

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Victor de Freitas Barletta**

**Estudos Mecânicos de Misturas Solo-Composto para Fins Geotécnicos**

Juiz de Fora  
2021

**Victor de Freitas Barletta**

**Estudos Mecânicos de Misturas Solo-Composto para Fins Geotécnicos**

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Mario Vicente Riccio Filho

Coorientadora: Prof. Dra. Júlia Righi de Almeida

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração  
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barletta, Victor de Freitas.

Estudos Mecânicos de Misturas Solo-Composto para Fins  
Geotécnicos / Victor de Freitas Barletta. -- 2021.  
99 f.

Orientador: Mario Vicente Riccio Filho  
Coorientadora: Júlia Righi de Almeida  
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz  
de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, 2021.

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Cobertura de Aterros. 3.  
Solo-RSU Compostado. I. Riccio Filho, Mario Vicente, orient. II.  
Almeida, Júlia Righi de, coorient. III. Título.

**Victor de Freitas Barletta**

**Estudos Mecânicos de Misturas Solo-Composto para Fins Geotécnicos**

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

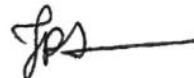
Aprovada em 22 de outubro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



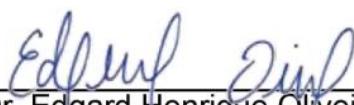
---

Prof. Dr. Mario Vicente Riccio Filho - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Dra. Julia Righi de Almeida - Coorientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora



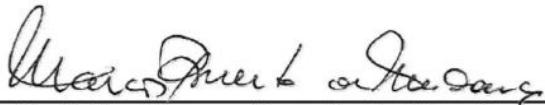
---

Prof. Dr. Edgard Henrique Oliveira Dias  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Dra. Cátia de Paula Martins  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Dr. Marcos Barreto de Mendonça  
Membro externo, Universidade Federal do Rio de Janeiro

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela proteção e por ter me dado forças para lutar pelos meus objetivos durante essa caminhada.

A minha avó Nice que, apesar de não se encontrar mais presente nos meus dias, estará sempre presente em minha memória.

Aos meus pais, Rita e William, pelo apoio incondicional e incentivo constante que me deram para que eu pudesse estudar e ampliar meus conhecimentos.

Ao meu irmão Igor, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, pela motivação e força em todos as ocasiões em que precisei. Sua presença foi fundamental para tornar possível concluir mais essa etapa.

Ao meu orientador, professor Mario Riccio, e a minha coorientadora, professora Júlia Righi, pela oportunidade de trabalharmos juntos, empenho e amizade durante a realização da pesquisa, além de serem as grandes referências que tornaram esse estudo possível.

Às professoras Tatiana e Cátia e aos técnicos Lázaro e Sebastião por todo o auxílio, amizade e paciência durante o aprendizado de todos os processos que foram necessários para a conclusão dessa pesquisa.

Aos amigos de trabalho, Cleiton, Eder e Marcos, que estiveram ao meu lado todos os dias na AVEC Engenharia e Arquitetura apoiando e incentivando em todo esse processo, pelos momentos de descontração.

Aos companheiros de turma do PEC e aos amigos do laboratório de Mecânica dos Solos pelas experiências divididas ao longo desses anos. Aos amigos que, mesmo distantes, torceram e torcem para o meu sucesso.

## RESUMO

As questões que envolvem a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) evidenciam uma problemática mundialmente reconhecida. Em uma análise do cenário brasileiro, percebe-se que a maior parte dos RSU produzidos correspondem a fração matéria orgânica, o que revela um potencial favorável ao processo de compostagem. Assim, a produção do RSU compostado poderia possibilitar a redução dos impactos ambientais gerados pela produção de RSU nas atividades rotineiras do ser humano. Como possível destinação do RSU compostado produzido, este trabalho analisou a viabilidade de se obter uma mistura deste material com solo, em percentuais variados, para ser utilizado como camada de cobertura de aterro sanitário. A proporção adequada a ser utilizada para a mistura solo-RSU compostado foi indicada após comparação dos parâmetros analisados com aqueles especificados em prescrições normativas para a finalidade ao qual o material resultante se destina. Os resultados obtidos possibilitaram avaliar, também, um potencial de aplicação do RSU compostado em misturas para outras áreas da geotecnica. Questões como aumento da vida útil dos aterros, diminuição de gastos envolvendo o tratamento de gases e chorume provenientes da matéria orgânica, bem como de menor necessidade de exploração de áreas de empréstimo para utilização como solo compactado podem servir de estímulo ao aumento do processo de compostagem a partir da verificação da possibilidade de aplicação do resíduo obtido. As misturas realizadas com teores de 2,5%, 5,0% e 7,5% de RSU compostado em relação ao peso de solo puro apresentaram potencial de utilização para aplicação em aterros compactados e como camada de cobertura em aterros sanitários, enquanto as misturas com 12,5% e 17,5% não tiverem aplicação recomendada.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, Cobertura de aterros, Solo-RSU compostado.

## ABSTRACT

Issues involving the generation of urban solid waste (USW) show a problem that is globally recognized. In an analysis of the Brazilian scenario, it can be observed that most of the USW produced correspond to the organic matter fraction, which reveals a favorable potential for the composting process. Therefore, the production of composted USW could make it possible to reduce the environmental impacts generated by the production of USW in the routine activities of human beings. As a possible destination of the composted USW produced, this work analyzed the feasibility of obtaining a mixture of this material with soil, in varying percentages, to be used as a landfill cover layer. The appropriate proportion to be used for the composted soil-USW mixture was indicated after comparing the analyzed parameters with those specified in normative prescriptions for the purpose which the resulting material is intended. The results obtained also made it possible to evaluate a potential application of composted USW in mixtures for other geotechnical areas. Issues such as increasing the useful life of landfills, reducing costs involving the treatment of gases and leachate from organic matter, as well as the lesser need to explore loan areas for use as compacted soil can serve as a stimulus to increase the composting process from the verification of the possibility of applying the residue obtained. The mixtures made with contents of 2.5%, 5.0% and 7.5% of composted MSW in relation to the weight of pure soil presented potential use for application in compacted landfills and as a covering layer in landfills, while the mixtures with 12.5% and 17.5% have no recommended application.

Keywords: Urban solid waste, Landfill cover, Composted soil-USW.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um sistema para utilização em camada de cobertura.....	18
Figura 2: Sistemas de cobertura – liner simples e composto. ....	20
Figura 3: Camada de cobertura monolítica. ....	21
Figura 4: Barreiras capilares simples e dupla.....	22
Figura 5: Estrutura de uma camada oxidativa. ....	23
Figura 6: Sistema TMethar – Usina do Caju (Rio de Janeiro – RJ).....	29
Figura 7: Fração orgânica dos resíduos sólidos antes (esquerda) e após (direita) o processo de metanização no TMethar. ....	30
Figura 8: Funcionamento do TMethar. ....	31
Figura 9: Unidade de produção de inóculo (UPI). ....	32
Figura 10: Leiras de Compostagem. ....	33
Figura 11: Equipamento utilizado para Trituração de resíduo de poda. ....	33
Figura 12: Coleta (a) e armazenamento (b) do solo, realizado nas dependências da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).....	37
Figura 13: Limite de Liquidez – Aparelho de Casagrande (solo): antes (a) e após (b) a execução do ensaio. ....	38
Figura 14: Solo – determinação do limite de plasticidade (a) e pastilhas obtidas na determinação do limite de contração (b e c).....	38
Figura 15: RSU compostado coletado na Usina do Caju. ....	40
Figura 16: RSU compostado após passagem na peneira nº10 (2.0 mm): fração retida (a) e fração passante (b). ....	41
Figura 17: RSU compostado retido na peneira nº 200 após secagem em estufa. ....	42
Figura 18: Limite de Liquidez – Aparelho de Casagrande (RSU compostado). ....	43
Figura 19: Obstrução na tampa do picnômetro. ....	44
Figura 20: Processo de saturação (a) e retirada de ar (b).....	44
Figura 21: Ensaio de limite de plasticidade – RSU compostado. ....	59
Figura 22: Pastilha utilizada para determinação do limite de contração – após secagem em estufa (a) e recobrimento em parafina (b).....	59

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gravimetria dos RSU no Brasil .....	2
Gráfico 2: Destinação final de RSU - percentual por cada tipo. ....	10
Gráfico 3: Curva granulométrica para o solo puro.....	53
Gráfico 4: Curva de compactação (SP_COMP) e curva de saturação – solo puro. ....	54
Gráfico 5: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SP_ISC) – solo puro.....	55
Gráfico 6: Ensaio de Expansão – solo puro. ....	55
Gráfico 7: Ensaio de Permeabilidade (SP_PE) – solo puro. ....	56
Gráfico 8: Curva granulométrica para o RSU compostado puro. ....	58
Gráfico 9: Curva de compactação (SR_COMP_2,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 2,5%. ....	61
Gráfico 10: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR_ISC_2,5%) – mistura solo-RSU compostado 2,5%. ....	62
Gráfico 11: Ensaio de expansão (SR_EXP_2,5%) – mistura solo-RSU compostado 2,5%. ....	62
Gráfico 12: Ensaio de Permeabilidade (SR_PE_2,5%) – mistura solo-RSU compostado 2,5%.....	63
Gráfico 13: Curva de compactação (SR_COMP_5,0%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 5,0%.....	65
Gráfico 14: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR_ISC_5,0%) – mistura solo-RSU compostado 5,0%. ....	66
Gráfico 15: Ensaio de expansão (SR_EXP_5,0%) – mistura solo-RSU compostado 5,0%. ....	66
Gráfico 16: Ensaio de Permeabilidade (SR_PE_5,0%) – mistura solo-RSU compostado 5,0%.....	67
Gráfico 17: Curva de compactação (SR_COMP_7,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 7,5%.....	69
Gráfico 18: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR_ISC_7,5%) – mistura solo-RSU compostado 7,5%. ....	70
Gráfico 19: Ensaio de expansão (SR_EXP_7,5%) – mistura solo-RSU compostado 7,5%. ....	70
Gráfico 20: Ensaio de Permeabilidade (SR_PE_7,5%) – mistura solo-RSU compostado 7,5%.....	71

Gráfico 21: Curva de compactação (SR_COMP_12,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 12,5%.....	73
Gráfico 22: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR_ISC_12,5%) – mistura solo-RSU compostado 12,5%.....	73
Gráfico 23: Ensaio de expansão (SR_EXP_12,5%) – mistura solo-RSU compostado 12,5%.....	74
Gráfico 24: Ensaio de Permeabilidade (SR_PE_12,5%) – mistura solo-RSU compostado 12,5%.....	75
Gráfico 25: Curva de compactação (SR_COMP_17,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 17,5%.....	77
Gráfico 26: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR_ISC_17,5%) – mistura solo-RSU compostado 17,5%.....	77
Gráfico 27: Ensaio de expansão (SR_EXP_17,5%) – mistura solo-RSU compostado 17,5%.....	78
Gráfico 28: Ensaio de Permeabilidade (SR_PE_17,5%) – mistura solo-RSU compostado 17,5%.....	79
Gráfico 29: Curvas granulométricas estimadas – solo puro e misturas solo-RSU compostado.....	81
Gráfico 30: Limite de liquidez das misturas solo-RSU compostado – método de Casagrande e Falling Cone Test (FCT) .....	82
Gráfico 31: Limite de plasticidade das misturas solo-RSU compostado.....	82
Gráfico 32: Índice de plasticidade das misturas solo-RSU compostado.....	83
Gráfico 33: Limite de contração das misturas solo-RSU compostado.....	84
Gráfico 34: Resultados dos ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.....	85
Gráfico 35: Valores ótimos – ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.....	86
Gráfico 36: Comparativo entre massa específica dos sólidos e massa específica aparente seca máxima para o solo puro e as misturas solo-RSU compostado. ....	87
Gráfico 37: Teores de umidade ótimos – ensaios de ISC para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.....	88
Gráfico 38: Teores de umidade ótimos – ensaios de expansão para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.....	89

Gráfico 39: Ensaios de Permeabilidade para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado .....	90
---	----

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Relações entre população e quantidade de RSU coletada por região.....	9
Tabela 2: Quantidade de municípios por tipo de disposição final.....	10
Tabela 3: Valores destinados a coleta de RSU e aos demais serviços de limpeza. .	11
Tabela 4: Avaliação dos critérios de utilização.....	35
Tabela 5: Programa de ensaios. Material: solo puro. ....	50
Tabela 6: Programa de ensaios. Material: RSU compostado puro.....	51
Tabela 7: Programa de ensaios. Material: solo-RSU compostado, teores de composto de 2,5%, 5,0%, 7,5%, 12,5% e 17,5%. .....	52
Tabela 8: Resultados dos ensaios – solo puro.....	57
Tabela 9: Resultados dos ensaios – RSU compostado. ....	60
Tabela 10: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 2,5%.....	64
Tabela 11: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 5,0%.....	68
Tabela 12: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 7,5%.....	72
Tabela 13: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 12,5%.....	76
Tabela 14: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 17,5%.....	80

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Motivação para o Desenvolvimento do Estudo .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.2.1	Objetivo Geral.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos .....	4
1.3	Organização do trabalho .....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos .....	6
2.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) .....	6
2.1.2	Classificação dos RSU .....	7
2.1.3	Panorama observado em 2020.....	8
2.1.4	Disposição final de RSU .....	12
2.2	Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários.....	17
2.2.1	Definição e Importância .....	17
2.2.2	Tipos de Camada de Cobertura.....	19
2.2.3	Utilização de Solo como Camada de Cobertura .....	23
2.2.4	Composto Orgânico.....	25
2.3	Processo de Produção do RSU Compostado .....	29
2.4	Critérios para Utilização dos Materiais .....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
3.1	Estudo do Solo .....	36
3.2	Caracterizações física e mecânica do solo .....	37
3.3	Estudo do RSU Compostado .....	39
3.4	Caracterização do RSU compostado .....	40
3.5	Estudo da mistura solo-RSU compostado.....	45
3.6	Programa experimental de ensaios.....	49
4	RESULTADOS E ANÁLISES .....	53
4.1	Ensaios com o Solo Puro .....	53
4.2	Ensaios com o RSU Compostado Puro .....	57
4.3	Mistura Solo-RSU Compostado – 2,5% .....	60
4.4	Mistura Solo-RSU Compostado – 5,0% .....	64
4.5	Mistura Solo-RSU Compostado – 7,5% .....	68
4.6	Mistura Solo-RSU Compostado – 12,5% .....	72
4.7	Mistura Solo-RSU Compostado – 17,5% .....	76

4.8 Análise dos Resultados.....	80
5 CONCLUSÕES .....	91
REFERÊNCIAS.....	95

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) envolve uma problemática de importância mundialmente reconhecida. Sete bilhões de pessoas produzem anualmente 1,4 bilhão de toneladas de RSU. Projeções deste estudo revelam que, daqui a dez anos, serão 2,2 bilhões de toneladas anuais; na metade deste século, se o ritmo atual for mantido, serão 9 bilhões de habitantes e 4 bilhões de toneladas de lixo urbano por ano (ONU, 2015).

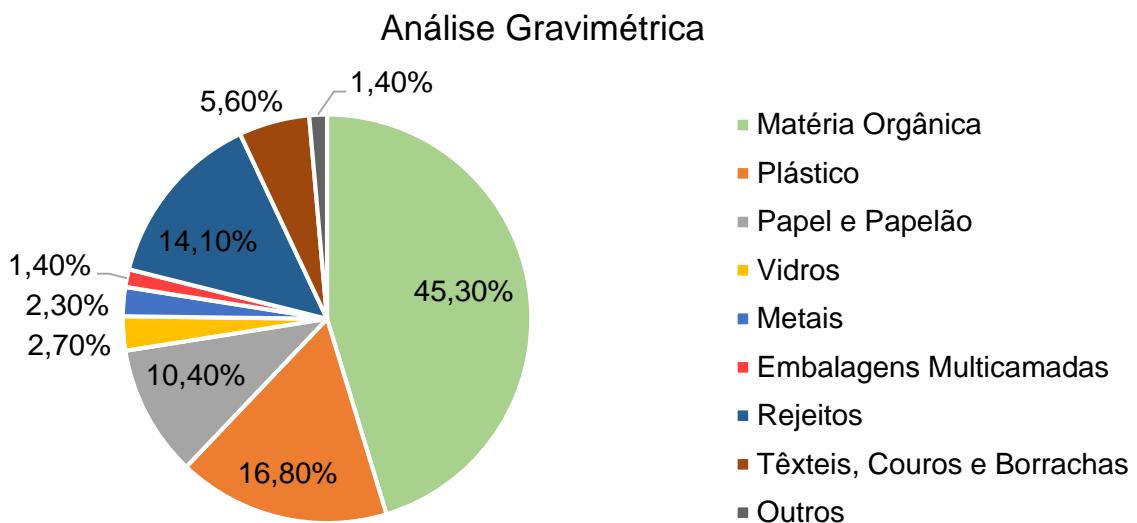
No Brasil, cerca de 79 milhões de toneladas de RSU foram gerados em 2017. Do total, 72,7 milhões de toneladas passaram pelo processo de coleta (92%) e 6,3 milhões de toneladas não foram coletados, tendo como consequência uma destinação inadequada. No que se refere aos RSU coletados, cerca de 43,3 milhões de toneladas de RSU (59,5%) foram dispostos em aterros sanitários por 2569 municípios. Os 40,5% restantes dos resíduos coletados foram despejados em locais inadequados por 3001 municípios, sendo 29,5 milhões de toneladas de resíduos destinados a lixões ou aterros controlados. Estes sistemas de disposição final não possuem o conjunto de medidas necessárias para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, trazendo impactos à saúde de milhões de pessoas (ABRELPE, 2019).

Um processo de análise gravimétrica do RSU brasileiro revela em sua composição predominância da fração matéria orgânica, em quantidade correspondente a 58% em relação ao total. Este cenário faz com que o país tenha condições favoráveis ao estímulo do processo de compostagem quando se considera a coleta seletiva visando a destinação final correta dos resíduos produzidos. A compostagem pode ser definida como uma decomposição aeróbia controlada de substratos orgânicos em condições que permitem atingir temperaturas suficientemente elevadas para o crescimento de microorganismos termofílicos. O resultado desse processo é o composto orgânico, um produto relativamente estabilizado (MAHLER *et al.*, 2012; MAHLER, 2002 *apud* RIGHI, 2011).

