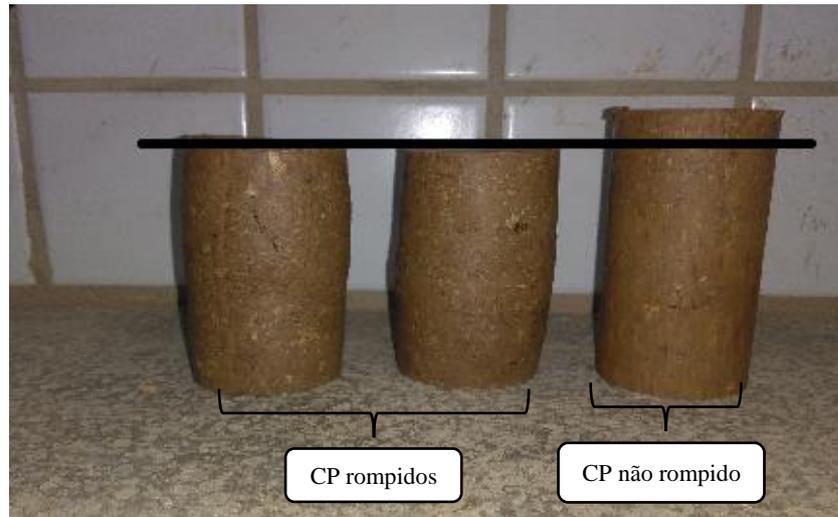
Fonte: O autor

O solo apresentou um incremento de resistência à compressão simples de cerca de 450% entre os rompimentos de 7 dias e 120 dias, passando de 0,182 MPa para 0,993 MPa (Figura 41). Aos 7 dias e 28 dias verificou-se que a resistência não atingiu o valor de pico, sendo considerada a resistência máxima aquela referente ao maior deslocamento. Os corpos de provas ensaiados não apresentaram traços de rompimentos característicos, contudo, demonstraram um deslocamento axial conforme a Figura 42.

Figura 41 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS no solo

Fonte: O autor

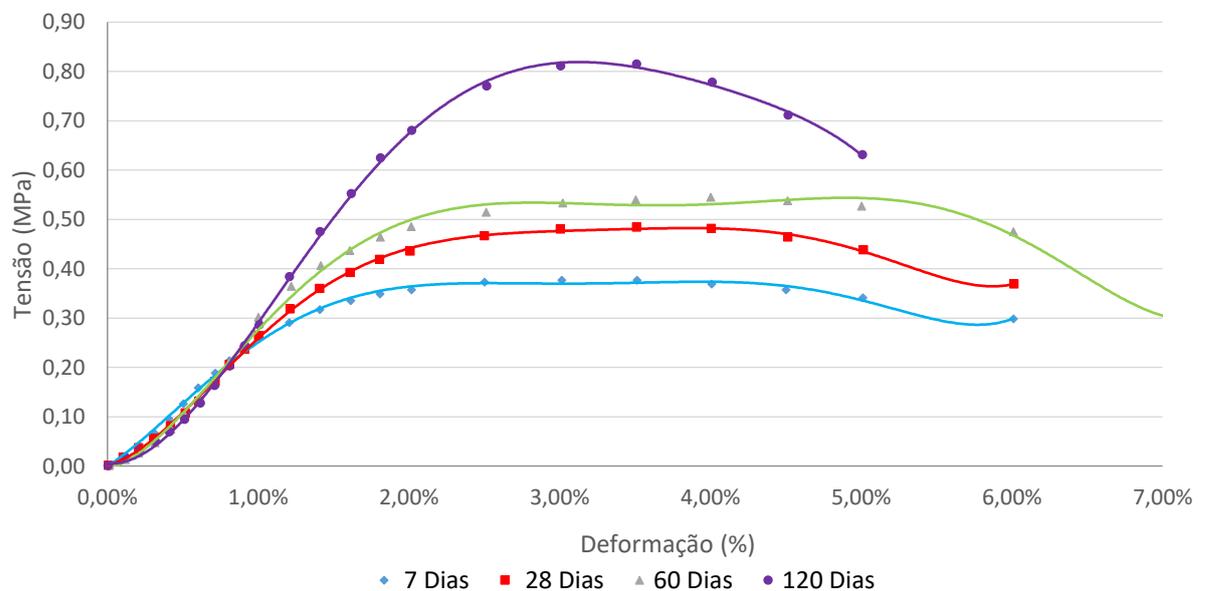
Figura 42 - Corpos de prova do solo puro antes e após o ensaio RCS em 28 dias



Fonte: O autor

A Figura 43 apresenta as curvas obtidas no ensaio de resistência à compressão simples realizado na mistura S90R10. Nota-se que houve um incremento de resistência de 118%, passando de 0,378 MPa aos 7 dias para 0,824 MPa ao 120 dias.

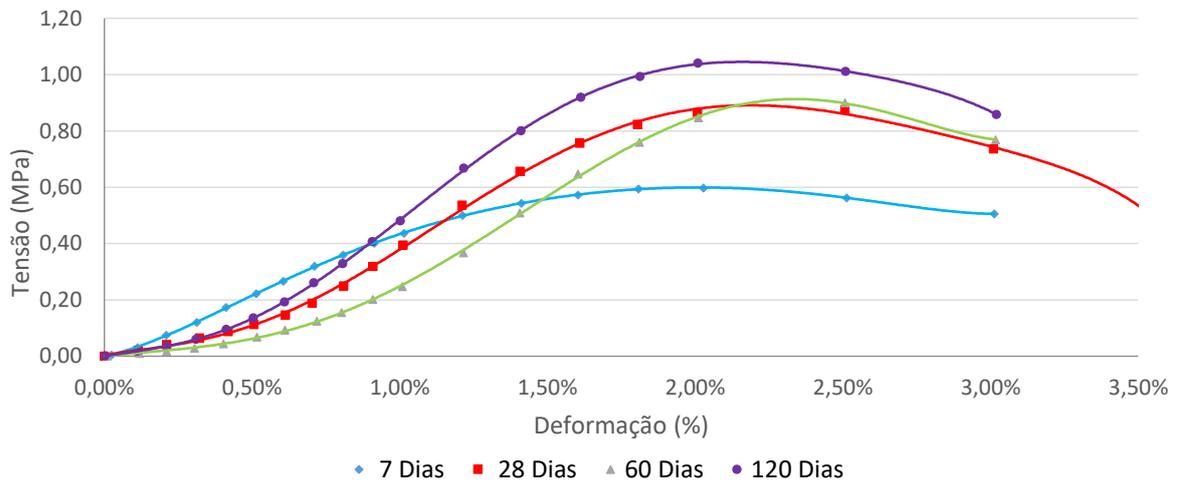
Figura 43 - Curvas Tensão x Deformação para o ensaio de RCS na mistura S90R10



Fonte: O autor

A mistura S70R30 apresentou um aumento na resistência 76% dos 7 dias aos 120 dias, passando de 0,62 MPa para 1,058 MPa (Figura 44). Nota-se ainda, que esta mistura foi a que apresentou a maior resistência.

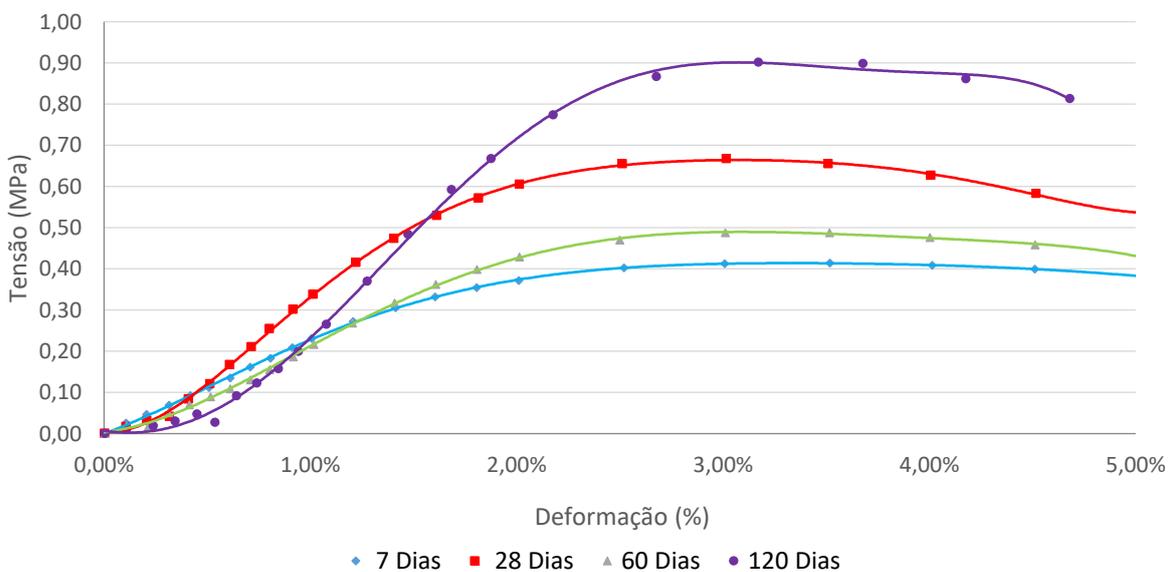
Figura 44 - Curvas Tensão x Deformação para o ensaio de RCS na mistura S70R30



Fonte: O autor

A Figura 45 apresenta as curvas obtidas no ensaio de resistência à compressão simples realizado na mistura S50R50. Nota-se que houve um incremento de resistência de 117%, passando de 0,417 MPa aos 7 dias para 0,908 MPa aos 120 dias.