Em análise realizada pela Abrelpe (2020) estima-se que uma pessoa descarte 170 kg de matéria orgânica por ano, sendo essa fração dos RSU responsável por 45,3% do

total produzido. O Gráfico 1 apresenta a composição obtida com categorização realizada de acordo com os tipos de resíduos descartados pela população. É possível perceber que a fração matéria orgânica segue como a mais expressiva em relação ao total, o que justifica sua relevância em relação a determinação de alternativas viáveis para a destinação desse resíduo. Os materiais definidos como rejeito foram aqueles não passíveis de identificação, bem como recicláveis contaminados que não permitiram a separação. Destaca-se, por fim, a importância do conhecimento da composição dos RSU gerados, servindo de parâmetro para orientar as políticas públicas e garantir os processos adequados a destinação final de cada tipo de resíduo.

Gráfico 1: Gravimetria dos RSU no Brasil



Fonte: modificado de Abrelpe (2019).

No trabalho realizado por Rose (2009) são citados como benefícios do processo de compostagem: diminuição de massa e volume do resíduo, reciclagem de nutrientes, manutenção ou renovação da matéria orgânica e outras características físicas do solo, redução dos problemas de aterragem dos resíduos e biodegradação de componentes tóxicos e contaminantes orgânicos.

Sendo a disposição do RSU em aterros sanitários o procedimento considerado correto, o processo de compostagem tende a impactar positivamente na vida útil do aterro. Além do menor volume de material depositado, a redução da quantidade de matéria orgânica implicaria em menor geração de gases do efeito estufa e ainda,

diminuição da quantidade de lixiviado produzido, efluentes do processo de decomposição altamente poluentes e que têm um alto custo de tratamento (RIGHI, 2017).

O potencial favorável a produção do composto orgânico no cenário brasileiro faz com que seja necessário expandir as possibilidades de sua utilização, o que poderia implicar também em um incentivo a sua produção. Neste contexto, pretendeu-se investigar a viabilidade da realização de uma mistura entre solo e RSU compostado em variados percentuais para ser utilizada como camada de cobertura de um aterro sanitário. Além das vantagens ambientais, os resultados das análises tornaram possível avaliar o potencial para sua utilização em outras áreas da geotecnia, desde que obtidos parâmetros técnicos adequados para a finalidade desejada.

Buscou-se indicar os valores adequados para a quantidade de RSU compostado a ser utilizado na mistura, permitindo potencializar a utilização deste material. A possibilidade de redução da utilização de áreas de empréstimo de material para ser utilizado em obras geotécnicas envolvendo solo compactado e o consequente aumento da vida útil dos aterros sanitários, além da diminuição dos custos de tratamento de gases e chorume provenientes da matéria orgânica, poderiam servir como um estímulo para aumentar os incentivos ao processo de produção deste material. Abre-se uma possibilidade de ganho financeiro por parte de investidores interessados neste campo e, como aspecto mais determinante, há a possibilidade da redução dos impactos ambientais que acompanham todo o processo que envolve a produção de resíduos por conta das atividades rotineiras do ser humano.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

A análise realizada neste trabalho apresentou como foco a viabilidade de utilização do RSU-compostado em mistura com solo puro sob o ponto de vista de atendimento a critérios mecânicos existentes, em especial para aplicação como camada de cobertura de aterros sanitários.

## 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a viabilidade técnica da utilização das misturas solo-RSU compostado, considerando diferentes teores de RSU compostado, e comparar os resultados de ensaios com os parâmetros observados em norma para a finalidade com a qual a utilização desse material se destina.
- Verificar a possibilidade do uso das misturas não só como cobertura de aterro sanitário, mas também como base e sub-base de pavimentação e também corpo de aterro compactado.
- Analisar a variação do comportamento da mistura com o aumento do teor de RSU compostado de forma a verificar limites de teores para cada aplicação.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. O primeiro compõe a introdução e uma breve apresentação do trabalho, além dos objetivos do mesmo.

No capítulo 2 deste trabalho é apresentada a revisão bibliográfica contendo uma abordagem sobre a origem do RSU compostado. Nele é apresentado o funcionamento da planta situada na Usina do Caju (Rio de Janeiro – RJ) e mostrado o processo de obtenção do material final estabilizado. Há a apresentação dos critérios definidos, segundo as normas vigentes, para a utilização dos materiais que são aplicados visando as destinações para as quais é desejada a observação do comportamento quando considerada a inserção do RSU compostado.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados para a elaboração deste trabalho, bem como a metodologia adotada para o desenvolvimento das atividades e determinação dos parâmetros de interesse.

No capítulo 4 serão exibidos os resultados obtidos para a pesquisa alvo deste trabalho.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas através dos estudos realizados, bem como sugestões para pesquisas futuras.

Ao final são apresentadas as referências utilizadas para embasar a discussão feita.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho visa o aproveitamento de RSU compostado em obras geotécnicas, com foco em cobertura de aterros sanitário. Com o objetivo de contextualizar os principais elementos considerados para a definição do tema proposto, a seguir serão apresentadas: questões relativas ao cenário que envolve os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, definições acerca das camadas de cobertura utilizadas em aterros sanitários, descrição do processo de produção do RSU compostado e exibição dos critérios de utilização de materiais segundo as destinações pretendidas.

### 2.1 ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

#### 2.1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, dispõe sobre os instrumentos de importante consideração em relação ao manejo dos resíduos sólidos. Há o objetivo de reduzir impactos socioeconômicos e ambientais através de suas diretrizes, e para isso propõe a prática de hábitos de consumo sustentáveis aliadas ao aumento da reciclagem, reutilização e destinação correta dos resíduos como forma de atingir as metas estabelecidas. Importante destacar que a referida lei coloca em patamar de igualdade aqueles que produzem os insumos e aqueles que consomem os insumos em relação a responsabilidade sobre o manejo dos resíduos gerados, sendo destacado o papel de ambos no processo de logística reversa (BRASIL, 2020).

Os resíduos sólidos são definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu título I, capítulo II e artigo 3º, como sendo:

XVI – resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 10004:2004, apresenta em seu capítulo 3º a definição de resíduos sólidos da maneira que se segue:

3.1 resíduos sólidos: Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

## 2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RSU

A classificação dos materiais descartados se torna necessária pois, dentro do contexto definido pela importância do manejo adequado dos resíduos, estes materiais precisarão ter destinação adequada de acordo com as características particulares que possuírem. Essas características envolvem a identificação de seus constituintes, bem como do processo que originou determinado produto. Dentre as maneiras de se agrupar os resíduos sólidos é possível citar, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos em seu título III, capítulo I e artigo 13º (2010):

- Quanto a origem: domiciliares, de limpeza urbana, sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, de serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviços de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transporte e de mineração;
- Quanto a periculosidade: perigosos e não perigosos.

Seguindo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu título III, capítulo I e artigo 13º, os resíduos sólidos considerados urbanos são aqueles que provém de domicílios e também de limpeza urbana. Os resíduos domiciliares são aqueles com origem nas atividades domésticas de áreas urbanas, enquanto os resíduos de limpeza urbana são aqueles originados em serviços de varrição, limpeza de vias públicas e serviços afins.

Considerando a classificação quanto a periculosidade, os resíduos sólidos definidos na classe I como perigosos são aqueles que apresentam risco potencial à saúde pública e ao próprio meio ambiente quando a gestão dos mesmos for realizada de forma incorreta. Características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, e patogenicidade deverão ser analisadas segundo normas específicas e apresentar resultados conformes de acordo com os critérios das próprias normas específicas (NBR 10004 da ABNT, 2004)

Já aqueles resíduos enquadrados na classe II como não perigosos possuem subclassificação para seu entendimento, sendo sua divisão em (NBR 10004 da ABNT, 2004):

- Resíduos Classe II – A (não inertes): são os que não se enquadram como o definido nas classes I ou II B, podendo ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A exemplo, resíduos com características do lixo doméstico;
- Resíduos Classe II – B (inertes): são os que, quando analisada uma amostra representativa e submetidos a teste de solubilização, não apresentarem seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água (exceto aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor). Como exemplo, é possível citar resíduos de construção e demolição, vidros e alguns tipos de plásticos e borrachas.

### 2.1.3 PANORAMA OBSERVADO EM 2020

Segundo dados obtidos pela Abrelpe (2020) o panorama encontrado revelou que em 2019, no Brasil, foram gerados 79 milhões de toneladas de RSU. Do total gerado 92% foi coletado, o que ainda indica 6,3 milhões de toneladas sem serem recolhidas junto ao local de produção. A Tabela 1 apresenta os dados a respeito da quantidade de RSU coletado em cada região do Brasil, bem como relaciona essa quantidade com a população de cada região.

Tabela 1: Relações entre população e quantidade de RSU coletada por região.

Regiões	Dados de 2018			
	População	RSU Total (toneladas/dia)	%População/ total	% RSU/total
<b>Norte</b>	18.182.253	13.069	8,72%	6,56%
<b>Nordeste</b>	56.760.780	43.763	27,22%	21,96%
<b>Centro-Oeste</b>	16.085.885	14.941	7,72%	7,50%
<b>Sudeste</b>	87.711.946	105.977	42,07%	53,17%
<b>Sul</b>	29.754.036	21.561	14,27%	10,82%
<b>Brasil</b>	208.494.900	199.311	100,00%	100,00%

Fonte: modificado de Abrelpe (2019).

Dentre o montante coletado, 59,5% (43,3 milhões de toneladas) foram destinados adequadamente aos aterros sanitários. O cenário indica que 40,5% (29,5 milhões de toneladas) tiveram como destinação os lixões ou aterros controlados, locais inadequados para essa finalidade. Os lixões foram responsáveis por 17,5% da disposição em local inadequado, enquanto os aterros controlados foram responsáveis por 23%, valores que totalizam os 40,5% indicados. A distribuição dos municípios com algum tipo de coleta seletiva indicou que a iniciativa existe em 73,1% do total, porém esse valor não significa que o serviço esteja disponível na totalidade da área de um município analisado. O Gráfico 2 apresenta a relação entre os tipos de destinação final utilizados e o percentual de RSU destinado a cada um, enquanto a Tabela 2 apresenta a quantidade de municípios que possuem cada uma das alternativas de destinação por região do Brasil.

Gráfico 2: Destinação final de RSU - percentual por cada tipo.

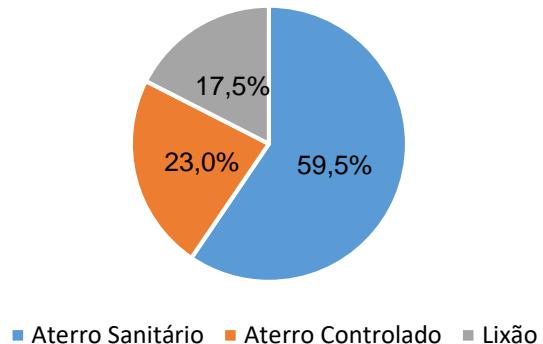


Tabela 2: Quantidade de municípios por tipo de disposição final.

Disposição Final	Regiões e Brasil - 2018					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
<b>Aterro Sanitário</b>	93	454	162	820	1.040	2.569
<b>Aterro Controlado</b>	110	496	152	641	109	1.508
<b>Lixão</b>	247	844	153	207	42	1.493
<b>Total</b>	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

Fonte: Abrelpe (2019).

Considerando-se os recursos empregados nos serviços de limpeza urbana, em média os municípios brasileiros investiram cerca de R\$10,15/habitante/mês. Os serviços necessários foram capazes de gerar 332 mil vagas de emprego diretas, fazendo com que o mercado envolvido com a limpeza urbana fosse capaz de movimentar um montante de R\$25 bilhões (ABRELPE, 2020). A Tabela 3 apresenta, por região, os valores investidos para os serviços de coleta de RSU e também para as demais atividades envolvidas com o processo (destinação final de resíduos, serviços de varrição, capina, manutenção de parques e afins).

Tabela 3: Valores destinados a coleta de RSU e aos demais serviços de limpeza.

Regiões	Coleta de RSU		Demais serviços	
	Total (R\$ milhões/ano)	Por habitante (R\$/mês)	Total (R\$ milhões/ano)	Por habitante (R\$/mês)
<b>Norte</b>	707	3,24	1.073	4,92
<b>Nordeste</b>	2.139	3,14	3.664	5,38
<b>Centro-Oeste</b>	604	3,13	635	3,29
<b>Sudeste</b>	5.263	5,00	8.452	8,03
<b>Sul</b>	1.318	3,69	1.546	4,33
<b>Brasil</b>	10.031	4,01	15.370	6,14

Fonte: modificado de Abrelpe (2019).

Considerando o panorama observado na última década, período coincidente com a instituição das diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - agosto/2010), percebeu-se um aumento de 19% na geração de RSU no Brasil e um aumento per capita de 9%. A destinação inadequada desses resíduos também apresentou crescimento em um total de 30%. Os índices de reciclagem encontram-se estagnados apesar das iniciativas e campanhas promovidas visando o desenvolvimento do setor. Esses resultados podem ser atribuídos a falta de estruturação de um mercado capaz de absorver os resíduos gerados, bem como as dificuldades logísticas e tributárias existentes – pontos que devem ser tratados com prioridade para que os índices obtenham a melhora desejada.

Princípios considerados fundamentais no cenário determinado pela PNRS como a redução da geração de resíduos, implementação do sistema de logística reversa, aumento na recuperação dos materiais e a correta disposição final tem encontrado entraves em seu desenvolvimento. A carência observada com relação a quantidade de recursos financeiros necessários para a plena operação do setor se mostra crônica e evidente, não tendo os valores envolvidos sequer acompanhado a evolução dos índices de inflação – houve um acréscimo de 32% no volume de recursos enquanto a inflação acumulada na última década totalizou 76%. Em contrapartida, o volume de

resíduos e de atividades associadas aos processos de reciclagem apresentou crescimento.

É possível concluir, portanto, que a existência de uma política considerada adequada para a gestão dos resíduos sólidos encontra na questão financeira um limitador que impacta diretamente no cumprimento das diretrizes determinadas. Não sendo possível ampliar e acompanhar a modernização dos serviços, a consequência negativa sobre a correta execução dos devidos procedimentos é direta. Assim, os benefícios almejados para o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas não consegue atingir o seu pleno potencial – questões como a disposição final inadequada dos RSU e a contaminação de solo e recursos hídricos, por exemplo, continuam sendo alvo de preocupação constante.

#### 2.1.4 DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU

Considerando as classificações em que os RSU podem se enquadrar, entra em questão a destinação que deverá ser dada a estes resíduos produzidos. Dentre as formas de descarte observadas no cenário brasileiro, merecem destaque a destinação final em lixões, aterros controlados e aterros sanitários, estes sendo considerados a forma de disposição final ambientalmente adequadas. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos em seu título IV, artigo 54º (2010) temos que a disposição final ambientalmente adequada deverá ser obtida dentro dos seguintes prazos, já adequados ao Marco Regulatório do Saneamento (Lei nº 14.026, de 2020):

Art. 54. A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada até 31 de dezembro de 2020, exceto para os Municípios que até essa data tenham elaborado plano intermunicipal de resíduos sólidos ou plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos e que disponham de mecanismos de cobrança que garantam sua sustentabilidade econômico-financeira, nos termos do art. 29 da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para os quais ficam definidos os seguintes prazos: (Redação dada pela Lei nº 14.026, de 2020)

I - até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais; (Incluído pela Lei nº 14.026, de 2020)

II - até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para

Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes; (Incluído pela Lei nº 14.026, de 2020)

III - até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; e (Incluído pela Lei nº 14.026, de 2020)

IV - até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010.

Os lixões são considerados uma forma inadequada de disposição final dos RSU. Ficam caracterizados pela descarga do material sobre o solo sem que sejam considerados critérios técnicos, medidas de proteção ambiental e de proteção à saúde pública. Assim, trazem como consequência a proliferação de vetores de doenças, poluição do solo e de águas superficiais pelo chorume e também a geração de odores desagradáveis. São vistos como ilegais segundo a legislação brasileira (FEAM, 2018).

Aterros Controlados consistem no confinamento adequado dos RSU através da aplicação de técnicas sem que haja a poluição do ambiente externo. No entanto, não promovem a coleta dos efluentes líquidos e gasosos produzidos. A não impermeabilização de suas bases, geralmente ausente, compromete a qualidade das águas subterrâneas; soma-se a isso a ausência de tratamento de lixiviado e do biogás gerados. Percebe-se que problemas ambientais são causados, mas em muitos casos esta pode ser a única alternativa viável devido à ausência de recursos por parte dos municípios brasileiros (RIGHI, 2017).

As alternativas de tratamento dos RSU devem ser pensadas em etapa anterior ao descarte em um aterro sanitário, sendo visto como a etapa final da gestão dos resíduos sólidos. Os processos de compostagem, incineração de resíduos orgânicos e coprocessamento são opções relevantes para auxiliar a diminuição da quantidade de RSU que chegariam ao final do processo. A separação realizada para a compostagem da matéria orgânica implicaria em menor volume de material depositado nos aterros sanitários; a incineração com recuperação de energia permite a cogeração de energia elétrica e/ou térmica; e o coprocessamento permite a destruição de toneladas de resíduos durante a produção do cimento, havendo substituição parcial de matéria prima e/ou combustível fóssil (RIGHI, 2018). Assim, é possível aumentar a vida útil dos aterros, diminuindo a quantidade de lixiviado

produzido, os custos envolvidos no tratamento do lixiviado e os possíveis impactos ambientais decorrentes das atividades envolvidas.

Aterros sanitários podem ser definidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 8419:1996. Nesta, é dito que:

Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos: técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permitível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

O confinamento do material depositado no aterro pode ser feito com materiais diferentes de solo, desde que o material utilizado seja inerte. Devem também ser consideradas medidas de coleta e tratamento dos efluentes líquidos e gasosos gerados, bem como planos para o monitoramento ambiental e geotécnico do local de implantação de um aterro sanitário.