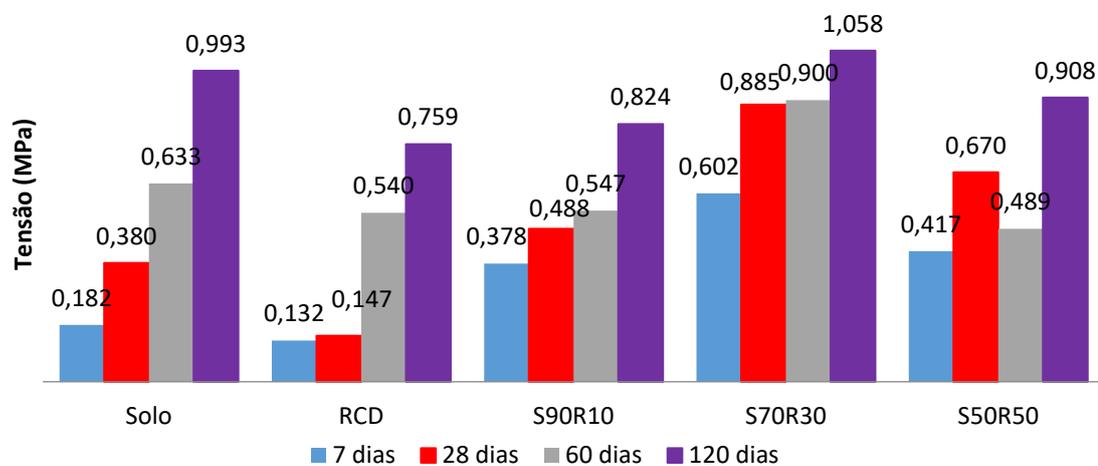
Figura 45 - Curvas Tensão x Deformação para o ensaio de RCS na mistura S50R50



Fonte: O autor

A Figura 46 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples em todos os materiais aos 7 dias, 28 dias, 60 dias e 120 dias. Nota-se que aos 7 dias e 28 dias as resistências foram bem maiores, quando comparado ao solo. Com o passar dos dias essa variação diminuiu, chegando a 6% na mistura S70R30, aos 120 dias, e um decréscimo de 17% e 9% nas misturas S90R10 e S50R50, aos 120 dias. Observa-se que o RCD contribuiu para o aumento da resistência inicial das misturas, tendo pouca influência aos 120 dias, sendo a mistura S70R30 a que apresentou os melhores resultados.

Figura 46 - Resistência máxima à compressão simples



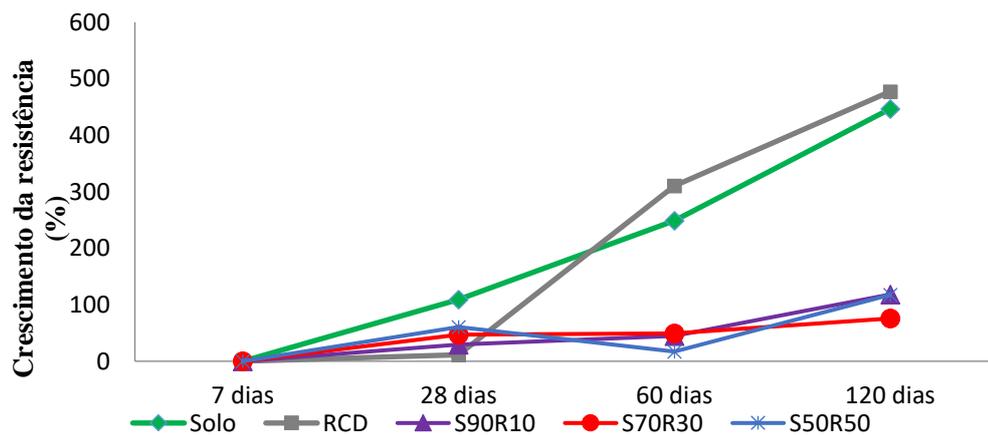
Fonte: O autor

Nota-se ainda, que o acréscimo de RCD provocou uma diminuição da resistência à compressão simples na mistura S50R50, se comparado com a mistura de S70R30. Isto pode ser explicado pela diminuição da coesão do material com o acréscimo de RCD, o que provocou uma menor capacidade de carga. Pascoal e Mesquita (2014), em suas misturas, obtiveram o mesmo resultado, ou seja, a mistura com 30% de RCD apresentou uma melhor resistência à compressão simples.

Entretanto, novas misturas com valores superiores a 50% de RCD são necessárias, a fim de verificar se a tendência de decréscimo na resistência permanece. É importante destacar que todos os corpos de provas foram confeccionados no mesmo dia e guardados na mesma câmara úmida, o que descarta erros provocados por diferenças na umidade e grau de compactação diferentes. Além disso, foi realizada uma análise estatística que confirmou a representatividade da média.

Na Figura 47, nota-se que, em geral, houve um ganho de resistência nas idades iniciais, sendo o RCD o material que mais apresentou esse comportamento. Foi verificado um crescimento de 28% aos 28 dias, passando para 310% aos 60 dias. Verifica-se ainda que a resistência do solo se comportou de maneira sempre crescente: 109%, 249% e 447% aos 28 dias, 60 dias e 120 dias, respectivamente.

Figura 47 - Crescimento percentual da RCS dos materiais com o passar dos dias



Fonte: O autor

Por outro lado as misturas apresentaram uma variação percentual menor se comparado ao solo e RCD. Verifica-se que a mistura S50R50 apresentou uma redução na resistência a compressão aos 60 dias. Isso pode ter ocorrido por esta mistura ser a que possui uma maior quantidade de RCD, sendo, portanto, a mais heterogênea. Entretanto, aos 120 dias a resistência aumentou, conforme observado nas demais misturas.

No que diz respeito ao uso em camadas de cobertura de aterros sanitários, a metodologia de Daniel e Wu (1993) estabelece um valor mínimo de 0,20 MPa, tornando possível o uso de todos os materiais, sendo que o solo só consegue chegar a essa condição aos 28 dias, enquanto que o RCD, aos 60 dias.

5.2.2.1 Análise estatística pelo critério de Chauvenet

A Tabela 18 apresenta os resultados dos valores de ΔR_0 para cada material, nas diferentes idades de rompimento do ensaio de resistência à compressão simples. Os resultados

individuais de RCS, médias e respectivos desvios padrão são apresentados, em detalhes, no Apêndice C.

Tabela 18 - Resultado do critério de Chauvenet nas amostras

Corpos de prova	Dias	ΔR_0				
		RCD	Solo	S90R10	S70R30	S50R50
CP1	7	1,01	0,70	1,12	0,85	1,15
	28	0,71	0,53	0,71	1,12	0,30
	60	1,08	1,14	0,71	0,07	1,11
	120	1,09	1,00	1,15	0,71	1,09
CP2	7	0,02	1,15	0,80	1,10	0,69
	28	0,71	1,15	0,71	0,79	0,82
	60	0,20	0,73	0,71	1,03	0,26
	120	0,23	0,01	0,45	0,43	0,22
CP3	7	0,99	0,45	0,32	0,26	0,46
	28	0,05	0,63	0,00	0,33	1,12
	60	0,89	0,41	0,00	0,96	0,84
	120	0,87	1,00	0,70	1,14	0,87

Fonte: O autor

De acordo com Neves e Silva (2016) para avaliar a representatividade da média obtida por três amostras, deve-se comparar com o valor de referência (ΔR) de 1,38. É possível observar na Tabela 18, que todos os ΔR_0 calculados apresentaram resultados inferiores a 1,38, ou seja, não há necessidade de descarte de nenhuma amostra. Os resultados das médias são representativos, o que mostra uma confiabilidade nos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.

5.3 Caracterização mineralógica

Na análise mineralógica dos grãos do RCD, através da lupa binocular, (Figura 48), observou-se a ocorrência de fragmentos de rocha, presença de caulim, biotita, muscovita, além de uma grande quantidade de grãos de quartzo, sendo alguns revertidos por argilominerais. Também foram identificados grãos de quartzo brilhantes e materiais laterizados impregnados de óxidos e hidróxidos de ferro. Em geral, os formatos dos grãos foram de angulosos a subangulosos.

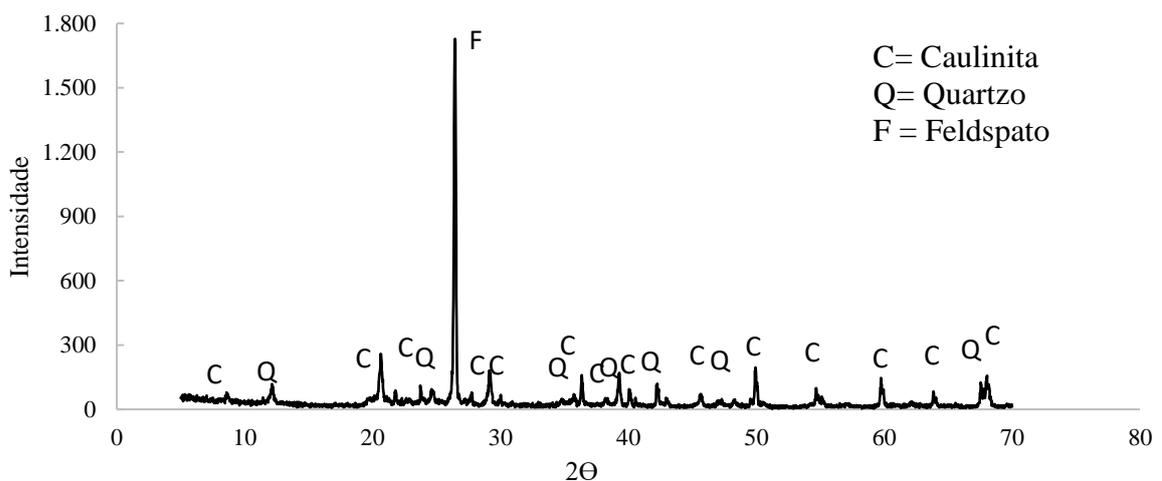
Figura 48 - Análise mineralógica do RCD com lupa binocular



Fonte: O autor

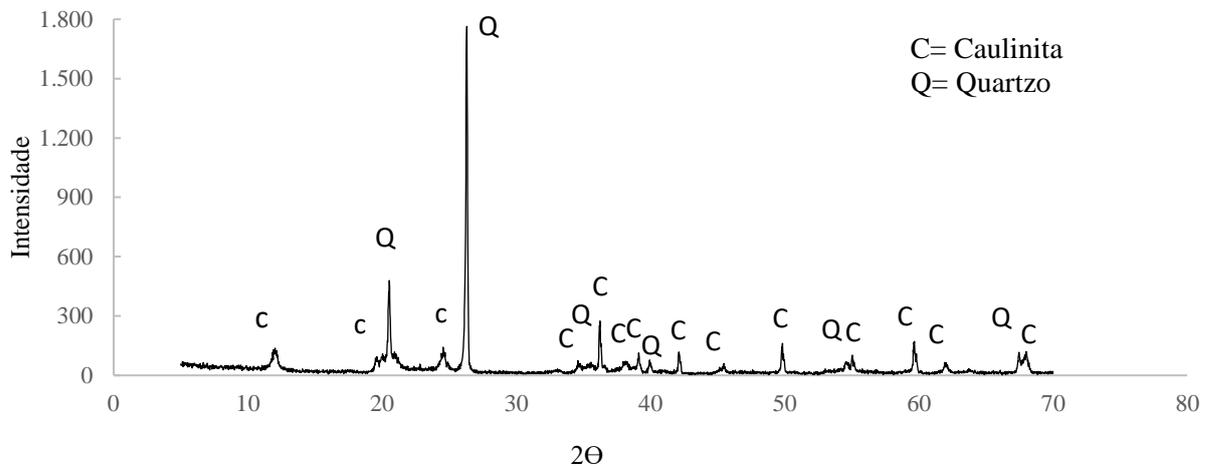
Já a análise mineralógica por difração de raios-X realizada no RCD, Figura 49, observou-se os picos de caulinita, quartzo e feldspato. A caulinita encontrada é o principal constituinte do mineral caulim, que foi encontrado através da lupa binocular, estando presente no RCD e indicando a presença de materiais cerâmicos, assim como o feldspato. Já o quartzo é proveniente de material arenoso que pode ser resultante das areias utilizadas no concreto e argamassa presentes no RCD.

Figura 49 - Difratograma de raios-X da fração do RCD



Fonte: O autor

A análise do solo indicou a presença de caulinita e quartzo, sendo o último de maior intensidade (Figura 50).

Figura 50 - Difratoograma de raios-X da fração do solo

Fonte: O autor

O ensaio de fluorescência de raios-X mostrou que no RCD a sílica (SiO_2) é o principal constituinte com 44,01%, seguido do alumínio (Al_2O_3) e do óxido de cálcio (CaO), com teores de 22,02% e 10,21%, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 19. O alto teor de sílica pode estar associado à presença de resíduos de agregados e de argamassa, e confirma a presença de areia, o que corrobora com o ensaio de granulometria e com o quartzo encontrado no ensaio de difração de raios-X. A indicação de cerâmicas vermelhas é mostrada pelos teores de alumina (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO).

Tabela 19 - Resultado dos principais componentes do ensaio de fluorescência de raios no RCD e solo

Elementos	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_{3t}	SO_3	K_2O	MgO	TiO_2	Na_2O	P_2O_5	P.F
RCD	44,01	22,02	10,21	4,28	2,04	1,57	1,02	0,85	0,31	0,31	13,08
Solo	63,18	20,40	0,01	7,96	n.d	n.d	0,05	1,27	0,06	n.d	7,07

Fonte: O autor

Além disso, os óxidos de sílica, alumínio, cálcio e de ferro são os constituintes fundamentais do cimento Portland, o que confirma a predominância do concreto neste resíduo. Nota-se ainda que foi encontrado 13,08% de material que apresentou perda ao fogo (P.F.).

Para o solo argiloso, o ensaio de fluorescência de raios-X mostrou a predominância do óxido de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_{3t}). Segundo Bizarreta e

Campos (2015) esses óxidos podem estar associados a presença predominante de caulinita, que é responsável pelo desenvolvimento de plasticidade e expansão da argila.

A perda ao fogo (P.F) do solo foi de 7,07% sendo inferior a do RCD. A massa perdida é resultado da quantidade de argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio presentes no solo, sendo esses produtos do intemperismo (SACARIN; BERNADES, 2016). Nota-se ainda, que não foram detectados óxidos de enxofre (SO_3), óxido de potássio (K_2O) e pentóxido de fósforo (P_2O_5).

5.4 Ensaio de erodibilidade

5.4.1 Ensaio de *crumb test*

De acordo com a Figura 51 não ocorreu o espalhamento do solo no fundo do béquer, continuando com seu formato inicial, e não foi observado sinal de turvação do líquido provocado por coloide em suspensão, sendo classificado de Grau 1, ou seja, comportamento não dispersivo. Este resultado é satisfatório para o uso em cobertura final de aterros sanitários, visto que é um indicador de erodibilidade do solo, característica a ser evitada em cobertura de aterros sanitários.

Figura 51 - Resultados do ensaio de *crumb test*



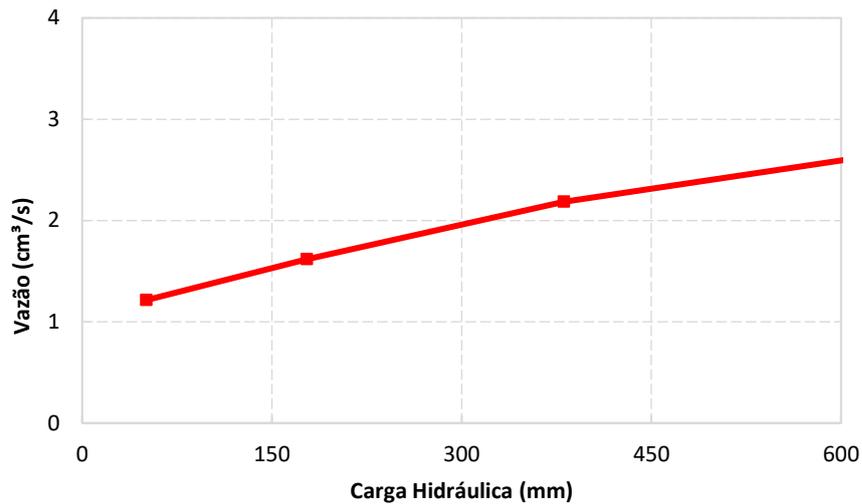
Fonte: O autor

5.4.2 Ensaio de *pinhole test*

A Figura 52 apresenta o resultado do ensaio de *pinhole test*. Observa-se que a carga hidráulica inicial de 25,4mm, atuante sobre a amostra de solo, gerou uma vazão média de 1,21ml/seg,

apresentando uma coloração clara sem indícios de presença de partículas carreadas, conforme mostrado na Figura 53. Estas características foram mantidas nas cargas 180 mm 380 mm e 1020 mm, tendo apresentado estas cargas como vazão média de: 1,62ml/s; 2,18ml/s e 3,37ml/s, respectivamente.