A seleção de uma área destinada a receber um aterro sanitário terá importância fundamental no bom desempenho do aterro considerado, sendo uma das dificuldades mais relevantes para seu estabelecimento. A análise das questões técnicas, das condições econômicas e ambientais devem ser feitas de maneira tal que considere o impacto ambiental causado pela instalação como sendo o menor possível. É necessária a análise da legislação urbana afim de garantir o respeito ao zoneamento estabelecido, avaliando a aceitação da população com a instalação do aterro. Da mesma forma, o fator tempo é incluído no processo para garantir a utilização deste aterro por um longo espaço de tempo necessitando de um mínimo de obras para o início do processo de operação (NBR 13896 da ABNT, 1997).

Segundo a NBR 13896 da ABNT (1997) a adequabilidade de um local escolhido deverá considerar uma série de aspectos técnicos, dentre eles: avaliação da topografia, geologia e tipos de solos existentes; influência do aterro sobre os recursos hídricos e da vegetação sobre o aterro; facilidade de acesso; tamanho disponível e vida útil, considerando 10 anos como tempo mínimo; análise de viabilidade

econômica; e distância mínima a núcleos populacionais, recomendando que seja superior a 500m.

Os critérios de projeto adotados no processo de concepção do aterro sanitário fazem parte das entregas exigidas como documentação, e irão compor o chamado memorial técnico do projeto. Assim, deverá conter os cálculos realizados para os elementos especificados mostrando hipóteses de cálculo, justificativas e resultados. A análise da vida útil deverá ser entregue, devidamente justificada. O cálculo da estabilidade dos taludes do aterro, bem como da estabilidade do maciço do aterro, deverá se fazer presente como parte das entregas exigidas (RECESA, 2008). O memorial técnico contemplará também a descrição sobre os sistemas necessários ao funcionamento do aterro, a saber: sistemas de impermeabilização de base e laterais, de cobertura, drenagem e tratamento de lixiviados, de coleta e tratamento dos gases, de drenagem superficial e de monitoramento (FEAM, 2018).

A rotina de operação de um aterro sanitário iniciará, em seu horário de funcionamento, no processo de recebimento dos resíduos para a realização da identificação e pesagem do material. Após o recebimento, os resíduos são transportados a célula do aterro em que serão depositados e haverá o procedimento de descarga no local. Segue-se com o processo de espalhamento visando obter camadas de espessura aproximadamente uniformes com o objetivo de otimizar a eficiência da compactação do material (FEAM, 2008). Segundo Catapreta (2008) as camadas compactadas devem possuir espessura máxima de 0,60m para o resultado seja satisfatório. De acordo com o avanço do serviço é realizado o cobrimento contínuo do topo da célula para evitar a exposição dos resíduos, garantindo assim um controle sanitário do ambiente.

A previsão do procedimento de resposta a eventuais problemas na operação do aterro sanitário deve ser considerada previamente na elaboração do plano de emergência. Neste plano, devem ser indicadas as informações a respeito de possíveis acidentes e a maneira como se deve lidar caso ocorram, indicações sobre os responsáveis pela coordenação das medidas especificadas e uma listagem dos equipamentos de segurança disponíveis (NBR 13896, 1997).

O monitoramento das instalações do aterro sanitário possui o objetivo de acompanhar o comportamento geomecânico e o desempenho ambiental do local de maneira a permitir a identificação de alterações no comportamento esperado. Assim, a definição de medidas preventivas ou corretivas pode ser realizada em tempo suficiente. Dentre os aspectos monitorados, temos (CATAPRETA e SIMÕES, 2016; RIGHI, 2017):

- Monitoramento ambiental: qualidade das águas subterrâneas e superficiais, qualidade do ar, pressão sonora, líquidos lixiviados, biogás, dados pluviométricos e vazões de líquidos;
- Monitoramento operacional: inclinação das rampas de aterragem, compactação dos resíduos e cobertura;
- Monitoramento geotécnico: poropressão nos diques e no interior das células de resíduos do aterro, recalques superficiais, permeabilidade, movimentações internas, ensaios de campo, inspeções de campo e controle tecnológico dos materiais geotécnicos utilizados.

O encerramento das atividades do aterro, no momento em que for atingida sua capacidade útil, deve ser previamente contemplado através do plano de encerramento. Com isto, há o objetivo de minimizar necessidade de manutenção futura e de minimizar a liberação de percolado contaminado ou gases para o exterior do corpo do aterro. No plano elaborado devem constar os métodos e etapas a serem realizadas no momento do fechamento, o projeto e construção da camada final de cobertura, data estimada e uso planejado para a área do aterro quando finalizado o processo de fechamento, e atividades de monitoramento e manutenção da área (NBR 13896, 1997).

Importante destacar que a NBR 13896 (1997) prevê que, após o fechamento do aterro sanitário, as atividades de monitoramento contemplem: águas subterrâneas por um período de 20 anos após o fechamento; sistemas de drenagem e de detecção de vazamento de percolado até que seja encerrada sua geração; cobertura, de modo a corrigir possíveis rachaduras ou erosão; tratamento de líquido percolado, até a finalização de sua geração; e sistema de coleta de gases, até comprovação do término de geração.

## 2.2 CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

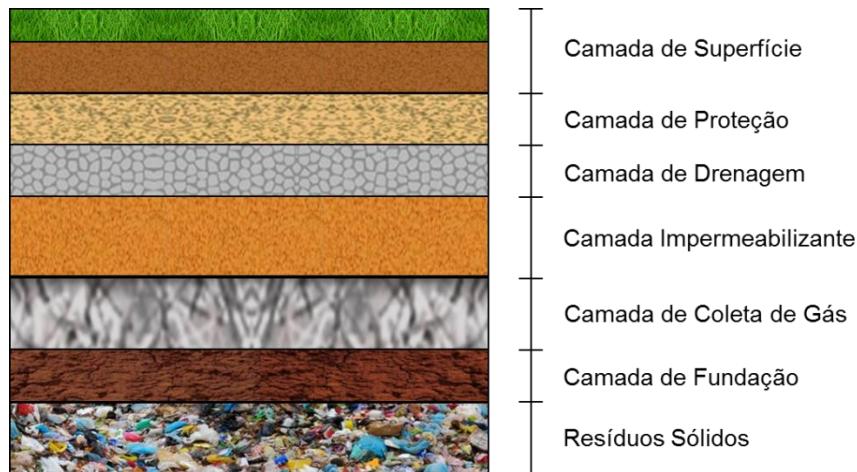
### 2.2.1 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA

O sistema de cobertura final de um aterro sanitário pode ser entendido como sendo uma composição em camadas construídas com o objetivo de reduzir a infiltração de água para o corpo do aterro e também de minimizar a emissão de gases para a atmosfera (TRAVAR *et al*, 2015).

Este sistema possui função primordial quando considerados os diversos impactos que aterros de RSU podem acarretar, tanto no que diz respeito aos aspectos ambientais quanto em relação aos recursos financeiros. Ao controlar a entrada de líquidos infiltrados no interior da massa do aterro haverá consequência direta na geração de lixiviado, sendo a mesma reduzida e possibilitando minimizar impactos ambientais associados. A menor geração de lixiviado implicará também em menor quantidade de verbas necessárias para tratamento destinadas nas fases de operação e pós-operação (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013).

Dentre a série de camadas que compõe o sistema de cobertura final, tem-se que a estrutura deve ser composta por: uma camada superficial para minimizar os efeitos da erosão; camada de proteção de base ou biótica, para proteger as camadas seguintes de processos erosivos e ciclos de secagem/umedecimento; camada drenante; camada impermeabilizante; camada de controle de gases; e camada de fundação ou de regularização de base. O tipo de aterro a ser construído, em conjunto com as condições climáticas e a disponibilidade de materiais, serão objetos de análise para determinar a utilização de toda a estrutura citada ou se haverá a retirada de algum componente (COSTA, C., 2015). A Figura 1 apresenta uma representação esquemática para a estrutura de camadas de um sistema de cobertura final.

Figura 1: Estrutura de um sistema para utilização em camada de cobertura.



Fonte: Autor (2020).

Considerando a relevância da camada final de cobertura, é possível destacar que o sistema que a compõe deve, portanto, ser pensado visando o atendimento aos seguintes aspectos (CATAPRETA; SIMÕES; SILVEIRA, 2011):

- Controle de entrada de água e ar ao interior do aterro;
- Minimizar a migração de líquidos lixiviados e biogás para o exterior;
- Ser um elemento de redução de odores, vetores de doenças e afins;
- Servir como sistema de controle de águas superficiais;
- Facilitar a recomposição da paisagem.

Cabe destacar que as camadas de cobertura intermediárias desempenham papel semelhante no que tange ao aspecto de controle de vetores de doenças. São construídas durante o processo de operação do aterro e não contam com o mesmo rigor técnico observado para a camada de cobertura final. Ainda assim apresentam a função de controlar a entrada de líquidos no aterro, apesar de possuírem menor espessura e compactação em relação a camada final (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013).

A NBR 13896 da ABNT (1997) não apresenta maiores detalhes quanto as especificações recomendadas para a camada de cobertura final. É dito que o projeto e a construção devem ser concebidos de maneira a minimizar a infiltração de água, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da região do

aterro. Após o encerramento do aterro, deve ser monitorada de maneira a garantir manutenção desta cobertura para correção de rachaduras ou erosão.

## 2.2.2 TIPOS DE CAMADA DE COBERTURA

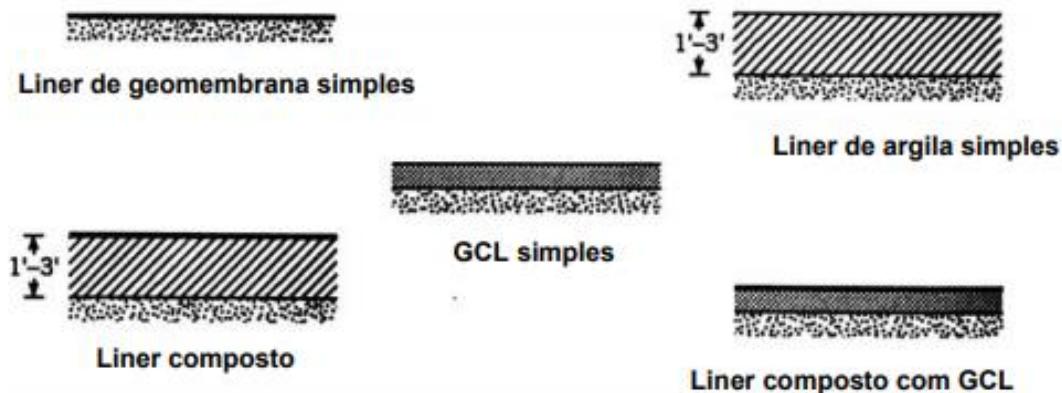
Segundo Costa, M. (2015) as camadas de cobertura comumente referenciadas na literatura são as convencionais, evapotranspirativas e oxidativas. Particularidades como clima, solo natural disponível e custos envolvidos são fatores determinantes e possuem impacto sobre a escolha do tipo de cobertura utilizado.

Cabe destacar a utilização de materiais alternativos (como composto orgânico, resíduo de construção civil e PET, entre outros) adicionados em misturas de solo. São opções que possuem sua viabilidade técnica e econômica como alvo de estudos e ganham espaço em um cenário de crescente importância dada aos processos de reciclagem e reutilização dos RSU produzidos pelas atividades antrópicas.

As coberturas convencionais são aquelas que utilizam em sua composição solo natural argiloso ou camadas intercaladas de solo natural argiloso com algum tipo de geossintético, com o objetivo de impermeabilizar a camada superior de cobertura de um aterro. Os materiais mais utilizados são: geocompostos argilosos (geosynthetic clay liner – GCL); geomembranas (GM); e solo argiloso compactado (compacted clay liner – CCL) (COSTA, C., 2015).

Lodi, Zomberg e Bueno (2009) apresentam exemplos de configurações típicas de sistemas de cobertura, representados através da Figura 2. As camadas de superfície, de proteção e de drenagem foram omitidas nessa representação.

Figura 2: Sistemas de cobertura – liner simples e composto.



Fonte: Lodi, Zornberg e Bueno (2009).

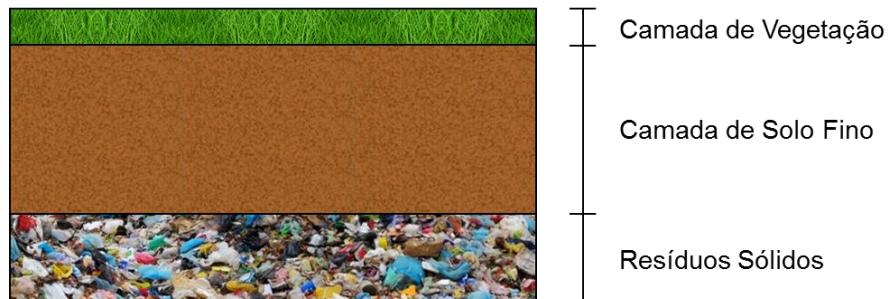
Os GCL possuem uma camada de bentonita que, ao ser hidratada, atua como barreira para líquidos e gases. As GM são mantas contínuas e flexíveis, com baixa permeabilidade e possibilidade de absorver pequenas deformações; podem ser associadas às CCL para minimizar efeitos de ressecamento e penetração de raízes. As camadas de CCL têm seu desempenho condicionado à baixa condutividade hidráulica e baixa susceptibilidade a fissuras; sozinhas não são capazes de manter a baixa permeabilidade por grandes períodos, especialmente em locais áridos em que ficam sujeitas a fissuração por ressecamento (COSTA, C., 2015).

As camadas evapotranspirativas utilizam componentes do balanço hídrico, como capacidade de armazenamento de água pelo solo, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração (COSTA, M., 2015). Utilizam uma ou mais camadas de solo para reter água, que será transpirada pela vegetação e evapotranspirada pelo solo. São sistemas que contam mais com a capacidade de armazenamento de água do que com materiais de baixa permeabilidade para reduzir a infiltração (CATAPRETA, 2008). Podem ser divididas em monolíticas, barreira capilar e barreiras anisotrópicas.

As camadas monolíticas são aquelas formadas por uma camada de solo de granulometria fina, com baixa capacidade de condução de água e alta capacidade de armazenamento de água. A espessura da camada depende da capacidade de retenção de água pelo solo e tipo de vegetação, devendo possibilitar o

armazenamento até o momento da eliminação por evapotranspiração (COSTA, M., 2015). A estrutura de uma camada monolítica é apresentada na Figura 3.

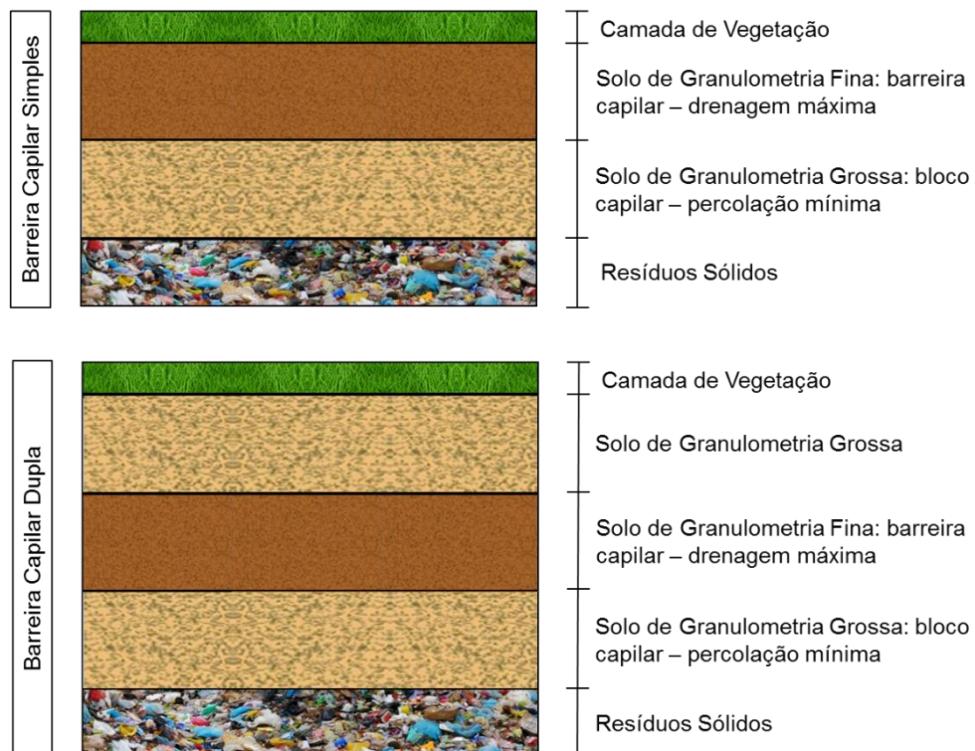
Figura 3: Camada de cobertura monolítica.



Fonte: Autor (2020).

Uma barreira capilar simples é composta por uma camada de solo de granulometria fina executada sobre uma camada de solo grosso. Esta mudança no tamanho dos poros dos materiais entre as camadas impede o fluxo de água, reduzindo a infiltração no aterro (RIGHI, 2011). Ocorre o fenômeno de ruptura capilar, em que o objetivo é que a água seja armazenada pelo solo fino para posterior eliminação por evapotranspiração. Pode ser executada uma barreira capilar dupla, havendo uma camada de material granular acima do conjunto solo de granulometria fina/camada de solo grosso para evitar perda de umidade por parte da camada de solo fino (SOARES; FAYER; RIGHI, 2019). A Figura 4 apresenta as configurações em camadas utilizadas para a execução de uma barreira capilar simples e de uma barreira capilar dupla.

Figura 4: Barreiras capilares simples e dupla.



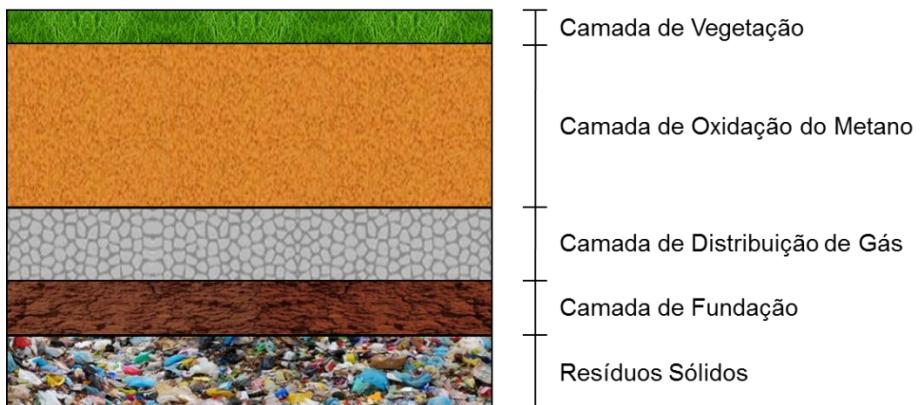
Fonte: Autor (2020).

As barreiras anisotrópicas possuem funcionamento semelhante as barreiras capilares, sendo previsto em projeto a inclusão de camadas de drenagem que permitem o escoamento lateral da água em seu interior (COSTA, M., 2015).

As camadas oxidativas são aquelas em que ocorrem a utilização de materiais, como o composto orgânico, capazes de criar condições para o desenvolvimento de bactérias metanotróficas que consumirão parcela do metano produzido pelo aterro na presença de oxigênio. O gás metano, ao passar pela camada de cobertura, será consumido pelas bactérias metanotróficas que o convertem em água, dióxido de carbono e biomassa celular. A eficiência do processo depende de diferentes fatores físico-químicos, sendo influenciada por características geotécnicas e microbiológicas do sistema de cobertura. Como exemplo, tem-se que à medida que a profundidade aumenta, a eficiência do processo diminui, sendo recomendado inserir uma camada de distribuição de gás abaixo da camada de oxidação. Teixeira *et al* (2009) revelam que a relação entre a contagem de bactérias metanotróficas no solo e o grau de saturação mostra-se inversamente proporcional, pois o aumento do grau de saturação

com manutenção do índice de vazios acarreta em menor permeabilidade ao gás. A estrutura utilizada na execução de uma camada oxidativa é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Estrutura de uma camada oxidativa.



Fonte: Autor (2020).

### 2.2.3 UTILIZAÇÃO DE SOLO COMO CAMADA DE COBERTURA

O sistema de cobertura que utiliza uma camada de solo compactado com baixa permeabilidade é comumente utilizado no cenário brasileiro. Esse sistema pode ter aplicação tanto em camadas de cobertura diária quanto na cobertura final, se diferenciando por uma maior espessura para o caso de cobertura final (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013).

O solo a ser utilizado em uma camada compactada com baixa permeabilidade pode ser considerado uma matéria-prima nobre para ser destinada a utilização em um sistema de cobertura (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013). Economicamente, a utilização de solo com esse propósito depende da proximidade de uma jazida em relação ao local do aterro. O transporte por grandes distâncias acarreta em maior volume de recursos empregados para destinar o solo à finalidade planejada, o que pode inviabilizar seu uso final.

Além do sistema de cobertura convencional, o solo também pode ser utilizado na composição de barreiras capilares simples, duplas, camadas evapotranspirativas e combinados com materiais alternativos (SOARES; FAYER; RIGHI, 2019). Dessa forma o volume de solo movimentado diminuiria, principalmente no caso em que se realiza uma mistura de solo com um percentual determinado experimentalmente de

um material alternativo. Assim, é possível obter benefícios tangíveis nos aspectos econômicos e ambientais: menor custo envolvido na movimentação de solo combinado com o pensamento em destinação correta de resíduos produzidos por outras atividades.

Os materiais essenciais para a utilização como camada de cobertura em aterros sanitários são as argilas. Caso possuam alta plasticidade, são capazes de reter quantidade de água superiores ao seu peso próprio (HAMDI & SRASRA, 2013). Essa capacidade de retenção de água está ligada diretamente a composição mineralógica da argila utilizada, tendo influência fundamental na permeabilidade da camada de cobertura (ARAÚJO, 2017). Assim, a escolha do tipo adequado de argila é fundamental para o bom desempenho planejado para sua utilização.

Dentre as características de importância fundamental a serem consideradas destaca-se o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica. Em geral, o solo argiloso utilizado é compactado até possuir permeabilidade igual ou inferior a  $10^{-9}$  m/s (SOARES; FAYER; RIGHI, 2019). Araújo (2017) revela que, em países europeus, o coeficiente de permeabilidade indicado também é da ordem de  $10^{-9}$  m/s com espessuras que variam entre 0,60m e 1,00m. A NBR 13.896 da ABNT (1997) indica que os depósitos naturais de materiais a serem utilizados tenham permeabilidade mínima de  $10^{-8}$  m/s, havendo zona não saturada mínima de 3,0m. Ademais, dispõe que o aterro deve ser executado em área com predominância de material de subsolo com coeficiente de permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-7}$  m/s.

A presença de montmorilonita (argilomineral que apresenta alta expansão) pode levar a um coeficiente de permeabilidade da ordem de  $10^{-13}$  m/s, enquanto uma caulinita possui o valor de  $10^{-8}$  m/s. Caso o solo da região do aterro não possua baixo coeficiente de permeabilidade, a adição de percentuais de argila deve ser considerada para melhorar características como a distribuição granulométrica e a própria permeabilidade. Para essa finalidade são bastante utilizadas as bentonitas, argila cujo argilomineral predominante é a esmectita. Assim, as bentonitas possuem partículas bastante finas e apresentam expansão de volume na presença de água, auxiliando a melhoria das propriedades do solo com o qual se deseja trabalhar (SILVA, 2017).

Apesar de as argilas compactadas possuírem vantagens como o baixo coeficiente de permeabilidade, é preciso destacar que apresentam alto potencial de retração e de expansão (HAMDI & SRASRA, 2013). Sujeitas a efeitos internos e externos do ambiente, como variação de temperatura e umidade, ocorre o desenvolvimento de fissuras e trincas na cobertura em argila compactada. A fissuração e o trincamento proporcionam o desenvolvimento de caminhos preferenciais para a infiltração de água e para o escape de gases contidos no interior do maciço de resíduos (Lu *et al*, 2015). Assim, deve-se considerar no momento de projeto a previsão de dispositivos de proteção para a camada de argila compactada. Esses dispositivos, como a presença de uma vegetação rasteira ou a utilização de compostos para retenção de água, são capazes de reduzir a perda de água para o ambiente levando a camada de cobertura a uma condição de eficiência melhorada (ARAÚJO, 2017).

É possível perceber uma ausência de dispositivos de regulação especificados em norma a nível nacional. Informações como configuração e espessura das camadas do aterro, energia e método de compactação utilizada, teores de umidade e afins não apresentam menção nos dispositivos atuais (SILVA, 2017). Esse aspecto acarreta em um déficit de critérios técnicos a respeito de projeto, operação, monitoramento e manutenção de um aterro sanitário.

#### 2.2.4 COMPOSTO ORGÂNICO

A compostagem é um processo biológico que permite a transformação de restos orgânicos, através da aceleração da decomposição do material, que tem como produto final o composto orgânico (BRASIL, 2020). O termo composto orgânico é utilizado para referir-se ao produto estabilizado e higienizado, que é benéfico para a produção vegetal (LIRA, 2017).

O processo de compostagem ocorre com decomposição aerobia associada a manipulação do material pelo homem através do desenvolvimento de técnicas que acarretam na aceleração da obtenção do produto final (LIRA, 2017). Parte da energia gerada pelo processo é utilizada para crescimento da população microbiana e o restante é liberado na forma de calor. A eficiência obtida ao final depende do crescimento da população de microrganismos decompositores, sendo função de:

granulometria, umidade, arejamento, relação carbono/nitrogênio do material, pH e dimensões da pilha de compostagem (SANTOS, 2015).

Dados do Ministério do Meio Ambiente (2020) revelam que cerca de 55% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil é formado por material orgânico que, ao ser soterrado em aterros ou lixões, tem a sua biodegradação impossibilitada. A compostagem pode ser vista como uma maneira de reduzir o acúmulo de materiais nos aterros, bem como de reduzir a liberação de metano e de lixiviado. Através desse processo, é possível recuperar os nutrientes dos resíduos orgânicos e retorná-los ao ciclo natural através da utilização para enriquecimento do solo para agricultura ou jardinagem.

O fato de os sistemas de cobertura de aterros sanitários estarem expostos a fenômenos meteorológicos sazonais faz com que suas propriedades possam mudar ao longo do tempo (HENKEN-MELLIES e SCHWEIZER, 2011). As evidências geradas a respeito da perda de desempenho pela região superficial do solo de cobertura, em que se torna relevante a dominância de condições não-saturadas, são considerados fatores motivadores para a proposição de coberturas alternativas destinadas a estender a vida útil do sistema a ser instalado.

Nesse contexto a utilização de composto orgânico em biocoberturas oxidativas surge como alternativa para melhorar a oxidação microbiana do metano, o que leva a redução da emissão desse gás. Assim, é possível reduzir o impacto negativo da emissão do metano pelos aterros sanitários visto que se trata de um gás com papel importante no mecanismo do efeito estufa, tendo impacto estimado como 23 vezes pior do que se comparado ao gás carbônico (REDDY; YARGICOGLU, 2017; BRASIL, 2020).

A utilização do composto orgânico em camadas de cobertura acarreta em mudanças nos processos atuais de construção e monitoramento de aterros. É possível concluir, porém, que a utilização do material traz consigo melhorias em aspectos estruturais, físicos e químicos do solo como: porosidade, capacidade de retenção de água e disponibilidade de matéria orgânica e nutrientes fundamentais para o processo de oxidação do metano no solo (SANTOS, 2019).

Entretanto, Chiemchaisri *et al* (2012) destacam que para utilizar um composto orgânico com o objetivo de oxidar parte do metano produzido alguns requisitos devem ser cumpridos. São eles:

- O material deve consistir de um substrato de composto maturado com matéria orgânica e baixa concentração de amônio e sais;
- Deve apresentar estabilidade a longo prazo e porosidade adequados, mesmo com alto teor de água, para garantir permeabilidade satisfatória de oxigênio e metano;
- Deve fornecer aos microorganismos um suprimento de nutrientes alto e facilmente disponível para apoiar a atividade microbiana.

O aumento na quantidade de matéria orgânica disponível no solo serve de suprimento para a ação das bactérias metanotróficas, o que acarreta no aumento da capacidade oxidativa da camada de cobertura utilizada (RIGHI, 2017). Como parte das características intrínsecas do composto orgânico, Santos (2019) cita que também deve haver área de superfície específica elevada, boa capacidade de retenção de umidade, integridade estrutural e estabilidade biológica como características desejáveis.

Como consequência da utilização dessa solução pode-se ter o desenvolvimento de camadas de cobertura alternativas menos onerosas, o que justifica estudos realizados para avaliação de seu desempenho. A preservação das jazidas e de recursos naturais também são vistas como impactos positivos atingidos, podendo contribuir diretamente para um bom desempenho de obra com perfil voltado a sustentabilidade (SANTOS, 2019).

Em seu trabalho, Rose (2009) utilizou quatro colunas experimentais construídas com tubos de 60 cm de PVC (9,9 cm diâmetro interno) para avaliar a viabilidade da utilização de RSU compostado em biocamadas visando a redução na emissão de gases proveniente de aterros. Cada coluna foi preenchida com 2,3 litros de RSU compostado, sendo injetado no sistema gás metano misturado ao ar comprimido através de uma bomba. As colunas foram alimentadas por um fluxo ascendente de 150 l/min, controlado por rotâmetros. Decorridos 100 dias de experimento a coluna

contendo o solo como material oxidativo apresentou capacidade oxidante de 447 g/m<sup>3</sup>.dia, com eficiência de 20%. As colunas contendo as misturas solo/composto nas proporções 3:1 e 1:1 (em peso) como materiais oxidativos tiveram capacidade oxidante entre 456 e 584 g/m<sup>3</sup>.dia, correspondendo a eficiência entre 20 e 26% respectivamente. A coluna contendo apenas o composto como material oxidativo mostrou capacidade oxidante de 990 g/m<sup>3</sup>.dia, com eficiência de 44%. A análise dos resultados aponta a compatibilidade ambiental do RSU compostado como suporte oxidativo de metano, comprovando a importância do aproveitamento destes materiais como parte da cobertura de aterros de resíduos.

A avaliação do composto orgânico na construção de uma barreira capilar para cobertura final de aterros de resíduos foi alvo de trabalho realizado por Righi (2011). Houve a construção em laboratório de um modelo de barreira capilar simples para a verificação de seu desempenho após submetida a duas simulações de chuva. Na primeira chuva simulada, a barreira apresentou eficiência de 81,62% enquanto que na segunda chuva, obteve-se 93,44% como resultado dessa eficiência. Como na segunda simulação houve redução na velocidade de entrada de água no sistema acredita-se que esse seja o fator que implicou na diferença de eficiência, indicando que a capacidade de retenção de água depende da velocidade de infiltração. Assim, a barreira capilar demonstrou atender ao esperado, concluindo-se que pode ser uma alternativa de aplicação viável.

O estudo realizado por Costa, M. (2015) utilizou ensaios em duas colunas de solos para a análise de seu comportamento em função do fluxo de líquidos e de gases. A coluna 1 consistiu em 0,60 m de solo compactado, enquanto na coluna 2 houve 0,30 m de solo compactado sobreposto a uma camada de 0,30 m de mistura solo-composto orgânico na proporção 1:1 (em volume). Observou-se que a coluna 2 teve permeabilidade pouco maior que a camada 1. Com relação a retenção de metano a coluna 2 apresentou resultado 33% melhor do que a camada de solo puro, havendo também redução da emissão de metano através do processo de oxidação do gás ao atravessar a camada. Considerando que a adição do composto orgânico foi capaz de reduzir a fissuração na coluna 2, que também apresentou maior capacidade de retenção de água – apresentou capacidade de campo 11% maior quando comparada a coluna 1. Concluiu-se, portanto, que a camada oxidativa utilizando a mistura solo-

composto orgânico foi capaz de minimizar os problemas relacionados à camada de cobertura.

### 2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO RSU COMPOSTADO

O RSU compostado a ser utilizado neste trabalho é produzido através de uma parceria que envolve a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Companhia de Resíduos e Energia METHANUM e a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) do Rio de Janeiro.

Como resultado desta parceria desenvolveu-se um sistema de tratamento de resíduos orgânicos e de aproveitamento energético de biogás que utiliza o processo de metanização em estado sólido por bateladas (MESB) denominado TMethar. Trata-se de uma planta instalada em pequena escala na Usina do Caju (Rio de Janeiro – RJ) e que possui capacidade média de tratamento de 25 toneladas de resíduos orgânicos/dia, quantidade equivalente ao gerado por uma população de 50 mil habitantes (ORNELAS-FERREIRA, 2019). A Figura 6 mostra o local de instalação deste sistema.

Figura 6: Sistema TMethar – Usina do Caju (Rio de Janeiro – RJ).



Fonte: Ornelas-Ferreira – comunicação pessoal (2019).

Ornelas-Ferreira et al. (2019) descreve o processo de metanização realizado no sistema TMethar. Segundo o autor, este processo é capaz de gerar como subprodutos o biogás (aplicações para geração de calor/energia ou para produção de biometano) e resíduos biossólidos (aplicações para condicionamento de solo em agricultura e

utilizado no processo de compostagem). A Figura 7 revela o aspecto dos resíduos sólidos antes do processo e após submetido ao sistema de metanização.

Figura 7: Fração orgânica dos resíduos sólidos antes (esquerda) e após (direita) o processo de metanização no TMethar.



Fonte: Ornelas-Ferreira – comunicação pessoal (2019).

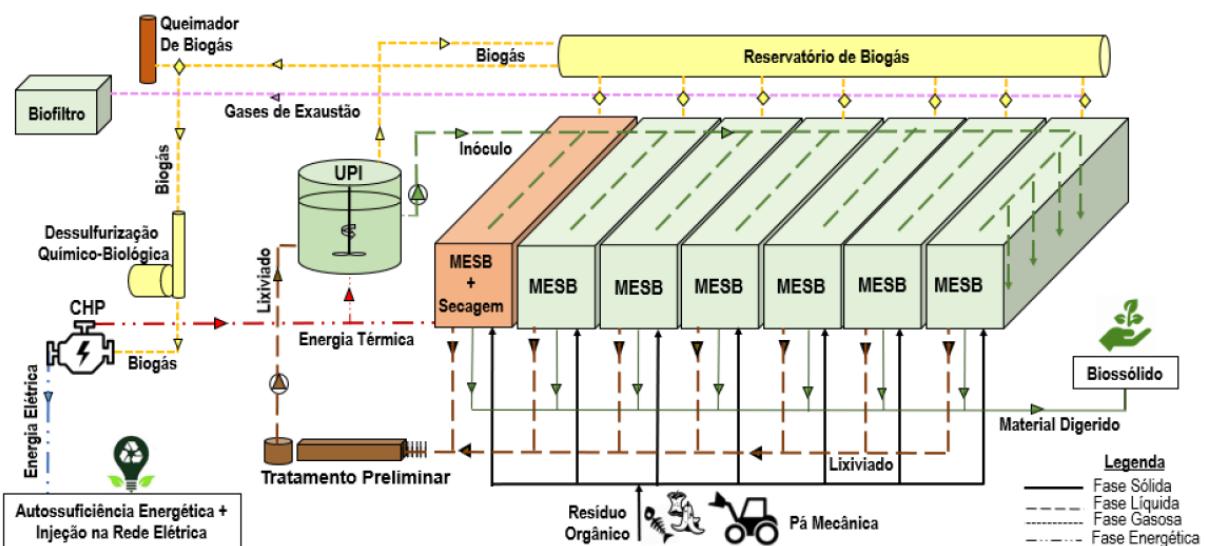
O sistema instalado no TMethar tem em sua composição as seguintes unidades principais, a saber (ORNELAS-FERREIRA, 2019):

- Seis reatores principais para o sistema de metanização MESB, carregados em lotes sequenciais de 25 dias cada e alimentados em pilhas de 2,5 metros de matéria orgânica dos resíduos sólidos;
- Um reator híbrido, que pode ser utilizado de duas maneiras: como uma unidade MESB e também como um reator de secagem térmica e higienização do material resultante do processo;
- Unidade de Produção de Inóculo (UPI): um reator anaeróbio de mistura completa utilizado para estabilização de lixiviado e produção de inóculo;
- Um reservatório flexível de gás para realizar o armazenamento do biogás produzido;
- Um biofiltro para tratamento dos gases residuais – desodorização;
- Um sistema de dessulfurização do biogás;
- Um queimador fechado de biogás;
- Uma unidade de cogeração de energia elétrica e térmica (CHP).