Figura 52 - Resultado do ensaio de *pinhole test* no solo



Fonte: O autor

Figura 53 - Água resultante do *Pinhole Test* sem partículas carreadas



Fonte: O autor

A Figura 54 apresenta a amostra antes e depois do ensaio. Verifica-se que há certa dificuldade em visualizar o furo após o ensaio, isso devido ao alto teor de finos (silte e argila) da amostra, que na hora da extração obstruíram o furo. Durante a desmontagem do material, percebe-

seque o furo permaneceu inalterado em todos os ensaios. A análise e interpretação dos resultados classificam o solo como sendo da classe ND1, ou seja, apresenta um comportamento não dispersivo.

Figura 54 - Furo antes (a) e depois (b) da realização do *pinhole test*



Fonte: O autor

5.4.3 Ensaio de expansibilidade

A Tabela 20 apresenta os resultados do solo levando em consideração a proposta de Santos e Castro (1965). Observa-se que se comparado aos critérios propostos, os materiais foram classificados com mau comportamento frente à erosão, sendo a pior situação referente ao solo. Este resultado é compatível com o que foi observado na encosta, que apresentava sinais de erosão.

Tabela 20 - Valores definidos por Santos e Castro (1965) para o solo

Material	ε (%)	Parâmetro "a"	% passante #40 (%)	Classificação
Solo	14,57	0,01	98,84	Mau comportamento frente à erosão
RCD	2,07%	0,01	47,78	Mau comportamento frente à erosão
S90R10	8,83%	0,01	91,92	Mau comportamento frente à erosão
S70R30	2,30%	0,01	80,93	Mau comportamento frente à erosão
S50R50	2,13%	0,08	74,26	Mau comportamento frente à erosão

Fonte: O autor

O acréscimo de RCD provocou uma redução na expansibilidade, passando de 14,57% no solo para 2,13% na mistura S50R50. Tendo em vista os problemas de estanqueidade que podem ser gerados em virtude da expansibilidade em camadas de cobertura, considera-se o RCD como um material relevante, visto que contribui significativamente para redução do potencial expansivo

5.5 Avaliação conforme os critérios adotados

A Tabela 21 apresenta um resumo de todos os ensaios realizados. Observa-se que a mistura S50R50 é a que apresenta os melhores resultados, podendo ser utilizados como camada de superfície, camada de proteção, camada de barreira hidráulica e camada de fundação.

Tabela 21 - Resultados das caracterizações física, mecânica e ensaios de erodibilidade.

Critérios Adotados				Possibilidade de uso em camadas de aterro sanitário				
				RCD	Solo	S90R10	S70R30	S50R50
Classificação do solo	CETESB (1993)		CL, CH, SC ou OH	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	USEPA (2004)		Solos ricos em argila	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Porcentagem de finos	CETESB (1993)		>30%	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	USEPA (2004)		30 - 50%	Não	Não	Não	Sim	Sim
Condutividade hidráulica	Camada de superfície	Sem critérios		Sim	Sim (atenção com o teor de finos)	Sim (atenção com o teor de finos)	Sim (atenção com o teor de finos)	Sim
	Camada de proteção	KOERNER e DANIEL (1997)	$1 \times 10^{-7} \text{m.s}^{-1}$	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	Camada de drenagem	KOERNER e DANIEL (1997)	$1 \times 10^{-4} \text{m.s}^{-1}$	Não	Não	Não	Não	Não
	Camada de barreira hidráulica	USEPA (2004)	$1 \times 10^{-9} \text{m.s}^{-1}$	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
		Norma Alemã (1993)	$5 \times 10^{-10} \text{m.s}^{-1}$	Não	Não	Sim	Não	Não
		ABNT (1997)	$1 \times 10^{-8} \text{m.s}^{-1}$	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	Camada de coleta de gás	KOERNER e DANIEL (1997)	Altamente permeável (casalhos e britas)	Não	Não	Não	Não	Não
Camada de Fundação	Sem critérios		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	
Limites de consistência	CETESB (1993)	$IP \geq 15\%$ e $LL \geq 30\%$	Não	Sim	Sim	Sim	Não	
	USEPA (2004)	$IP: 7 - 15\%$	Não	Não	Não	Não	Sim	
Resistência à Compressão Simples	Daniel e Wu (1993)	$> 0,20 \text{ MPa}$	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	
Ensaio de Erodibilidade	<i>Crumb test</i>			-	Sim	-	-	-
	<i>Pinhole test</i>			-	Sim	-	-	-
	Expansibilidade			Sim	Não	Sim	Sim	Sim

Fonte: O autor

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através de ensaios laboratoriais foi possível obter algumas conclusões acerca da viabilidade do uso do solo, resíduo de construção e demolição e misturas, para serem utilizados em sistema de camada de cobertura de aterros sanitários.

As curvas granulométricas permitiram definir a distribuição das partículas dos materiais e composições. O solo foi classificado, de acordo com o Sistema de Classificação de Solos, como uma argila de alta plasticidade (CH) e o RCD, como uma areia bem graduada (SW). A incorporação do agregado reciclado ao solo modificou a composição das partículas, passando de uma argila inorgânica de alta plasticidade, para uma argila arenosa de média plasticidade (CL).

Quanto à classificação do *Transportation Research Board* (TRB), o solo, o RCD e as misturas foram classificados como A-7-5, A-1-b e A-6, respectivamente. Com base nas especificações da USEPA (2004) e CETESB (1993), pode-se afirmar que as misturas contendo 30% e 50% de RCD em sua composição (S70R30 e S50R50) são consideradas as melhores para serem utilizadas em sistemas de coberturas de aterro sanitário.

Os valores de Limites de *Atterberg* para os agregados reciclados não apresentaram limites de liquidez e plasticidade, comportando-se como material não plástico. O solo, por sua vez, comportou-se como material altamente plástico. A incorporação do agregado reciclado ao solo fez com que a sua plasticidade diminuísse, chegando a um solo medianamente plástico com a adição de 50% de RCD, sendo esta mistura, a que se adequa às especificações da USEPA (2004) e CETESB (1993).

O coeficiente de condutividade hidráulica (k) para o solo, em virtude do acréscimo de RCD, foi de $1,05 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$, tornando-o viável para o uso como barreira hidráulica em um sistema de cobertura de aterros sanitários. A inserção de RCD ao solo provocou um aumento na condutividade hidráulica devido a este material apresentar, predominantemente, partículas arenosas, aumentando a permeabilidade da mistura.

As curvas de compactação mostraram que as umidades ótimas foram diminuindo à medida que foi incorporado ao solo o RCD, enquanto que para a densidade seca máxima ocorreu o inverso. Isto se deve ao fato, de o RCD possuir partículas maiores se comparado ao solo, o que faz a sua área específica ser menor necessitando, conseqüentemente, de menos água para atingir a sua umidade ótima.

No ensaio de compressão simples, notou-se que a incorporação do RCD ao solo provocou o aumento da resistência, sendo o melhor resultado atingido na mistura S70R30. Percebeu-se ainda que o solo, o RCD e as misturas apresentaram resistências compatíveis para o uso em sistema de cobertura de aterros.

Quanto à investigação do solo relativa à erodibilidade, os ensaios de *crumb test* e *pinhole test* apontaram o solo como material não erodível, sendo contrário ao observado em campo. Isto pode ser explicado, pela metodologia dos ensaios que são realizados em climas e tipos específicos de solos diferentes desta dissertação. No que se refere à expansibilidade, o acréscimo de RCD ao solo provocou uma diminuição, permitindo o seu uso em camada de cobertura de aterros sanitários, tendo seu melhor resultado na mistura S50R50.

Para este solo conclui-se que a mistura S50R50 é a ideal, para ser utilizada em sistema de camada de cobertura de aterros sanitários, podendo ser aproveitada como camada de superfície, camada de proteção, camada de barreira hidráulica e camada de fundação.

A mistura S50R50 provocou uma diminuição no teor de finos (silte e argila) e uma redução na plasticidade, o que contribui para uma boa compactação, sobretudo em camadas de aterros sanitários, além de diminuir as fissuras por retração, nos ciclos de secagem e umedecimento, que comprometem a condutividade hidráulica da camada de aterro sanitário.

A adição de 50% de RCD ao solo ainda possui vantagens do ponto de vista ambiental, pois de todas as misturas estudadas é a que utiliza o resíduo de construção e demolição em uma maior quantidade, dando assim, uma destinação mais adequada para este material. Além disso, diminui a quantidade de solo para confecção da camada de cobertura de aterros sanitários, reduzindo a sua extração em jazidas naturais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Analisar o comportamento de teores de agregados reciclados superiores a 50% quanto à condutividade hidráulica, com objetivo de identificar qual o teor máximo conforme as normas estabelecidas.
- Analisar o comportamento da mistura S50R50 quanto ao aparecimento de fissuras, provocadas pelos ciclos de secagem e umedecimento, e estudar a capacidade deste material na retenção de água e desenvolvimento de sistema radicular.
- Realizar ensaios de resistência à compressão simples com valores superiores a 50% de RCD
- Analisar a incorporação de outros materiais, como fibras, para serem utilizados em sistema de camada de cobertura, bem como analisar o uso com outros tipos de solos e RCD.