A Figura 8 apresenta um fluxograma do processo de tratamento biológico realizado no TMethar. Este processo encontra-se dividido em quatro etapas que se relacionam de maneira integrada. Segundo Ornelas-Ferreira (2019), as quatro etapas envolvidas são:

- I. Recepção e seleção, seguidos do processo de mistura da fração orgânica dos resíduos sólidos coletados;
- II. Execução do processo de metanização em estado sólido via batelada sequencial (MESB) com recirculação de lixiviado estabilizado via UPI;
- III. Pós-tratamento do material digerido;
- IV. Sistema de armazenamento, dessulfurização e utilização de biogás para geração de energia na CHP.

Figura 8: Funcionamento do TMethar.



Fonte: Ornelas-Ferreira (2019).

Segundo Ornelas-Ferreira *et al.* (2019), o biogás produzido no TMethar terá utilização principal para acionar um motor combinado de calor e energia (CHP) após passar por uma dessulfurização química e biológica. Para tanto, um teor mínimo de 50% de metano no gasômetro é necessário. Um sistema automatizado garantirá a mistura adequada do biogás de menor teor energético (maior que 16% de metano) com o de maior teor energético, sistema necessário pelo fato de a produção de cada reator MESB ser variável ao longo do tempo em cada lote. Caso o biogás produzido tenha

um teor de metano entre 4% e 16% o mesmo será queimado, e caso este teor seja inferior a 4% (não suficiente para queima) será direcionado para tratamento em biofiltro. Existe a possibilidade de o biogás ser tratado e utilizado como biometano desde que possua teor mínimo de 90% de metano.

A eletricidade produzida no motor combinado de calor e energia (CHP) deverá atender a demanda própria de todo o processo e a energia térmica será utilizada para aquecer a unidade de produção de inóculo (UPI), mostrada pela Figura 9, e para secagem do material resultante do processo de metanização visando a redução de seu volume (ORNELAS-FERREIRA *et al.*, 2019).

Figura 9: Unidade de produção de inóculo (UPI).



Fonte: Ornelas-Ferreira – comunicação pessoal (2019).

O material resultante de cada célula MESB do processo de metanização será levado para as leiras de compostagem, instaladas no pátio da Usina do Caju. O material estará sujeito a este pós-tratamento pelo período de trinta dias. Decorrido o tempo necessário, estará produzido o RSU compostado utilizado para a realização deste trabalho. A Figura 10 exibe o armazenamento do resíduo do processo de metanização nas leiras de compostagem.

Figura 10: Leiras de Compostagem.



Fonte: Ornelas-Ferreira – comunicação pessoal (2019).

Cabe destacar o fato da introdução de resíduo de poda triturado junto a fração orgânica de resíduos sólidos no processo. A utilização deste acréscimo teve o objetivo de garantir uma melhor estruturação da fração orgânica, de formar leiras com um índice de vazios favorável a eficiência do processo e de equilibrar a relação C/N do material introduzido no reator MESB. O resíduo de poda triturado foi produzido na própria Usina do Caju, sendo necessário homogeneizar os materiais envolvidos durante o processo de mistura (ORNELAS-FERREIRA, 2019). A Figura 11 apresenta o equipamento utilizado para Trituração utilizado.

Figura 11: Equipamento utilizado para Trituração de resíduo de poda.



Fonte: O Globo (2020).

A estruturação promovida pela mistura de resíduo de poda triturado junto a fração orgânica dos resíduos sólidos permitiu uma melhora no desempenho dos reatores MESB. Como consequência, foi possível: a formação de leiras mais altas ( $> 2,0$  m), melhora da percolação do inóculo através do substrato (recirculação de lixiviado) e o incremento do conteúdo de  $\text{CH}_4$  no biogás produzido nos reatores MESB (ORNELAS-FERREIRA, 2019).

## 2.4 CRITÉRIOS PARA UTILIZAÇÃO DOS MATERIAIS

De maneira a permitir a avaliação do RSU compostado para atender ao objetivo principal do trabalho em curso, bem como das outras aplicações a serem observadas, foram consultadas as seguintes normas:

- Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação (NBR13896/1997);
- Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço (DNIT 141/2010 – ES);
- Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço (DNIT 139/2010 - ES);
- Terraplenagem - Aterros - Especificação de Serviço (DNIT 108/2009 - ES).

Assim, na Tabela 4, encontram-se apresentadas as principais características especificadas dos materiais utilizados para as destinações as quais se referem. Cabe ressaltar que a NBR13896 (1997) não apresenta, em suas considerações, valores desejáveis de coeficiente de permeabilidade específicos para o caso da utilização como camada de cobertura de aterros sanitários.

Destaca-se que, para aterros compactados, um dos critérios estabelecidos pelo DNIT diz respeito a ausência de matéria orgânica no material utilizado. O RSU-compostado caracteriza-se por ser um material inerte ao final do processo de compostagem, fato este que justifica a avaliação da possibilidade de utilizá-lo feita neste trabalho.

Tabela 4: Avaliação dos critérios de utilização.

APLICAÇÃO	CRITÉRIO PARA UTILIZAÇÃO
Cobertura de Aterro Sanitário (NBR13896/1997)	É desejável a existência de depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a $10^{-6}$ cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0 m. O coeficiente de permeabilidade do material de subsolo do aterro deve ser inferior a $5 \times 10^{-5}$ cm/s.
Base de Pavimento (DNIT 141/2010 – ES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possuir granulometria satisfazendo a uma das faixas da Tabela 1 da norma DNIT 141/2010 - ES;</li> <li>- Limite de liquidez <math>\leq 25\%</math>, e índice de plasticidade <math>\leq 6\%</math>; caso ultrapassados, equivalente de areia <math>\geq 30\%</math>;</li> <li>- A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40;</li> <li>- ISC <math>\geq 60\%</math> para Número N <math>\leq 5 \times 10^6</math>, ISC <math>\geq 80\%</math> para Número N <math>&gt; 5 \times 10^6</math>, e Expansão <math>\leq 0,5\%</math>;</li> <li>- O agregado retido na peneira nº 10: partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial. No ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), não devem apresentar desgaste superior a 55%, admitindo-se valores maiores, no caso de, em utilização anterior, terem apresentado desempenho satisfatório.</li> </ul>
Sub-base de Pavimento (DNIT 139/2010 - ES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice de Grupo - IG igual a zero, Índice de Suporte Califórnia – ISC <math>\geq 20\%</math> e Expansão <math>\leq 1\%</math>;</li> <li>- A fração retida na peneira nº 10: partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais;</li> <li>- Para solos lateríticos, os materiais submetidos aos ensaios acima podem apresentar IG diferente de zero e expansão <math>&gt; 1,0\%</math>, se no ensaio de expansibilidade (DNER-ME 029/94) apresente um valor inferior a 10%.</li> </ul>
Aterro Compactado (DNIT 108/2009 - ES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Isento de matérias orgânicas, micáceas e diatomáceas. Não ser constituídos de turfas ou argilas orgânicas.</li> <li>- Para efeito de execução do corpo do aterro, apresentar ISC <math>\geq 2\%</math> e expansão menor ou igual a 4%, quando determinado pelos ensaios DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A);</li> <li>- Para execução da camada final dos aterros, apresentar dentro das disponibilidades e em consonância com os preceitos de ordem técnico-econômica, a melhor capacidade de suporte e expansão <math>\leq 2\%</math>, determinados ensaios: DNER-ME 129/94 (Método B) e DNER-ME 49/94 (Método B);</li> <li>- Deve incluir, pelo menos, 01 (uma) alternativa com a utilização de material com ISC <math>\geq 6\%</math>.</li> </ul>

Fonte: Autor (2019).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho serão estudadas misturas com diferentes porcentagens (em peso) de RSU compostado, o solo puro (a ser utilizado na mistura) e o RSU compostado para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas dos materiais atendendo ao objetivo proposto para esta pesquisa.

Para tanto, o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas de cada material isolado e do material composto faz-se necessário. O solo puro e seu processo de caracterização será apresentado nos itens 3.1 e 3.2 respectivamente, enquanto o RSU compostado e seu processo de caracterização será abordado nos itens 3.3 e 3.4 respectivamente. O item 3.5 tratará da mistura solo-RSU compostado, descrevendo os procedimentos realizados no manejo da mesma. Apresenta-se ainda, no item 3.6, o programa de ensaios mecânicos e a finalidade a que se destina cada um.

#### 3.1 ESTUDO DO SOLO

A região escolhida para análise do solo foi disponibilizada pela Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão (Proinfra) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), sendo este o setor responsável pela execução, acompanhamento e fiscalização dos projetos e das obras de engenharia que são realizados na UFJF. Sua escolha para este trabalho se justificou pelo fato de ser um solo residual, característica desejada para a elaboração da metodologia utilizada; entretanto, deve ser feito o estudo prévio de cada tipo de solo em que haja o objetivo de utilizá-lo. Trata-se de um material de matriz argilosa, em região normalmente utilizada para trabalhos acadêmicos da área de Mecânica dos Solos, que foi coletado pela própria Proinfra através do uso de quatro bombonas de 50 litros. As bombonas foram transportadas para a sala de acondicionamento e preparação de amostras do laboratório de Mecânica do Solos, local onde ficaram armazenadas até o momento de utilização para os ensaios referentes a este trabalho. A Figura 12 mostra o local de coleta do solo utilizado, bem como de seu armazenamento em uma bombona de 50 litros.

Figura 12: Coleta (a) e armazenamento (b) do solo, realizado nas dependências da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).



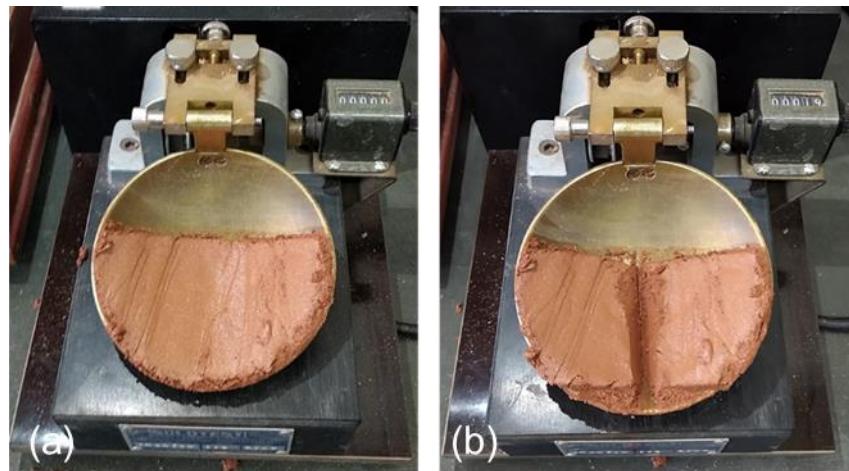
Fonte: Autor (2019).

### 3.2 CARACTERIZAÇÕES FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO

Os procedimentos adotados para as caracterizações física e mecânica do solo seguiram as prescrições normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou outro órgão de normatização de ensaios em solos. Destacam-se os ensaios realizados para a caracterização física, acompanhados das respectivas normas utilizadas para seus procedimentos:

- Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457/2016);
- Solo - Análise granulométrica (NBR 7181/2018);
- Teor de Umidade (Anexo NBR 6457);
- Solo - Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016), representado pela Figura 13;

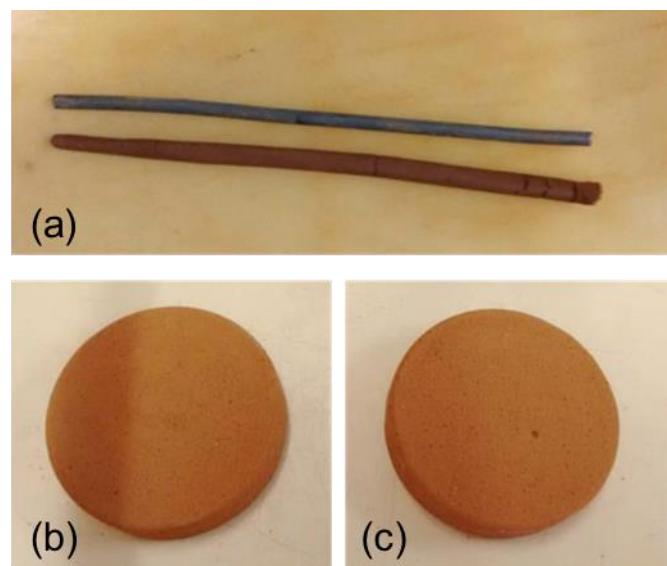
Figura 13: Limite de Liquidez – Aparelho de Casagrande (solo): antes (a) e após (b) a execução do ensaio.



Fonte: Autor (2019).

- Solo - Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/2016), com execução apresentada na Figura 14;
- Determinação do limite e relação de contração de solos (ASTM 4943/2018), com pastilhas apresentadas na Figura 14;

Figura 14: Solo – determinação do limite de plasticidade (a) e pastilhas obtidas na determinação do limite de contração (b e c).



Fonte: Autor (2019).

- Determinação da Massa Específica dos grãos (NBR 6458/2016).

Os ensaios mecânicos a seguir constam também nos procedimentos realizados com o solo puro: compactação do tipo Proctor normal, determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e da expansão do solo, e adensamento unidimensional com o objetivo de obter o coeficiente de permeabilidade do solo. As normas que regem os procedimentos adotados são:

- Solo - Ensaio de compactação (NBR 7182/2016);
- Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio (NBR 9895/2017);
- Solo - Ensaio de adensamento unidimensional (NBR 16853/2020).

### 3.3 ESTUDO DO RSU COMPOSTADO

O resíduo sólido urbano utilizado nesta pesquisa é resultado do processo de compostagem aeróbia realizado pela COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana). O material foi produzido na Usina de Tratamento e Transbordo do Caju, situado a cidade do Rio de Janeiro (RJ), sendo coletado dia 12/09/2019 através do uso de quatro bombonas de 50 litros para o transporte até a cidade de Juiz de Fora (MG). Após o processo de transporte, o RSU compostado foi armazenado na sala de acondicionamento e preparação de amostras do laboratório de Mecânica dos Solos da UFJF. A Figura 15 mostra o material separado para a realização da coleta.

Figura 15: RSU compostado coletado na Usina do Caju.



Fonte: Autor (2019).

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO RSU COMPOSTADO

Os procedimentos adotados para a caracterização deste material seguiram as prescrições normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou outro órgão de normatização de ensaios em solos, podendo haver algumas modificações no procedimento devido ao RSU compostado de fato não ser um solo. Destacam-se os ensaios para a caracterização física realizados, acompanhados das respectivas normas utilizadas para seus procedimentos:

- Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457/2016);
- Teor de Umidade (Anexo NBR 6457);
- Solo - Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016; BS 1377-7/1990);
- Solo - Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/2016);
- Determinação do limite e relação de contração de solos (ASTM D4943/2018);
- Determinação da Massa Específica dos grãos (NBR 6458/2016).

A Figura 16 mostra o aspecto do RSU compostado após peneiramento na malha nº10 (2.0 mm). O material passante por esta peneira está indicado na bandeja inferior, devendo ainda ser passado na peneira nº40 (0.425 mm) para a realização dos ensaios que visam obter os limites de consistência. Na bandeja superior encontra-se o material retido pela peneira, sendo válido destacar sua heterogeneidade – foram encontrados resíduos como frações de galhos de plantas e também pedaços de plástico e vidro.

Figura 16: RSU compostado após passagem na peneira nº10 (2.0 mm): fração retida (a) e fração passante (b).



Fonte: Autor (2019).

A determinação da granulometria deste material foi realizada com alteração ao procedimento prescrito pela NBR 7181/2018 (Solo - Análise granulométrica) devido ao fato desta norma não regulamentar o ensaio granulométrico para compostos orgânicos. Ademais, a parte do processo de análise granulométrica referente à sedimentação apresentava incertezas, pois parte do material poderia ter densidade próxima ou inferior a densidade da solução utilizada. Como resultado do procedimento adotado, não foi possível identificar a fração correspondente ao diâmetro especificado para a fração argila (menor que 0,002 mm).

Tendo em vista o exposto, para a análise granulométrica do RSU compostado duas metodologias foram adotadas:

- a) O ensaio efetuado seguindo as prescrições expressas na NBR 7181/2018;
- b) O peneiramento grosso e peneiramento fino do material seco ao ar, sendo que não foi realizado ensaio de sedimentação no material passante na #200 (0.075 mm), pois parte do material possui peso específico menor que 1,0gf/cm<sup>3</sup>, não permitindo assim a sedimentação

Cabe destacar que o material retido na peneira nº 200, após o ensaio de sedimentação, necessitou de um novo destorramento antes de passar pelo peneiramento. Isto se deve ao fato de que, ao secar na estufa (60°C), o RSU compostado assumiu um aspecto semelhante a um emaranhado de partículas, com formação de placas que não passariam pelas peneiras. Este aspecto mencionado é mostrado na Figura 17.

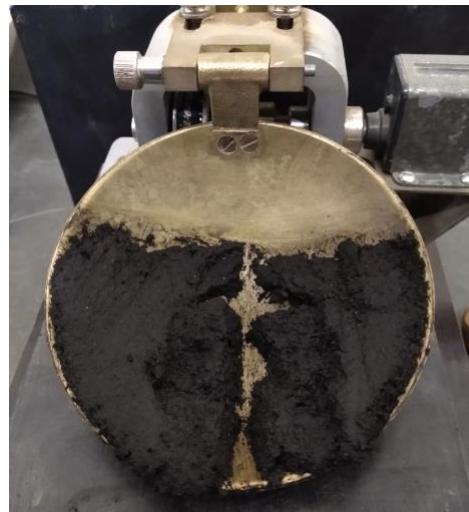
Figura 17: RSU compostado retido na peneira nº 200 após secagem em estufa.



Fonte: Autor (2019).

A realização do ensaio para determinação do limite de liquidez do RSU compostado não se mostrou possível segundo procedimento estabelecido pela NBR 6459. As tentativas de abertura da ranhura na concha do aparelho de Casagrande não permitiram que se obtivesse resultado satisfatório, não apresentando aspecto uniforme e fazendo com que o material se desprendesse da concha conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18: Limite de Liquidez – Aparelho de Casagrande (RSU compostado).



Fonte: Autor (2019).

Com o objetivo de se obter o parâmetro do limite de liquidez, utilizou-se então o procedimento especificado pela BS 1377-7/1990 com o ensaio realizado através do cone de penetração. O valor procurado é expresso pelo teor de umidade correspondente a penetração de 20 mm do cone na cápsula contendo o RSU compostado.

O procedimento utilizado para se determinar a massa específica dos grãos do RSU compostado precisou ter algumas características alteradas em relação a NBR 6508. O picnômetro utilizado foi o modelo de pescoço longo devido ao fato de que partículas do RSU compostado menos densas que a água estavam obstruindo o orifício da tampa do picnômetro convencional. A Figura 19 mostra com detalhe a obstrução mencionada.

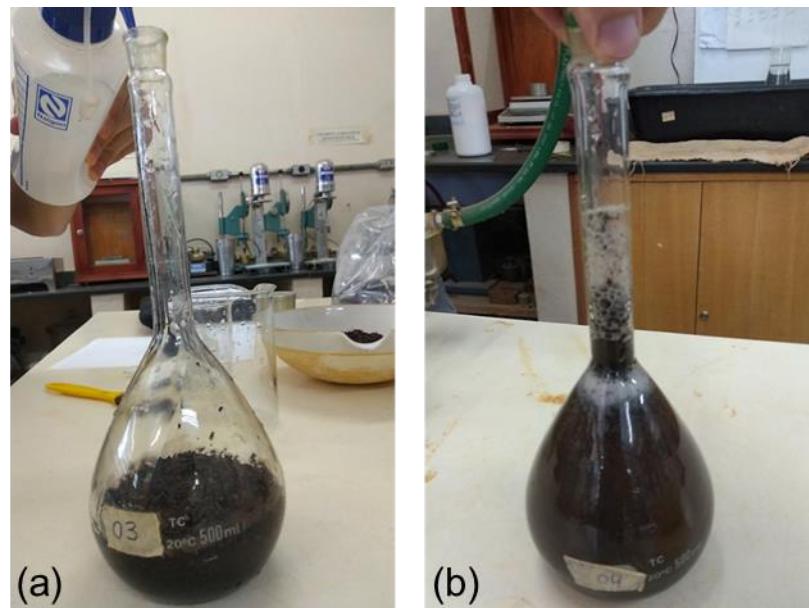
Figura 19: Obstrução na tampa do picnômetro.



Fonte: Autor (2019).

O processo de saturação do RSU compostado foi realizado no interior do picnômetro. O material não conseguia ser inserido no picnômetro e agarrava em seu pescoço caso já estivesse saturado. Também foi necessária a aplicação de três ciclos de retirada de ar na bomba de vácuo (dois ciclos de vinte minutos e um ciclo de quinze minutos) para possibilitar que o ar incorporado fosse suficientemente eliminado. A Figura 20 apresenta os processos de saturação e retirada de ar realizados.

Figura 20: Processo de saturação (a) e retirada de ar (b).



Fonte: Autor (2019).

Obviamente, os ensaios de compactação do tipo Proctor normal, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão não estão previstos para serem realizados com o RSU compostado puro, bem como a determinação da permeabilidade utilizando o ensaio de adensamento edométrico.

### 3.5 ESTUDO DA MISTURA SOLO-RSU COMPOSTADO

Os procedimentos adotados para a caracterização das misturas entre solo e RSU compostado seguiram as prescrições normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com variações quando houve necessidade, devido ao RSU compostado não ser de fato um tipo de solo. Destacam-se os ensaios realizados, acompanhados das respectivas normas utilizadas para seus procedimentos:

- Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457/2016);
- Teor de Umidade (Anexo NBR 6457/2016);
- Solo - Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016; BS 1377-7/1990);
- Solo - Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/2016);
- Determinação do limite e relação de contração de solos (ASTM D4943/2018);
- Determinação da Massa Específica dos grãos (NBR 6458/2016).

O processo de determinação da massa específica dos grãos para cada teor de mistura foi realizado através de ponderação entre as massas específicas dos grãos de cada material em separado e o percentual de mistura realizado para cada um dos teores utilizados.

A análise granulométrica para as misturas solo-RSU compostado não foi prevista, pois a curva granulométrica não permitiu verificar a quantidade relativa de cada material (solo ou RSU compostado) para um dado valor de porcentagem passante, por exemplo. As curvas granulométricas para as misturas solo-RSU compostado, de maneira análoga ao realizado para a massa específica dos grãos, foram estimadas através de ponderação utilizando as curvas dos materiais em separado e o percentual

de mistura realizado em cada teor proposto. O processo de cálculo deu-se através da manipulação de planilha eletrônica para elaboração de projetos de misturas asfálticas utilizada no laboratório de pavimentação da UFJF. Estas curvas tiveram o objetivo de demonstrar a maneira com que o acréscimo de um teor de RSU compostado tendeu a alterar a granulometria original do solo puro utilizado.

De maneira análoga ao considerado para a caracterização física e propriedades mecânicas do solo, os ensaios de compactação do tipo Proctor normal, determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e de expansão, e o adensamento unidimensional para determinação do coeficiente de permeabilidade foram previstos para as misturas solo-RSU compostado. A seguir estão listadas as normas que regem os procedimentos adotados.

- Solo - Ensaio de compactação (NBR 7182/2016);
- Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio (NBR 9895/2017).
- Solo - Ensaio de adensamento unidimensional (NBR 16853/2020).

As misturas entre solo e RSU compostado foram feitas segundo uma proporção específica, em peso, entre ambos. O teor da mistura solo-RSU compostado ( $T_m$ ) partiu de uma concentração de 2,5% (em peso) de material em relação ao peso de solo, havendo incrementos até atingir o teor de 12,5%. As misturas realizadas foram: 2,5%, 5,0%, 7,5%, 12,5% e 17,5% em peso de RSU compostado em relação ao peso de solo.

A preparação da mistura seguiu o procedimento previsto pela NBR 6457, conforme informado anteriormente. Cabe destacar que tanto o solo quanto o RSU compostado foram previamente secos em estufa, não sendo necessário considerar a presença da parcela higroscópica e da camada de água adsorvida referentes ao teor de umidade para cada mistura. O solo foi seco a temperatura de 100°C, enquanto o RSU compostado foi seco a temperatura de 60°C.

O sistema obtido da mistura resultou nas seguintes frações, em peso, a saber: peso de ar (devendo ser desconsiderado), peso de RSU compostado seco ( $P_c$ ) e peso de solo seco ( $P_s$ ). A parcela associada ao peso de água inicial, que compreende a

quantidade de água referente a umidade higroscópica presente tanto no solo quanto no RSU compostado, não foi considerada por haver secagem prévia em estufa.

O teor relativo de peso de RSU compostado em relação ao peso total de partículas sólidas fica determinado, segundo a equação 1:

$$Tm = \frac{Pc}{Pt} \quad (1)$$

Em que:

$Tm$  = Teor da mistura solo-RSU compostado;

$Pc$  = Peso de RSU compostado seco;

$Pt$  = Peso total de partículas sólidas.

Assim, observando que o peso total de partículas sólidas ( $Pt$ ) pode ser expresso como a soma das parcelas referentes ao peso de RSU compostado seco ( $Pc$ ) e peso de solo seco ( $Ps$ ), temos como desdobramento a equação 2.

$$Tm = \frac{Pc}{Pc + Ps} \quad (2)$$

Portanto, para solo e RSU compostado secos ao ar, o peso de RSU compostado a ser utilizado foi escrito em função do peso de solo seco ( $Ps$ ) e do teor de mistura ( $Tm$ ) desejado. O resultado é indicado na equação 3.

$$Pc = \frac{Tm \times Ps}{1 - Tm} \quad (3)$$

Em que:

$Pc$  = Peso de RSU compostado seco;

$Tm$  = Teor da mistura solo-RSU compostado;

$Ps$  = Peso de solo seco.

Determinados os pesos dos materiais a serem utilizados, seguiu-se com a mistura e homogeneização do material. Um quarteador também foi utilizado para dividir o material já misturado.

O processo de adição de água para se atingir o teor de umidade ( $tw$ ) desejado para um determinado ponto do ensaio de compactação determinará o peso de água que a mistura deverá conter ( $Pw$ ). Inicialmente, essa relação está expressa em relação ao peso total de partículas sólidas segundo a equação 4. De maneira análoga ao procedimento para a determinação do teor das misturas, o peso total de partículas sólidas foi escrito como sendo o somatório do peso de RSU compostado seco e do peso de solo seco. Como resultado, obteve-se a equação 5.

$$tw = \frac{Pw}{Pt} \quad (4)$$

$$tw = \frac{Pw}{Pc + Ps} \quad (5)$$

Em que:

$T_w$  = Teor de umidade da mistura solo-RSU compostado;

$P_w$  = Peso de água que a mistura deve conter;

$P_t$  = Peso total de partículas sólidas.

$P_c$  = Peso de RSU compostado seco;

$P_s$  = Peso de solo seco.

O peso de água que a mistura deve conter e que, por consequência, foi adicionado fica expresso na equação 6. Explicitou-se, portanto, a variável alvo deste cálculo.

$$Pw = tw \times (Pc + Ps) \quad (6)$$

Em que:

$P_w$  = Peso de água que a mistura deve conter;

$T_w$  = Teor de umidade da mistura solo-RSU compostado;

$P_c$  = Peso de RSU compostado seco;

$P_s$  = Peso de solo seco.

Realizada então a mistura, o sistema solo-RSU compostado-água seguiu com o processo de homogeneização, sendo deixado em repouso em um saco plástico fechado por 24 horas (segundo a NBR 7182/2016). Este procedimento realizado teve o objetivo de equalizar o teor de umidade final da mistura, teor que deverá ser verificado segundo o ensaio prescrito no anexo da NBR 6457/2016.

Após transcorrida a metodologia descrita, foram realizados os ensaios de compactação, expansão, ISC e adensamento unidirecional seguindo as prescrições especificadas pela ABNT para cada um destes ensaios.

Os resultados para os parâmetros obtidos através dos ensaios realizados foram comparados com as prescrições normativas existentes para a utilização da mistura como camada de cobertura de aterro sanitário (objetivo principal), em outras aplicações como base e sub-base de pavimentação e também como corpo de aterro compactado.

A comparação realizada indicará, portanto, se a mistura terá características adequadas que indiquem o seu potencial de uso nas aplicações geotécnicas citadas. Também será possível perceber até qual determinado teor de RSU compostado poderá ser utilizado na mistura de forma a atender a uma das aplicações estudadas.

### 3.6 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE ENSAIOS

A seguir, apresenta-se o programa de ensaios realizados neste trabalho. As tabelas elaboradas se encontram organizadas da seguinte maneira:

- Tabela 5: ensaios realizados com o solo puro;
- Tabela 6: ensaios para o RSU compostado puro;
- Tabelas 7: ensaios para as misturas solo-RSU compostado, em diferentes teores;

Tabela 5: Programa de ensaios. Material: solo puro.

Código do ensaio	Quantidade	Procedência do solo	Ensaio
SP_AG	1	ProInfra (UFJF)	Solo - Análise granulométrica (NBR 7181/2016)
SP_UM	1	ProInfra (UFJF)	Teor de Umidade natural (Anexo A - NBR 6457)
SP_LL_CS SP_LL_FCT	6	ProInfra (UFJF)	Solo - Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016; BS 1377-7/1990)
SP_LP	3	ProInfra (UFJF)	Solo - Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/2016)
SP_LC	3	ProInfra (UFJF)	Determinação do limite e relação de contração de solos (ASTM D4943/2018)
SP_ME	3	ProInfra (UFJF)	Determinação da massa específica dos grãos (NBR 6458/2016)
SP_COMP	5	ProInfra (UFJF)	Solo - Ensaio de compactação (NBR 7182/2016) – Proctor Normal
SP_ISC	5	ProInfra (UFJF)	Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio (NBR 9895/2017)
SP_EXP	5	ProInfra (UFJF)	Solo – Determinação da expansão - Método de ensaio (NBR 9895/2017)
SP_PE	1	ProInfra (UFJF)	Solo – Ensaio de adensamento unidimensional (NBR 16853/2020)

Fonte: Autor (2020).

Nota: SP = solo puro; AG = análise granulométrica; UM = teor de umidade; LL = limite de liquidez; CS = método de Casagrande; FCT = Falling Cone Test (Cone de Penetração); LP = limite de plasticidade; LC = limite de contração; ME = massa específica dos grãos; COMP = compactação; ISC = Índice de Suporte Califórnia; EXP = expansão PE = permeabilidade; SP\_LL\_CS = limite de liquidez pelo método de Casagrande; SP\_LL\_FCT = limite de liquidez pelo método do Falling Cone Test.

Tabela 6: Programa de ensaios. Material: RSU compostado puro.

Código do ensaio	Quantidade	Procedência do solo	Ensaio
CO_AG	1	ProInfra (UFJF)	Solo - Análise granulométrica (NBR 7181/2016)
CO_AGL	1	ProInfra (UFJF)	Análise granulométrica realizada após peneiramento grosso e peneiramento fino do material seco ao ar. Material passante na peneira nº 200 (0.075 mm) - análise utilizando um granulômetro a laser. Nota: este ensaio estava programado, porém não chegou a ser executado devido a pandemia.
CO_UM	3	ProInfra (UFJF)	Teor de Umidade (Anexo A - NBR 6457)
CO_LL_CS CO_LL_FCT	3	ProInfra (UFJF)	Solo - Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016; BS 1377-7/1990)
CO_LP	3	ProInfra (UFJF)	Solo - Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/2016)
CO_LC	3	ProInfra (UFJF)	Determinação do limite e relação de contração de solos (ASTM D4943/2018)
CO_ME	3	ProInfra (UFJF)	Determinação da massa específica dos grãos (NBR 6458/2016)

Fonte: Autor (2019).

Nota: CO = RSU compostado; AG = análise granulométrica; AGL = análise granulométrica – granulômetro a laser; UM = teor de umidade; LL = limite de liquidez; CS = método de Casagrande; FCT = Falling Cone Test (Cone de Penetração); LP = limite de plasticidade; LC = limite de contração; ME = massa específica dos grãos; CO\_LL\_CS = limite de liquidez pelo método de Casagrande; CO\_LL\_FCT = limite de liquidez pelo método do Falling Cone Test.

Tabela 7: Programa de ensaios. Material: solo-RSU compostado, teores de composto de 2,5%, 5,0%, 7,5%, 12,5% e 17,5%.

<b>Código do ensaio</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Procedência do solo</b>	<b>Ensaio</b>
SR_UM_ X,X%	15	ProInfra (UFJF)	Teor de Umidade (Anexo A - NBR 6457)
SR_LL_CS X,X % SR_LL_FCT_ X,X%	30	ProInfra (UFJF)	Solo - Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016; BS 1377-7/1990)
SR_LP_ X,X%	15	ProInfra (UFJF)	Solo - Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/2016)
SR_LC_ X,X%	15	ProInfra (UFJF)	Determinação do limite e relação de contração de solos (ASTM 4943)
SR_COMP_ X,X%	25	ProInfra (UFJF)	Solo - Ensaio de compactação (NBR 7182/2016) - Proctor Normal
SR_ISC_X,X%	25	ProInfra (UFJF)	Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio (NBR 9895/2017)
SR_EXP_X,X%	25	ProInfra (UFJF)	Solo – Determinação da expansão - Método de ensaio (NBR 9895/2017)
SR_PE_X.X%	5	ProInfra (UFJF)	Solo – Ensaio de adensamento unidimensional (NBR 16853/2020)

Fonte: Autor (2019).

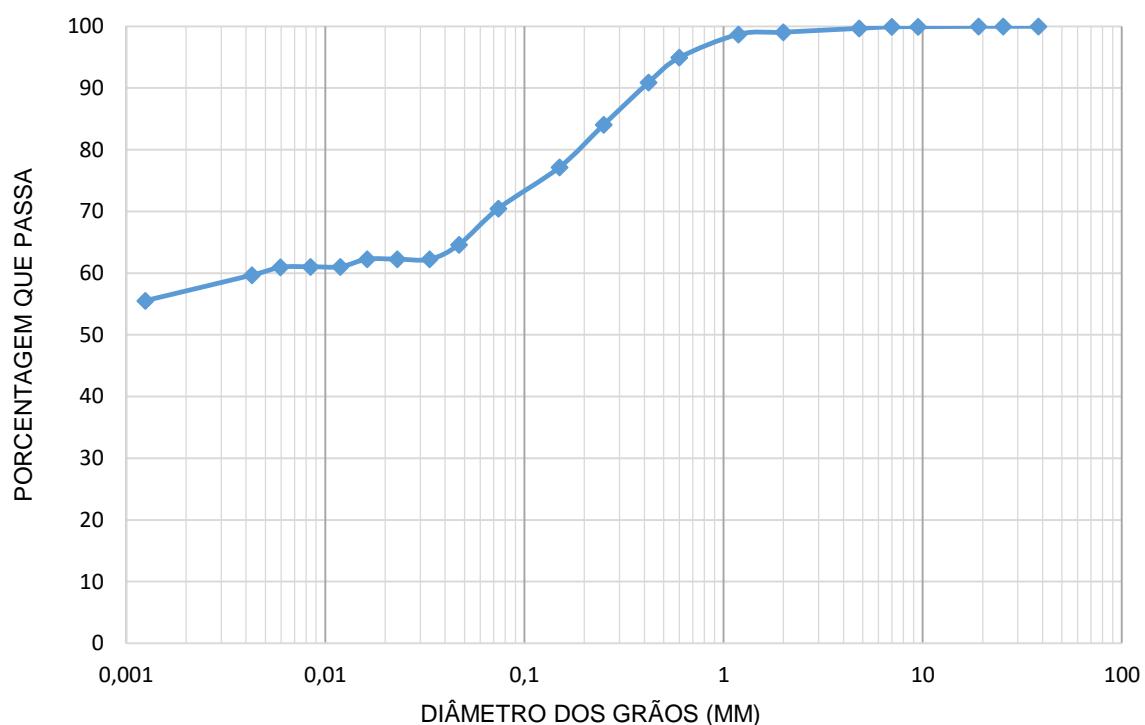
Nota: SR = mistura solo-RSU compostado; X,X% = teores de RSU compostado na mistura; UM = teor de umidade; LL = limite de liquidez; CS = método de Casagrande; FCT = Falling Cone Test (Cone de Penetração); LP = limite de plasticidade; LC = limite de contração; ME = massa específica dos grãos; COMP = compactação; ISC = Índice de Suporte Califórnia; EXP = expansão; PE = permeabilidade.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 ENSAIOS COM O SOLO PURO

O ensaio SP\_AG, realizado para a análise granulométrica do solo puro segundo a NBR 7181, teve como resultado a seguinte distribuição representada no Gráfico 3: 57,1% dos grãos correspondente a fração argila, 8,4% a fração silte, 33,6% a fração areia (divididos em 15,6% de areia fina, 13,9% média e 4,1% grossa) e 0,9% a fração pedregulho.