REFERÊNCIAS

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

ALBUQUERQUE, D.M. S. **Impacto Socioambiental da Deposição Irregular dos Resíduos da Construção e Demolição na Cidade do Recife-PE**. 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2015.

Altunku, D.; Kasapşekkin, M. A. Management and recycling of constructional solid waste in Turkey. In: International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, Procedia Engineering, 21., 2011 Bologna. **Annals...** Bologna, 2011 p. 1072-1077.

ALMEIDA, T. L. M. **Sedimentologia e batimetria da plataforma interna adjacente a Ilha de Itamaracá-PE**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Recife, 2011.

ALMEIDA, N. **Análise de Viabilidade Técnica para a Utilização de Resíduos de Construção e Demolição no Subleito e na Base de um Pavimento em Concreto Permeável**. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2017

ANDRADE, A. H. A.; JOCA, W. A. F.; BORGES, W. A. Gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD) implementação de uma usina no município de Cacoal. **Jornada Científica da Unesc**, Cacoal-SC, v. 1, n. 1, p.0-5, 19 maio 2017.

ARAUJO, L. B. **Estudo de emissões de gases em colunas de solo simulando camadas de cobertura oxidativa de aterro sanitário**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

ARAUJO, T. T.; RITTER, E. Avaliação de emissões de biogás em camadas de cobertura de um aterro sanitário. **Revista Perspectiva Online**. v. 6, n. 16 (2016)

ARAUJO, P.S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Campina Grande Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, 2017.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E Clima (APAC). Monitoramento Pluviométrico . disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (CPRH). **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 jul. 2018.

ASCHENBRENNER, A. C. **Conectividade entre áreas de berçário e plataforma continental: importância do mangue em estágios iniciais do ciclo de vida para *Lutjanus alexandrei* e *Lutjanus jocu* no litoral nordeste, Brasil.** 2014. 119 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016.** São Paulo: ABRELPE, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, 2016

_____. **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez, 2017.

_____. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180:** Solo - Determinação do limite de plasticidade, 2017.

_____. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica, 2017.

_____. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação, 2016.

_____. **NBR 8419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Rio de Janeiro 1992

_____. **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12770:** Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13601:** Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 13896:** Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação, 1997

_____. **NBR 14114:** Solo - Solos argilosos dispersivos - Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 15.849:** Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010

BARBOSA, K. R. M. **Degradação de Geogrelhas em Estradas não Pavimentadas Executadas com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2017.

BARTHEL, S. G. A. **Arqueologia de uma fortificação: o Forte Orange e a Fortaleza de Santa Cruz, em Itamaracá, Pernambuco**. 2007. 185 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arqueologia. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2010). **Conservação do solo**. 7ª ed. São Paulo. Editora Ícone. 355p.

BEZERRA, J. S. **Análise dos custos de resíduos da construção civil em canteiros de obras em cidades do nordeste do Brasil**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

BEZERRA, J. S. **Análise do processo erosivo de uma encosta no bairro de Bom Jesus - Ilha de Itamaracá/PE**. Qualificação (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

Brasil. Resolução CONAMA Nº1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº.1 23 de janeiro de 1986.

_____.1997. Resolução CONAMA Nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº.307. 17 de julho de 2002.

_____. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2010a.

_____. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2010b.

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

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.178-189, jun. 2015.

BUSELLI, A. A. P.T. **Proposta de Gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Viçosa, MG**. 2012. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 51-67, 2016.

CALLEGARO, R. F. **Uma arquitetura para fusão de dados de sensores de baixo custo em redes de sensores sem fio**. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CARDOSO, Afrodite da Conceição Fabiana. **Estimativa de geração de resíduos da construção civil nos municípios de Criciúma e Içara e estudo de viabilidade de usinas de triagem e reciclagem**. 2011. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759p.

CAMPOS, J. M. C.; RODRIGUES, A. R. Estudo da erodibilidade do solo de um processo erosivo no município de Bauru/SP. In: VII Congresso Brasileiro de Geógrafos, 2014. **Anais...** Vitória/ES, 2014. p. 243- 256

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 316 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. Utilização de Resíduos de Construção de Demolição Para Cobertura Intermediária de Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos em Aterros Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 2011, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2011. p. 1-8.

CONSTRUBUSINESS, **12º Congresso Brasileiro da Construção**. São Paulo: Fiesp, 2016. 144 p

COSTA, C. M. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. 163 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA, M. D. **Estudos de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas de Solos**. 2015. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, M.C.; LUCAS, M.C; LIMA, L.CN.; CARDOSO, D.S.L.; SILVA, G.C.; SOUZA, A.E.; SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro Sanitário - CETESB**. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/biogas/aterro-sanitario/>>. Acesso em: 13 jul. 2018

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2ª ed. São Paulo, SP, 1993

CÓDOBA, R. E. **Estudo do sistema de gerenciamento integrado de resíduos de construção e demolição do município de São Carlos-SP.** 406 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). . **Geologia e recursos minerais da folha Itamaracá sb.25-Y-C-VI.** 2017. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17760/1/relatorio_itamaraca.pdf >. Acesso em: 18 jul. 2018.

CORRÊA, A. D. **Estudo da erodibilidade de uma unidade geotécnica no campo de instrução de Santa Maria como Base para o seu planejamento ambiental.** 2015 f.116. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós - Graduação em Geografia, Santa Maria, 2015

COUTO, B. O. C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos.** 2015. f.125. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, Ouro Preto, 2015.

CRUVINEL, P.B. (2016). **Análise da gestão de resíduos da construção e demolição no Distrito Federal com proposição de indicadores de sustentabilidade ambiental.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 192/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p.

DANIEL, D. E.; WU, Y.-K. Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal Geotechnical Engineering, ASCE*, 119(2), 223-237, 1993.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 160/2002:** Solos - Determinação da expansibilidade -Método de ensaio. Brasília, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 41/1994:** Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Brasília, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNIT) **Manual de Pavimentação** Brasília, 2006.

DIAS, M. C. C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário.** 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Goiás Escola de Engenharia civil Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiás, 2014.

DING, Z.; ZHU, M.; TAM, V. W. Y.; TRAN, C. N. N. A system dynamics - based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages. **Journal of Cleaner Production.** V. 176, p.676-692, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de Solos.** 3. ed. São Paulo: Embrapa, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Solos do Nordeste**: Pernambuco. Recife: UEP, 2001. Disponível em: <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.php?link=pe>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FALCÃO, N. C. B. **Diagnóstico da situação atual dos resíduos da construção civil no município de Olinda**. 2011. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte: FEAM, 2006. 36p.

FREITAS, W.C. **Análise da geração de resíduos da construção civil no município de Batatais - SP para implantação de gerenciamento integrado**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2009.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. (2004). Erosão dos solos e a questão ambiental. In: Vitte, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Reflexões sobre a geografia física do Brasil**. São Paulo: Bertrand Brasil.

GUIA DO TURISMO DO BRASIL. **ILHA DE ITAMARACÁ - PE**. Disponível em: <<https://goo.gl/9QAUWX>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F.; SILVA, N. V.; MORAES, K. A. de M.; ANGULO, S. C. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31-46, abr. 2015.

GUSMÃO, A.D. **Manual de Gestão de Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, 2008. 140 p.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

IKAU, R; JOSEPH, C, TAWIE, R. (2016) Factors influencing waste generation in the construction industry in Malaysia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences** 234: 11-18. 2016

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Conheça Cidades e Estados do Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 23 jun. 2018

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). , 2015 **Download da Base Cartográfica 1:250.000 em Shapefile**. Disponível em: < <https://bit.ly/2AjCDbt/>>. Acesso em: 05 jan. 2019

KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. Capillary barriers: Design variables and water balance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.126, n.8, p.695-708, 2000.

KLEIN, F. B.; DIAS, S. L.F. G. A deposição irregular de resíduos da construção civil no município de São Paulo: um estudo a partir dos instrumentos de políticas públicas ambientais. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [s.l.], v. 40, p.483-506, 30 abr. 2017.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps**, 1 ed. New York, ASCE PRESS,1997.

JANUARIO, I. R.; MOURA, M. A. L.; SANTOS, M. F.; VASCONCELOS, F. L.; BARROS, R. F. Análise intrasazonal da radiação solar global (rg) e albedo em um ecossistema de mata atlântica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 4, 2017.

LEITE, L. B. T. **Panorama da Logística de Resíduos da Construção Civil** no Rio de Janeiro - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ / Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, 2014

LIMA, V. M. E.O. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de uma indústria de pré-fabricados de concreto**. 2017. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2017.

LOCASTRO, J. K; ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p.200-210, jan. 2016.

LU, H.; LIU, J.; LI, Y.; DONG, Y. Heat transport and water permeability during cracking of the landfill compacted clay cover. **Journal of Chemistry**, v. 2015, 2015.