Gráfico 3: Curva granulométrica para o solo puro.



Fonte: Autor (2019).

A análise do teor de umidade segundo o ensaio SP UM e obtida para o solo em questão apontou um valor de 8,20%.

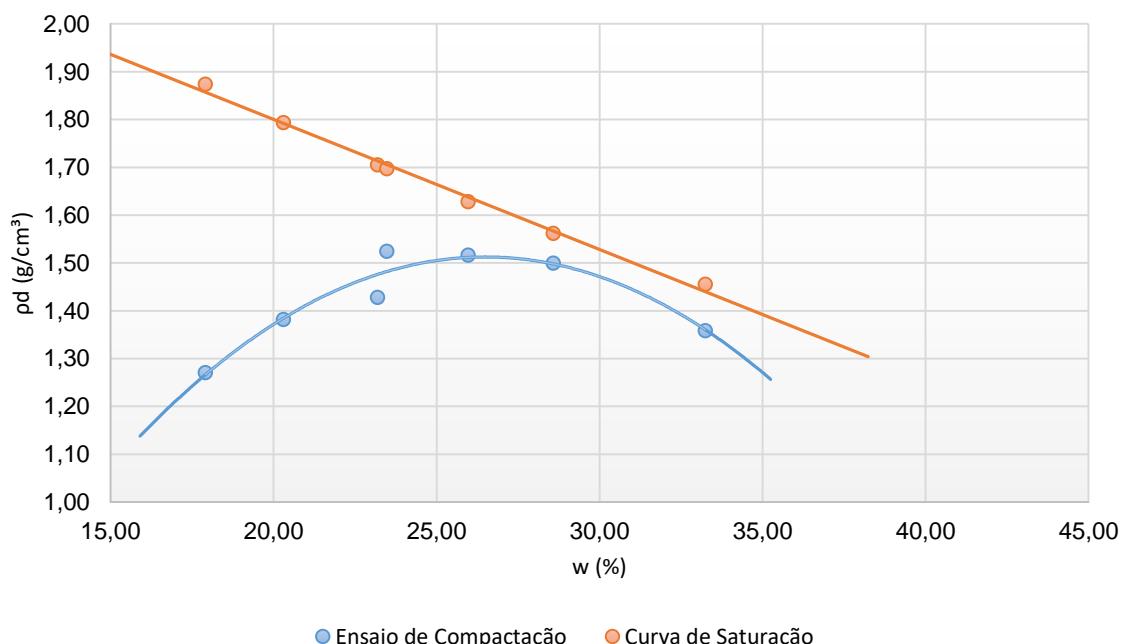
O ensaio para determinação do limite de contração do solo, realizado através do ensaio SP\_LC, encontrou para este parâmetro o valor de 27%. Para o limite de plasticidade, o ensaio SP\_LP apontou um resultado de 29%. A determinação do limite

de liquidez realizada pelo ensaio SP\_LL\_CS e revelou como valor encontrado 52%, enquanto o resultado para o ensaio SP\_LL\_FCT obteve o resultado de 32%.

O procedimento do ensaio SP\_ME para determinação da massa específica dos grãos apontou um valor obtido igual a 2,81 g/cm<sup>3</sup>.

No Gráfico 4 (SP\_COMP) se observa que a massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ) obtida para o solo puro foi de 1,54 g/cm<sup>3</sup> (15,4 kN/m<sup>3</sup> em termos de peso específico) para uma umidade ótima de 26,8%.

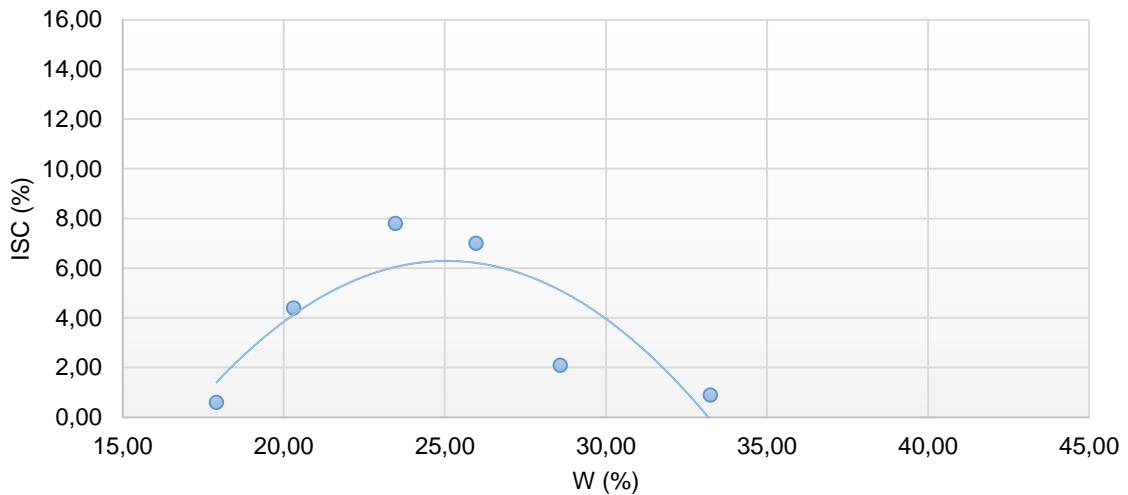
Gráfico 4: Curva de compactação (SP\_COMP) e curva de saturação – solo puro.



Fonte: Autor (2020).

Observa-se que os resultados do Gráfico 5 (SP\_ISC) mostram que para uma umidade ótima de 26,8%, o ISC igual a 6,0% atendendo ao preconizado por DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

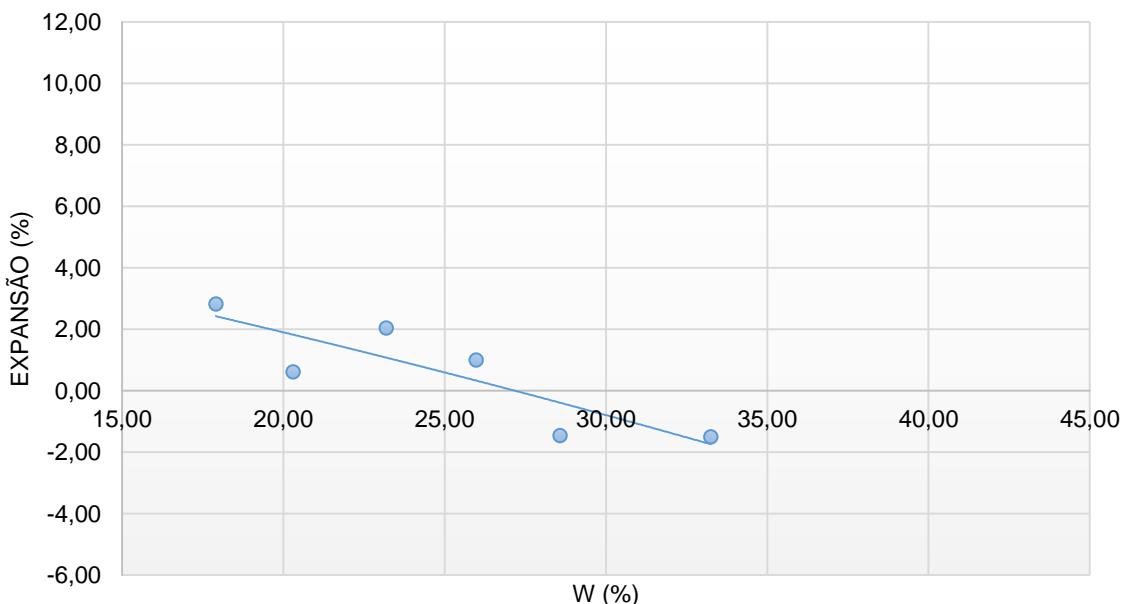
Gráfico 5: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SP\_ISC) – solo puro.



Fonte: Autor (2020).

O resultado expresso pelo Gráfico 6 para o ensaio de expansão (SP\_EXP) indica que, sendo compactado na umidade ótima de 26,8%, o solo apresentará expansão de 0,1%. Expansão menor que 4% atende ao preconizado por DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

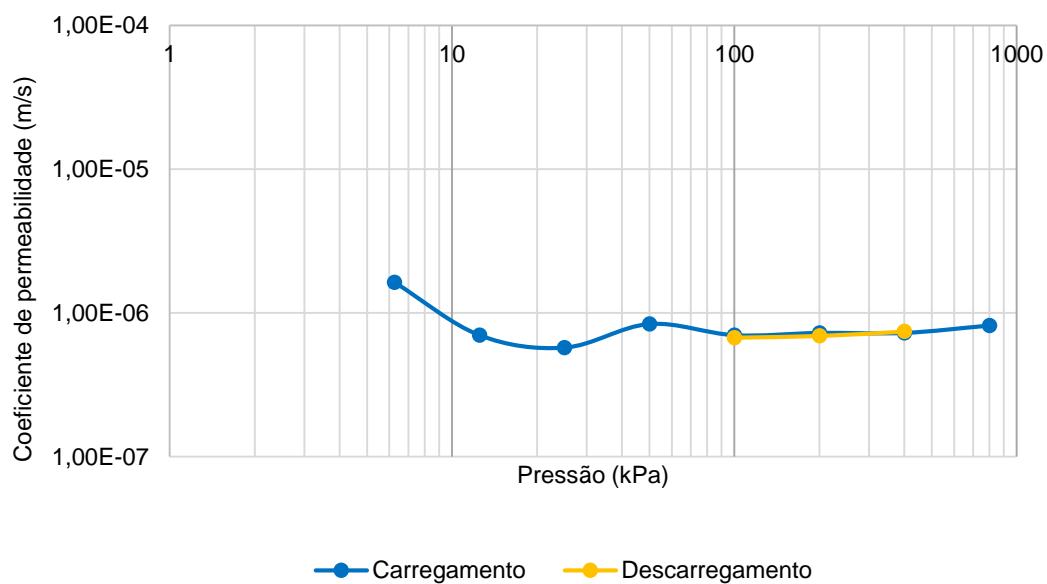
Gráfico 6: Ensaio de Expansão – solo puro.



Fonte: Autor (2020).

O procedimento realizado através do ensaio SP<sub>PE</sub> e com resultados expressos pelo Gráfico 7 obteve, para os diferentes níveis de pressão avaliados, valor para a permeabilidade na ordem de  $10^{-7}$  m/s. Esse valor encontra-se próximo ao valor dito como desejável pela NBR13896/1997, que recomenda valores inferiores a  $10^{-8}$  m/s para cobertura de aterros sanitários.

Gráfico 7: Ensaio de Permeabilidade (SP<sub>PE</sub>) – solo puro.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 8 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para a análise do solo puro. Trata-se de um solo residual com características que permitem que este solo seja utilizado em aterros compactados conforme preconizado por DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) e com permeabilidade próxima ao desejável pela NBR13896/1997 para cobertura de aterros sanitários.

Tabela 8: Resultados dos ensaios – solo puro.

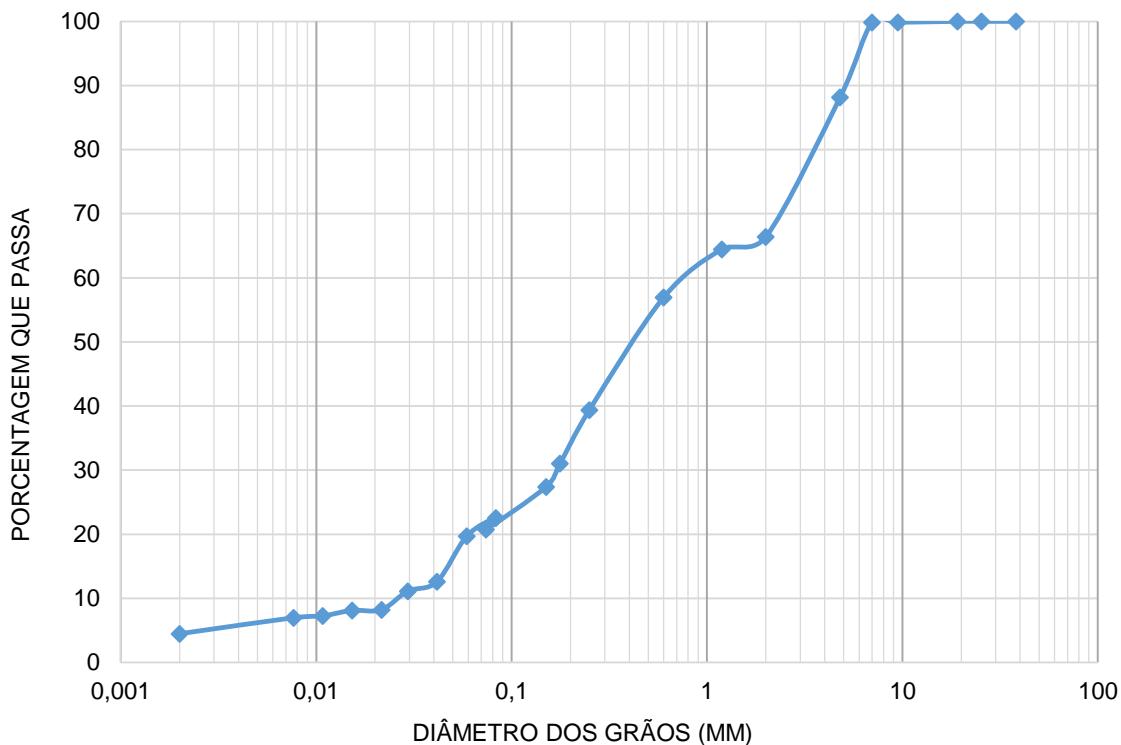
<b>Código do ensaio</b>	<b>Resultado do Ensaio</b>
SP_AG	LL – Casagrande: CH LL – FCT: ML
SP_UM	8,2%
SP_LL_CS	52,0%
SP_LL_FCT	32,0%
SP_LP	29,0%
SP_LC	27,0%
SP_ME	2,81 g/cm <sup>3</sup>
SP_COMP	$\rho_d = 1,54$ g/cm <sup>3</sup> Umidade ótima = 26,8%
SP_ISC	6,0%
SP_EXP	0,1%
SP_PE	10 <sup>-7</sup> m/s

Fonte: Autor (2020).

#### 4.2 ENSAIOS COM O RSU COMPOSTADO PURO

A análise granulométrica realizada no ensaio CO\_AG, segundo a metodologia da NBR 7181, revelou uma curva representada no Gráfico 8. Foi observado que 33,6% do material apresentou granulometria semelhante a fração pedregulho, 46,5% semelhante a areia (9,5% para a fração grossa, 23,2% para a fração média e 13,8% para a fração fina) e 19,9% semelhante a silte.

Gráfico 8: Curva granulométrica para o RSU compostado puro.



Fonte: Autor (2019).

Como resultado do procedimento adotado, não foi possível identificar a fração correspondente ao diâmetro especificado para a fração argila (menor que 0,002 mm). Este fato pode ser associado a questão de parte do material não sofrer sedimentação durante o período que está inserido na proveta para o ensaio.

O teor de umidade obtido para o RSU compostado, após realizado o ensaio CO\_UM, revelou um valor de 11,3%.

A realização do ensaio CO\_LL\_CS para determinação do limite de liquidez do RSU compostado não se mostrou possível segundo procedimento estabelecido pela NBR 6459. Assim, após a realização do ensaio CO\_LL\_FCT, foi encontrado o valor de 76%.

A determinação do limite de plasticidade realizada no ensaio CO\_LP mostrou-se como não sendo possível. Sendo assim, o RSU compostado apresenta uma característica não plástica. A Figura 1Figura 21 mostra as tentativas realizadas de se moldar um cilindro semelhante ao gabarito metálico, que não obtiveram o resultado necessário.

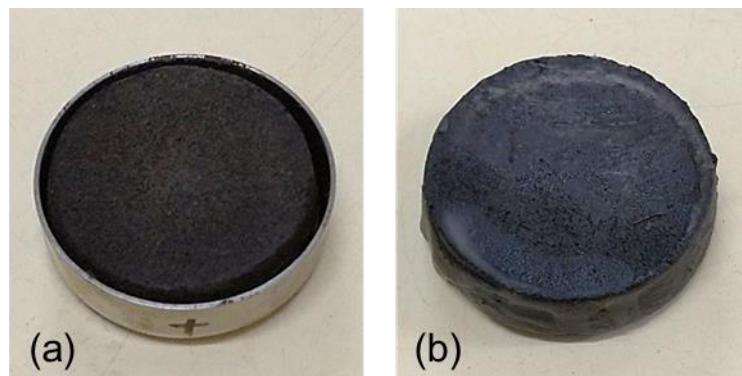
Figura 21: Ensaio de limite de plasticidade – RSU compostado.



Fonte: Autor (2019).

O procedimento realizado para o ensaio CO\_LC revelou um teor de umidade correspondente ao limite de contração de 72%. A Figura 22 apresenta a pastilha de contração obtida após secagem em estufa e também após ser recoberta por uma camada de parafina.

Figura 22: Pastilha utilizada para determinação do limite de contração – após secagem em estufa (a) e recobrimento em parafina (b).