LUKIANCHUKI, J.A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007 124 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2016.

MACEDO, T. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; BEZERRA, J. S.. Caracterização de compósitos com fibras de polipropileno para serem aplicados em camadas de pavimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 8., 2015. **Anais...** Brasília, 2015. p. 243- 256

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2013.

MAJDINASAB, A.; YUAN, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: **A review**. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 104, p.116-130, jul. 2017.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido**. 2008. 243 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2008

MELIANI, P. Fernando. Geomorfogênese do compartimento litorâneo do planalto cristalino da Bahia, Brasil: uma hipótese sobre a evolução do relevo costeiro do município de Itacaré. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.2, N.4, p.498 - 509, 2012

MENDOZA, F. J. C.; ALTABELLA, J. E.; IZQUIERDO, A. G. Application of inert wastes in the construction, operation and closure of landfills: Calculation tool. **Waste Management**, [s.l.], v. 59, p.276-285, jan. 2017.

MESQUITA, L. C.; AZEVEDO, I. C. A. D.; CÂNDIDO, E. S., CATHOUD, G. A. Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos de vedação. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.30-40, ago. 2015.

Ministério do Meio Ambiente - MMA. Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário. 2018. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

MORACI, M.;BUSANA, S.; CORTELLAZZO,G.; FAVARETTI, M. ;MANDAGLIO, M.C.; SCHEPIS, M. Design and construction of a compacted clay liner in cover system of a municipal solid waste (MSW) landfill using nonstandard procedures. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.], v. 55, n. 8, p.1182-1192, ago. 2018.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014, p. 176.

NETO, F. C. S. **Uso de Resíduos da Construção Civil para Melhoramento de Solos Colapsíveis**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2015

NETO, M. B. O.; SILVA, M. S. L. **Solos Indiscriminados de Mangues**. 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/kCecnB>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

NEVES, E. M. C.; SILVA, C. E. Ponte Aracaju destino Barra dos Coqueiros, Sergipe, Brasil: infraestrutura e/ou polo valorizante como fenômeno da valorização da terra. **Engineering Sciences**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.6-23, 27 nov. 2016

NORMA ALEMÃ - **TA Siedlungsabfall**: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz): BA nz. Nr. 99a vom 29.05.1993. 65 seiten.

OLIVEIRA, R. F.; BRAGA, R. M. Q. L. Sistema de cobertura final de um aterro sanitário para a RMB de Belém-PA com emprego de resíduos da construção civil. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 573-596, out./dez. 2017.

OLIVEIRA, C. E. M. **Levantamento e classificação de resíduos de construção e demolição em Ilha Solteira-SP**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2014

OSSA, A.; GARCÍA, J. L.; BOTELHO, E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 135, n. 1, p.379-386, jun. 2016.

PARANÁ. Plano de Resíduos Sólidos do Estado do Paraná. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Plano Estadual - 2017**. Curitiba., 2017.

PARK, J; TUCKER, R. Overcoming barriers to the reuse of construction waste material in Australia: a review of the literature. **International Journal Of Construction Management**, [s.l.], v. 17, n. 3, p.228-237, 8 jun. 2016.

PASCOAL, P. P. R.; MESQUITA, R. R. S. **Estudo de viabilidade do uso do RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários**. 2014. 86 f. Monografia (Graduação). Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2014

PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; SOBRAL, M. C. GIS - based planning system for managing the flow of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 36, p. 541-549, 2018.

PIMENTEL, Ubiratan Henrique Oliveira. **Análise da geração de resíduos da construção civil da cidade de João Pessoa/PB**. 2013. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

PINTO, G. J. F.; MELO, E. S. R. L.; NOTARO, K. A. Geração de resíduos sólidos da construção civil - métodos de cálculo. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental., 2016, Campina Grande-PB. **Anais...** Campina Grande-PB, 2016. p. 1-5.

PIVETTA, C. P. **Utilização do resíduo de construção e demolição em solo compactado**. 2017. 157 f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, 2017.

PRATT, C. WALCROFT, A. TATE, K. ROSS, D. ROY, R. REID, M.H. VEIGA, P. W. In vitro methane removal by volcanic pumice soil biofilter columns over one year. **Journal of Environmental Quality**. [s.l.], v 41, p.80-87, jan. 2012

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAMARACÁ (Itamaracá-pe). **História do município**. Disponível em: <<http://ilhadeitamaraca.pe.gov.br/historia-do-municipio/>>. Acesso em: 19 jul. 2018

RIOS, D.C. **Aplicação de dois modelos de balanço hídrico para estudo de camada de cobertura de aterro sanitário utilizando solo e resíduo da construção civil (RCC)**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Bahia, 2016.

RIOS, M. B. C. **Estudo de Aspectos e Impactos Ambientais nas Obras de Construção do Bairro Ilha Pura - Vila dos Atletas 2016**. 2014. 102 f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2014.

RODRIGUES, C. B. **Blocos de Concreto Produzidos com Agregados Reciclados Mistos: Avaliação das Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, D. S. **Diagnóstico da gestão dos resíduos de construção e demolição e seus impactos ambientais no município de Jaboatão dos Guararapes/PE**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, M.P.; CASTRO, E. Soil erosion in roads. In: International Conference on Soil Mechanics and Engineering Foundation, 6., 1965, Montreal. **Anais...**, Montreal: ISSMFE, 1965. v.1, p.116-120.

SCARIN, P. B. R.; BERNARDES, G. P. Utilização do Índice de Perda ao Fogo para Caracterização de Perfil de Intemperismo de Solo Residual e de Horizontes de Deposição do Terciário de Taubaté, SP. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte . **Anais...** Belo Horizonte, 2016. p. 1-6.

SCHNEIDER, A. M.; RADMANN, M.; SILVA, T. P.; OLIVEIRA, T. D. Geração de resíduos sólidos da construção civil. **Revint**, [s.l.], vol. 3 n 1, p.13-24, 2015

SCHEUTZ, C. PEDERSEN, R. B. PETERSEN, P. H. JORGENSEN, J. H. B. UCENDO, I. M. B. MONSTER, J. G. SAMUELSSON, J. KJELDSSEN, P. JERRE JORGENSEN, Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. **Waste Management**. [s.l.], vol. 34 n 1, p. 1179-1190, 2014

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

SILVA, A. A. **Diagnóstico da gestão dos resíduos de construção e demolição no município do Cabo de Santo Agostinho/PE**. 2017. 200 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVA, L.M. **Gestão de resíduos da construção civil: Dificuldades para implementação do R integrado de gestão de resíduos no município de São Leopoldo**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, C. F. A.; FERREIRA, B.; BARRETO, E. P.; GREGÓRIO, M. N.; MANSO, V. A. V.; CANDEIAS, A. L. B.; MELO, W. D. A. Índices de vulnerabilidade à erosão das praias da

Ilha de Itamaracá, litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Investigaciones Geográficas**, n. 52, p. 71-82, 2016.

SOS MATA ATLÂNTICA (Brasil). **Município Ilha de Itamaracá - PE**. Disponível em: <http://mapas.sosma.org.br/dados/solicitacao_mapas/>. Acesso em: 23 jul. 2018.

SOARES, M. **Informações Técnicas: Critério de Chauvenet**. 2013. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/tecdiv/med200.shtml> > Acesso em: 20 dez. 2018.

SUN, J.; YUEN, S. T. S.; FOURIE, A. B. The effect of using a geotextile in a monolithic (evapotranspiration) alternative landfill cover on the resulting water balance. **WasteManagement**. Journal Homepage.v. 30, p. 2074-2083, 2010.

TEIXEIRA, P. F. **Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos**. 2008. 168 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

Universidade Estadual Paulista- UNESP. **Formas de disposição de resíduos: Aterro Sanitário. Aterro Sanitário**. 2017. Disponível em <<https://goo.gl/FrjN5f>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

USEPA (2004). **Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems**. Washington, DC: EPA. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1001O83.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2017.

UDAWATTA, N.; ZUO, J.; CHIVERALLS, K.; ZILLANTE, G., Improving waste management in construction projects: An Australian study. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 101, p.73-83, ago. 2015.

VARELA, G. J. A. C. **Influência dos recifes na evolução da linha de costa na Ilha de Itamaracá-PE**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como Cobertura final de aterro de resíduos**. 2005. 287 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

XAVIER, J. P. S.; SANTANA, J. K. R.; LISTO, F. L. R. Análise de processos erosivos como subsídio para aptidão agrícola: aplicação no município de Aliança, Zona Da Mata Pernambucana. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, [s.l.], p.5749-5755, 2017.

ZHANG, W.; SUN, C. Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humidregion. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. Journal Homepage.v.6, p. 356-365, 2014.

ZORNBERG, J. G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.129, n.6, p.427-438, 2003.

ApêndiceA - Grau de compactação para controle tecnológico do ensaio de compressão simples

Amostra	Corpos de Prova						Cápsulas						Caracterização dos CP calculados			Caracterização dos CP esperados		GC		Aceita ou não aceita o CP?
	Nº	Peso (g)	Diâmetro médio (cm)	Área superior do CP (cm ²)	Altura média (cm)	Volume médio (cm ³)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Umidade (média) (%)	Massa seca (cm ³)	γ sec,max (g/cm ³)	Umidade (%)	γ sec,max (g/cm ³)	γ sec,max	Umidade	
RCD	001	414,34	5,00	19,61	10,18	199,68	61,52	57,7	22,62	49,2	45,9	22,7	12,69	367,68	1,84	12,69	1,892	97%	0,00	ACEITA
	002	414,12	4,99	19,56	10,17	198,88								367,48	1,85			98%		ACEITA
	003	415,04	4,99	19,58	10,16	198,95								368,30	1,85			98%		ACEITA
	004	414,34	4,99	19,56	10,07	196,93								367,68	1,87			99%		ACEITA
	005	414,84	4,99	19,56	10,15	198,43								368,12	1,86			98%		ACEITA
	006	413,77	4,98	19,45	10,13	197,11								367,17	1,86			98%		ACEITA
	007	414,84	5,01	19,71	10,20	201,01								368,12	1,83			97%		ACEITA
	008	413,73	4,98	19,50	10,10	197,05								367,14	1,86			98%		ACEITA
	009	413,94	4,99	19,56	10,18	199,14								367,32	1,84			97%		ACEITA
	010	415,56	5,01	19,69	10,16	200,08								368,76	1,84			97%		ACEITA
	011	414,51	5,01	19,69	10,16	200,08								367,83	1,84			97%		ACEITA
	012	414,87	4,99	19,56	10,18	199,14								368,15	1,85			98%		ACEITA
	013	414,13	5,02	19,77	10,13	200,29								367,49	1,83			97%		ACEITA
	014	414,41	4,99	19,58	10,23	200,26								367,74	1,84			97%		ACEITA

Amostra	Corpos de Prova						Cápsulas						Caracterização dos CP calculados			Caracterização dos CP esperados		GC		Aceita ou não aceita o CP?
	Nº	Peso (g)	Diâmetro médio (cm)	Área superior do CP (cm ²)	Altura média (cm)	Volume médio (cm ³)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Umidade (média) (%)	Massa seca (cm ³)	γ sec,max (g/cm ³)	Umidade (%)	γ sec,max (g/cm ³)	γ sec,max	Umidade	
SOLO	001	375,65	4,96	19,30	10,05	193,86	75,46	63,7	22,62	87,9	73,6	22,7	28,37	292,64	1,51	28,19	1,531	99%	0,18	ACEITA
	002	380,79	5,00	19,63	10,30	202,17								296,64	1,47			96%		ACEITA
	003	376,38	4,98	19,48	10,18	198,22								293,21	1,48			97%		ACEITA
	004	377,87	4,99	19,58	10,14	198,63								294,37	1,48			97%		ACEITA
	005	378,12	5,00	19,61	10,09	197,85								294,56	1,49			97%		ACEITA
	006	380,08	4,96	19,32	10,19	196,95								296,09	1,50			98%		ACEITA
	007	389,72	4,99	19,56	10,32	201,82								303,60	1,50			98%		ACEITA
	008	379,34	4,93	19,09	10,22	195,15								295,51	1,51			99%		ACEITA
	009	379,56	5,00	19,61	10,23	200,59								295,68	1,47			96%		ACEITA
	010	380,86	4,95	19,24	10,21	196,41								296,70	1,51			99%		ACEITA
	011	379,80	4,98	19,48	10,26	199,84								295,87	1,48			97%		ACEITA
	012	381,47	5,03	19,84	10,09	200,30								297,17	1,48			97%		ACEITA
	013	381,07	4,97	19,43	10,18	197,75								296,86	1,50			98%		ACEITA
	014	382,32	4,97	19,43	10,15	197,10								297,83	1,51			99%		ACEITA
	015	381,02	4,96	19,35	10,23	197,86								296,82	1,50			98%		ACEITA

Amostra	Corpos de Prova						Cápsulas						Caracterização dos CP calculados			Caracterização dos CP esperados		GC		Aceita ou não aceita o CP?
	Nº	Peso (g)	Diâmetro médio (cm)	Área superior do CP (cm ²)	Altura média (cm)	Volume médio (cm ³)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Umidade (média) (%)	Massa seca (cm ³)	γ sec,max (g/cm ³)	Umidade (%)	γ sec,max (g/cm ³)	γ sec,max	Umidade	
S90R10	001	393,65	4,97	19,37	10,01	193,99	85,99	74,9	22,57				21,26	306,66	1,58	21,47	1,612	98%	0,21	ACEITA
	002	393,76	4,96	19,30	10,02	193,41								306,75	1,59			98%		ACEITA
	003	393,92	5,02	19,79	9,88	195,61								306,87	1,57			97%		ACEITA
	004	393,33	5,01	19,71	9,89	194,90								306,41	1,57			98%		ACEITA
	005	393,56	5,00	19,63	10,04	197,06								306,59	1,56			97%		ACEITA
	006	393,54	5,00	19,61	10,00	196,15								306,57	1,56			97%		ACEITA
	007	383,73	5,01	19,71	9,93	195,82								298,93	1,53			95%		ACEITA
	008	393,56	4,98	19,50	9,96	194,32								306,59	1,58			98%		ACEITA
	009	381,57	5,02	19,77	9,98	197,19								297,25	1,51			94%		ACEITA
	010	393,65	5,00	19,61	9,80	192,16								306,66	1,60			99%		ACEITA
	011	394,67	4,99	19,56	9,98	195,17								307,45	1,58			98%		ACEITA
	012	382,48	5,01	19,71	10,02	197,46								297,96	1,51			94%		ACEITA
	013	397,08	5,00	19,63	10,06	197,52								309,33	1,57			97%		ACEITA
	014	397,03	4,99	19,53	10,05	196,34								309,29	1,58			98%		ACEITA
	015	392,19	4,99	19,56	10,01	195,75								305,52	1,56			97%		ACEITA

Amostra	Corpos de Prova						Cápsulas						Caracterização dos CP calculados			Caracterização dos CP esperados		GC		Aceita ou não aceita o CP?
	Nº	Peso (g)	Diâmetro médio (cm)	Área superior do CP (cm ²)	Altura média (cm)	Volume médio (cm ³)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Umidade (média) (%)	Massa seca (cm ³)	γ sec,max (g/cm ³)	Umidade (%)	γ sec,max (g/cm ³)	γ sec,max	Umidade	
S70R30	001	384,04	5,01	19,71	10,00	197,06	89,59	78,9	15	109	95,8	22,2	17,18	327,74	1,66	16,95	1,677	99%	0,23	ACEITA
	002	384,28	5,00	19,61	9,94	194,84								327,94	1,68			100%		ACEITA
	003	383,76	5,02	19,82	9,97	197,59								327,50	1,66			99%		ACEITA
	004	383,85	4,99	19,53	9,99	195,10								327,58	1,68			100%		ACEITA
	005	383,89	5,00	19,66	9,95	195,56								327,61	1,68			100%		ACEITA
	006	382,93	5,00	19,63	10,06	197,46								326,79	1,65			99%		ACEITA
	007	384,36	5,00	19,66	10,01	196,74								328,01	1,67			99%		ACEITA
	008	382,62	5,00	19,63	10,01	196,61								326,53	1,66			99%		ACEITA
	009	383,39	5,00	19,63	9,98	195,95								327,18	1,67			100%		ACEITA
	010	384,19	5,02	19,77	9,94	196,40								327,87	1,67			100%		ACEITA
	011	382,82	5,00	19,63	9,99	196,15								326,70	1,67			99%		ACEITA
	012	383,14	4,98	19,50	9,98	194,71								326,97	1,68			100%		ACEITA
	013	383,79	5,02	19,79	9,93	196,47								327,52	1,67			99%		ACEITA
	014	382,33	4,99	19,53	10,15	198,23								326,28	1,65			98%		ACEITA

Amostra	Corpos de Prova						Cápsulas					Caracterização dos CP calculados			Caracterização dos CP esperados		GC		Aceita ou não aceita o CP?	
	Nº	Peso (g)	Diâmetro médio (cm)	Área superior do CP (cm ²)	Altura média (cm)	Volume médio (cm ³)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Umidade (média) (%)	Massa seca (cm ³)	γ sec,max (g/cm ³)	Umidade (%)	γ sec,max (g/cm ³)	γ sec,max		Umidade
S50R50	001	390,89	5,00	19,66	9,94	195,49	99,01	88,2	22,57	137	121	22,1	16,24	346,87	1,77	16,02	1,732	102%	0,22	ACEITA
	002	390,8	5,01	19,69	9,83	193,52								346,79	1,79			103%		ACEITA
	003	384,12	5,01	19,74	9,68	191,08								340,86	1,78			103%		ACEITA
	004	392,97	5,00	19,63	9,99	196,21								348,72	1,78			103%		ACEITA
	005	393,43	5,02	19,82	9,95	197,26								349,12	1,77			102%		ACEITA
	006	389,91	5,00	19,63	9,87	193,86								346,00	1,78			103%		ACEITA
	007	384,47	5,00	19,63	9,83	193,07								341,17	1,77			102%		ACEITA
	008	380,97	4,99	19,56	9,84	192,37								338,07	1,76			101%		ACEITA
	009	383,19	5,02	19,77	9,83	194,29								340,04	1,75			101%		ACEITA
	010	392,98	4,99	19,56	9,99	195,36								348,72	1,79			103%		ACEITA
	011	382,89	4,99	19,56	9,82	192,04								339,77	1,77			102%		ACEITA
	012	382,85	5,01	19,74	9,81	193,58								339,74	1,76			101%		ACEITA
	013	394,02	5,00	19,66	9,99	196,34								349,65	1,78			103%		ACEITA
	014	382,92	5,00	19,63	9,88	194,05								339,80	1,75			101%		ACEITA

Apêndice B- Grau de compactação para controle tecnológico do ensaio de condutividade hidráulica

Amostras	Corpos de provas					Cápsulas						Caracterização dos CP calculados			Caracterização dos CP esperados		GC	Aceita ou não aceita o CP?
	Peso (g)	Diâmetro médio (cm)	Área superior do CP (cm ²)	Altura média (cm)	Volume médio (cm ³)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da cápsula (g)	Umidade (média) (%)	Massa seca (cm ³)	γ sec,max (g/cm ³)	Umidade (%)	γ sec,max (g/cm ³)	γ sec,max	
RCD	2031,00	9,96	77,86	12,69	987,76	105,42	96,73	21,49	72,89	67,11	23,80	12,45	1806,17	1,83	12,69	1,892	97%	ACEITA
RCD	2057,00	9,93	77,44	12,78	989,71	105,42	96,73	21,49	70,89	66,29	23,76	11,18	1850,11	1,87	12,69	1,892	99%	ACEITA
RCD	2068,35	9,97	77,99	12,76	995,40	42,53	40,17	21,58	33,06	30,97	16,00	13,33	1825,10	1,83	12,69	1,892	97%	ACEITA
SOLO	1968,98	10,02	78,85	12,62	995,11	102,22	86,64	22,21	115,78	96,14	25,04	25,90	1563,90	1,57	28,19	1,531	103%	ACEITA
SOLO	1998,18	10,00	78,46	12,67	994,34	102,22	86,64	22,21	115,78	94,14	25,04	27,75	1564,14	1,57	28,19	1,531	103%	ACEITA
SOLO	1996,58	10,02	78,85	12,67	998,79	108,22	86,64	22,21	115,78	98,14	25,04	28,81	1549,99	1,55	28,19	1,531	101%	ACEITA
S90R10	1918,00	9,96	77,86	12,65	984,65	66,83	57,69	14,49	70,36	60,38	14,92	21,56	1577,88	1,60	21,47	1,612	99%	ACEITA
S90R10	1897,00	9,96	77,96	12,69	989,61	66,83	57,69	14,49	70,36	60,38	14,92	21,56	1560,61	1,58	21,47	1,612	98%	ACEITA
S90R10	1964,00	9,97	78,01	12,65	987,15	66,83	57,69	14,49	70,36	60,38	14,92	21,56	1615,72	1,64	21,47	1,612	102%	ACEITA
S70R30	1951,01	9,97	78,12	12,67	990,03	48,56	42,56	14,45	48,56	42,56	14,45	21,34	1607,82	1,62	16,95	1,677	97%	ACEITA
S70R30	1989,40	10,00	78,49	12,71	997,28	48,56	42,56	14,45	48,56	42,56	14,45	21,34	1639,46	1,64	16,95	1,677	98%	ACEITA
S70R30	1976,63	9,96	77,86	12,68	987,24	48,56	42,56	14,45	48,56	42,56	14,45	21,34	1628,94	1,65	16,95	1,677	98%	ACEITA
S50R50	1999,00	9,96	77,86	12,76	993,47	79,02	70,02	23,95	93,52	82,60	22,21	18,81	1682,53	1,69	16,02	1,732	98%	ACEITA
S50R50	1945,00	9,93	77,49	12,70	984,43	78,02	70,02	23,95	93,52	82,60	22,21	17,72	1652,17	1,68	16,02	1,732	97%	ACEITA
S50R50	1961,00	9,97	78,12	12,64	987,69	75,02	70,02	23,95	93,52	82,60	22,21	14,47	1713,15	1,73	16,02	1,732	100%	ACEITA

Apêndice C- Cálculos do critério de Chauvenet

Tempo de cura (dias)	Amostra	Tensão de ruptura (MPa)	\bar{x} (MPa)	Desvio padrão (σ)	$d_1 = (x_1 - \bar{x})$	DR₀	Situação
7	RCD	0,162	0,132	0,03	0,030	1,008	Aceito
	RCD	0,131			-0,001	0,017	Aceito
	RCD	0,102			-0,030	0,991	Aceito
28	RCD	0,162	0,147	0,02	0,015	0,707	Aceito
	RCD	0,147			0,000	0,005	Aceito
	RCD	0,132			-0,015	0,707	Aceito
60	RCD	0,593	0,540	0,05	0,054	1,084	Aceito
	RCD	0,530			-0,010	0,198	Aceito
	RCD	0,496			-0,044	0,887	Aceito
120	RCD	0,769	0,759	0,01	0,010	1,095	Aceito
	RCD	0,757			-0,002	0,230	Aceito
	RCD	0,752			-0,008	0,865	Aceito
7	Solo	0,148	0,182	0,05	-0,034	0,697	Aceito
	Solo	0,237			0,055	1,146	Aceito
	Solo	0,160			-0,022	0,448	Aceito
28	Solo	0,359	0,380	0,04	-0,021	0,526	Aceito
	Solo	0,426			0,046	1,153	Aceito
	Solo	0,354			-0,025	0,627	Aceito
60	Solo	0,735	0,633	0,09	0,102	1,139	Aceito
	Solo	0,568			-0,066	0,733	Aceito
	Solo	0,597			-0,036	0,406	Aceito
120	Solo	1,073	0,993	0,08	0,080	1,004	Aceito
	Solo	0,993			-0,001	0,008	Aceito
	Solo	0,914			-0,079	0,996	Aceito

Tempo de cura (dias)	Amostra	Tensão de ruptura (MPa)	\bar{x} (MPa)	Desvio padrão (σ)	$d_1 = (x_1 - \bar{x})$	DR ₀	Situação
7	S90R10	0,3463	0,378	0,03	-0,031	1,121	Aceito
	S90R10	0,3998			0,022	0,799	Aceito
	S90R10	0,3865			0,009	0,323	Aceito
28	S90R10	0,5028	0,488	0,02	0,014	0,707	Aceito
	S90R10	0,488			0,000	0,020	Aceito
	S90R10	0,4741			-0,014	0,707	Aceito
60	S90R10	0,5507	0,547	0,00	0,003	0,707	Aceito
	S90R10	0,547			0,000	0,053	Aceito
	S90R10	0,5438			-0,003	0,707	Aceito
120	S90R10	0,8263	0,824	0,00	0,003	1,145	Aceito
	S90R10	0,8228			-0,001	0,446	Aceito
	S90R10	0,8222			-0,002	0,699	Aceito
7	S70R30	0,6128	0,602	0,01	0,011	0,847	Aceito
	S70R30	0,5878			-0,014	1,103	Aceito
	S70R30	0,6052			0,003	0,256	Aceito
28	S70R30	0,9881	0,885	0,09	0,103	1,124	Aceito
	S70R30	0,8132			-0,072	0,791	Aceito
	S70R30	0,8550			-0,030	0,333	Aceito
60	S70R30	0,9019	0,900	0,03	0,002	0,071	Aceito
	S70R30	0,8725			-0,028	1,034	Aceito
	S70R30	0,9256			0,026	0,963	Aceito
120	S70R30	1,0910	1,058	0,05	0,033	0,711	Aceito
	S70R30	1,0780			0,020	0,432	Aceito
	S70R30	1,0046			-0,053	1,143	Aceito
7	S50R50	0,4919	0,417	0,06	0,074	1,147	Aceito
	S50R50	0,3726			-0,045	0,689	Aceito
	S50R50	0,3877			-0,030	0,457	Aceito
28	S50R50	0,7118	0,670	0,14	0,042	0,299	Aceito
	S50R50	0,7847			0,115	0,817	Aceito
	S50R50	0,5127			-0,157	1,115	Aceito
60	S50R50	0,4213	0,489	0,06	-0,068	1,105	Aceito
	S50R50	0,5052			0,016	0,262	Aceito
	S50R50	0,5408			0,052	0,843	Aceito
120	S50R50	0,8807	0,908	0,02	-0,027	1,093	Aceito
	S50R50	0,9134			0,006	0,223	Aceito
	S50R50	0,9294			0,022	0,869	Aceito