Fonte: Autor (2019).

Após realização do ensaio CO\_ME, o valor encontrado para a massa específica dos grãos do RSU compostado foi de 1,75 g/cm<sup>3</sup>.

Os resultados obtidos para os ensaios realizados com o RSU compostado se encontram, de maneira sintética, exibidos na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados dos ensaios – RSU compostado.

<b>Código do ensaio</b>	<b>Resultado do Ensaio</b>
CO_AG	Não foi possível classificar
CO_UM	11,3%
CO_LL_CS	Não foi possível realizar
CO_LL_FCT	76,0%
CO_LP	Não plástico
CO_LC	72,0%
CO_ME	1,75 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2020).

Após realizadas as considerações acerca das propriedades dos materiais de forma isolada, apresentam-se a seguir os resultados para as misturas realizadas entre solo e RSU-compostado.

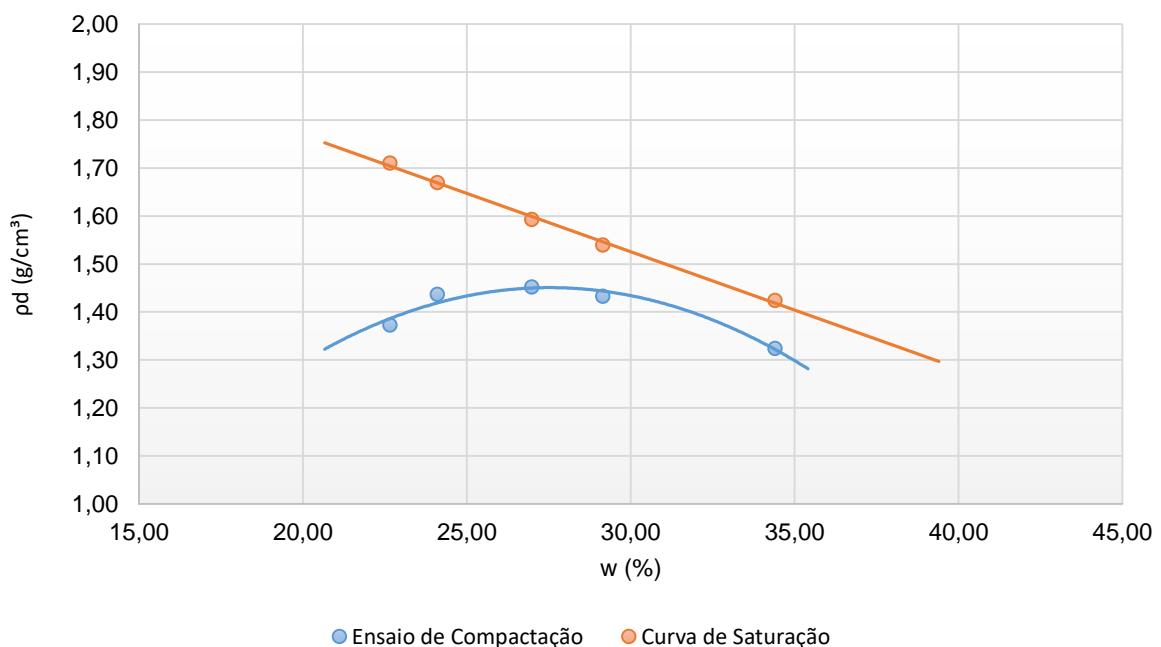
#### 4.3 MISTURA SOLO-RSU COMPOSTADO – 2,5%

O teor inicial escolhido para a análise da mistura realizada foi de 2,5% (em peso) de RSU-compostado em relação ao peso de solo.

O limite de contração determinado para o material resultante da mistura entre solo e RSU-compostado através do ensaio SR\_LC\_2,5% apontou o valor de 25%. O limite de plasticidade analisado pelo ensaio SR\_LP\_2,5% obteve como resultado para o procedimento o valor de 31%. A determinação do limite de liquidez, realizado através do método de Casagrande (ensaio SR\_LL\_CS 2,5%) encontrou como resultado para o parâmetro o valor de 46%. Quando utilizado o cone de penetração (SR\_LL\_FCT 2,5%) o resultado obtido para o limite de liquidez foi 35%.

O Gráfico 9 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de compactação (SR\_COMP\_2,5%). A partir da análise realizada é possível encontrar, para a mistura em questão, massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ) de  $1,49 \text{ g/cm}^3$  em uma umidade ótima de 28,0%.

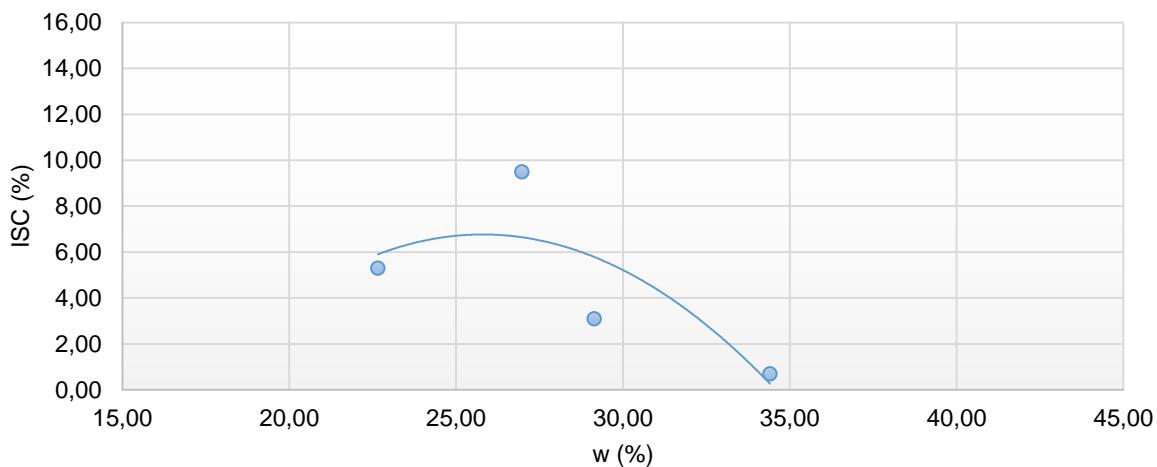
Gráfico 9: Curva de compactação (SR\_COMP\_2,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 2,5%.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados apresentados no Gráfico 10 para a análise do índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_2,5%) aponta, observando-se a umidade ótima de 28,0%, um ISC igual a 6,4%. O valor obtido atende ao estabelecido nas normativas DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

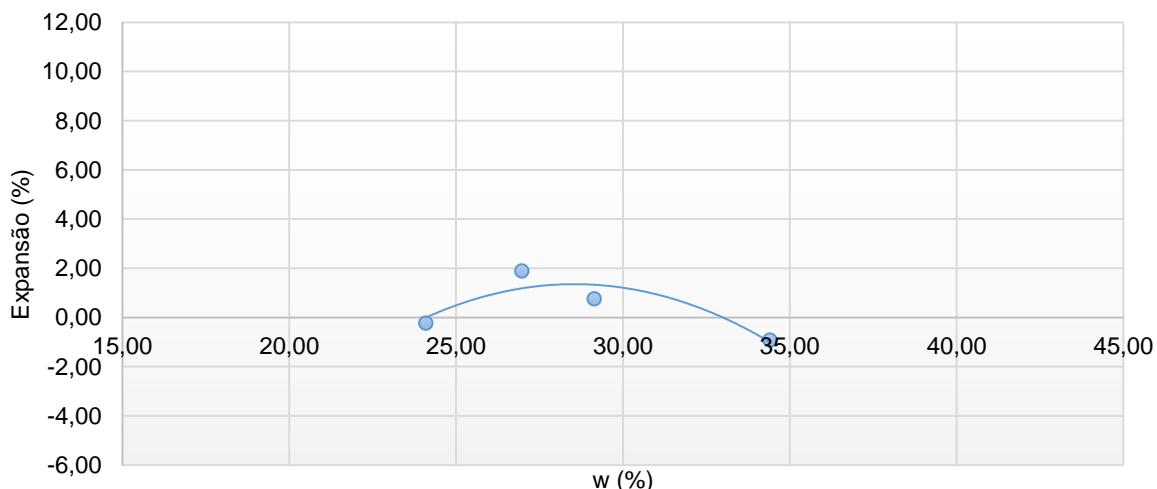
Gráfico 10: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_2,5%) – mistura solo-RSU compostado 2,5%.



Fonte: Autor (2020).

O ensaio de expansão realizado para a mistura solo-RSU compostado (SR\_EXP\_2,5%), cujo resultado encontra-se no Gráfico 11, apresenta resultado de 1,34% quando analisado em relação a umidade ótima. Sendo o resultado encontrado inferior a 4%, a mistura atende ao preconizado por DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

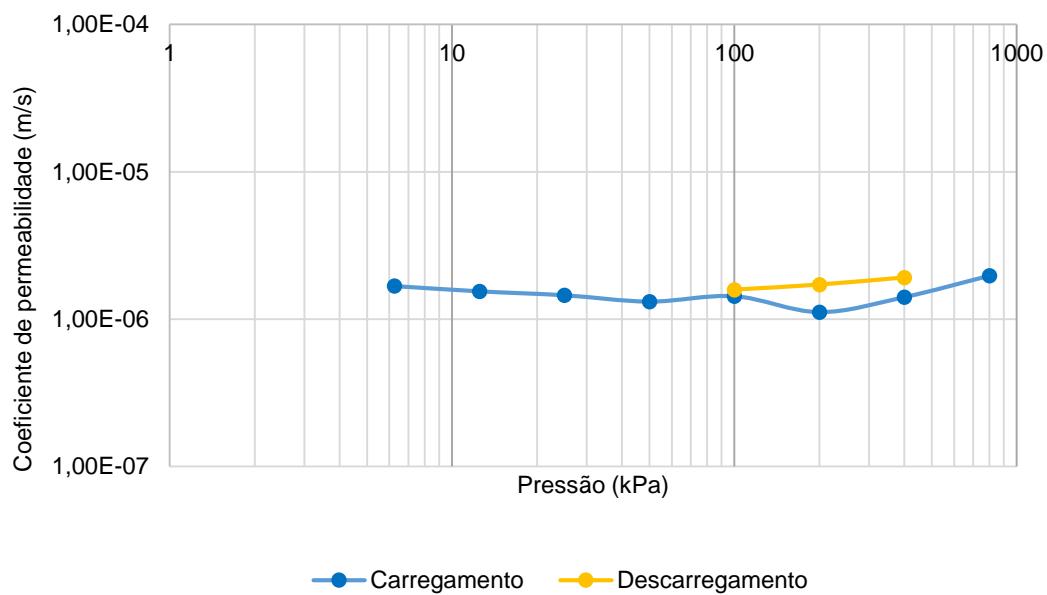
Gráfico 11: Ensaio de expansão (SR\_EXP\_2,5%) – mistura solo-RSU compostado 2,5%.



Fonte: Autor (2020).

O procedimento para a determinação da permeabilidade (ensaio SR\_PE\_2,5%) e com resultados expressos no Gráfico 12 revela, para os diferentes níveis de tensão vertical aplicados, permeabilidade da ordem de  $10^{-6}$  m/s. Esse valor apresenta um aumento em relação ao encontrado para o solo puro (situação inicial da ordem de  $10^{-7}$  m/s), sendo recomendado pela NBR13896/1997 valores inferiores a  $10^{-8}$  m/s.

Gráfico 12: Ensaio de Permeabilidade (SR\_PE\_2,5%) – mistura solo-RSU compostado 2,5%.



Fonte: Autor (2021).

Os resultados encontram-se, de maneira sintética, apresentados na Tabela 10 a seguir. É possível perceber que a mistura em questão pode ser utilizada como corpo de aterro compactado conforme os critérios estabelecidos pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A). No que diz respeito as considerações sobre permeabilidade o resultado se apresenta mais distante do indicado como ideal pela NBR13896/1997 para cobertura de aterros sanitários e também superior ao encontrado para a situação somente com solo puro, porém a viabilidade da utilização pode ser considerada em outros solos, visto que o solo puro já apresentou valor maior que o mínimo recomendado.

Tabela 10: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 2,5%.

Código do ensaio	Resultado do Ensaio
SR_LC_2,5%	25,0%
SR_LP_2,5%	31,0%
SR_LL_CS 2,5%	46,0%
SR_LL_FCT 2,5%	35,0%
SR_COMP_2,5%	$\rho_d = 1,49 \text{ g/cm}^3$ Umidade ótima = 28,0%
SR_ISC_2,5%	6,4%
SR_EXP_2,5%	1,34%
SR_PE_2,5%	$10^{-6} \text{ m/s}$

Fonte: Autor (2020).

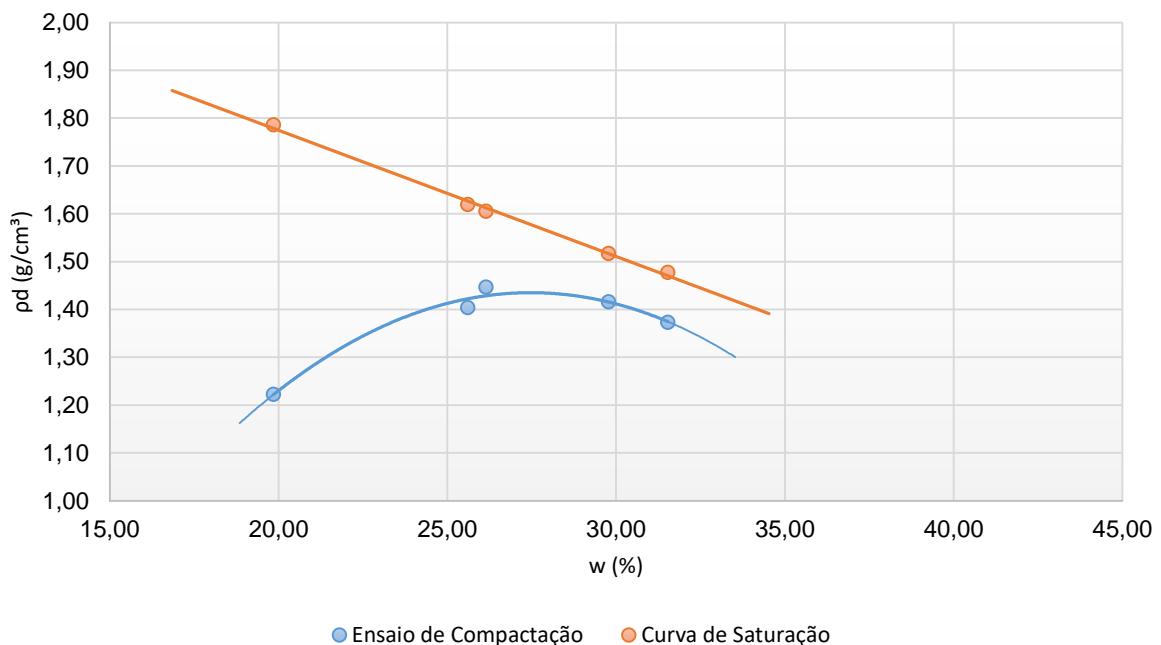
#### 4.4 MISTURA SOLO-RSU COMPOSTADO – 5,0%

O teor de RSU-compostado escolhido para a análise de uma nova proposta de mistura foi de 5,0% (em peso) de RSU-compostado em relação ao peso de solo.

O limite de contração encontrado a partir do ensaio SR\_LC\_5,0% indicou como resultado o valor de 23%. O limite de plasticidade obtido através do ensaio SR\_LP\_5,0% apontou para o procedimento o valor de 31%. O limite de liquidez, através do procedimento indicado pelo método de Casagrande (ensaio SR\_LL\_CS 5,0%) encontrou como resultado para o parâmetro o valor de 39%. No procedimento realizado utilizando o cone de penetração (SR\_LL\_FCT 5,0%) o resultado obtido para o limite de liquidez foi 32%.

Os dados presentes no Gráfico 13 apresentam os resultados obtidos para o ensaio de compactação (SR\_COMP\_5,0%). A análise dos dados permite encontrar, para a mistura em estudo, massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ) de  $1,41 \text{ g/cm}^3$  em uma umidade ótima de 27,2%.

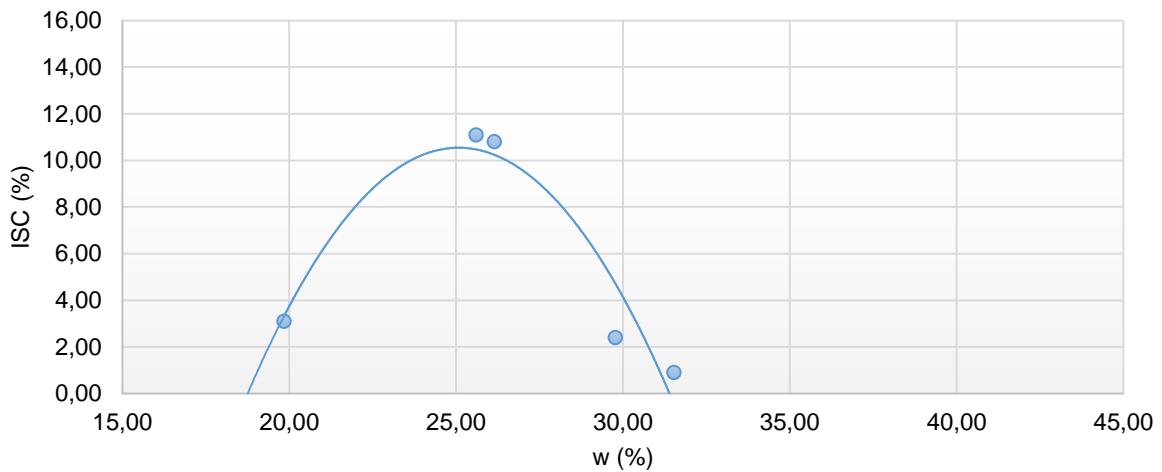
Gráfico 13: Curva de compactação (SR\_COMP\_5,0%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 5,0%.



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 14 apresenta os resultados utilizados para a análise do índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_5,0%). Observando-se a umidade ótima de 27,2%, os dados apontam para um ISC igual a 9,3%. O resultado obtido atende aos parâmetros estabelecidos pelas normativas DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

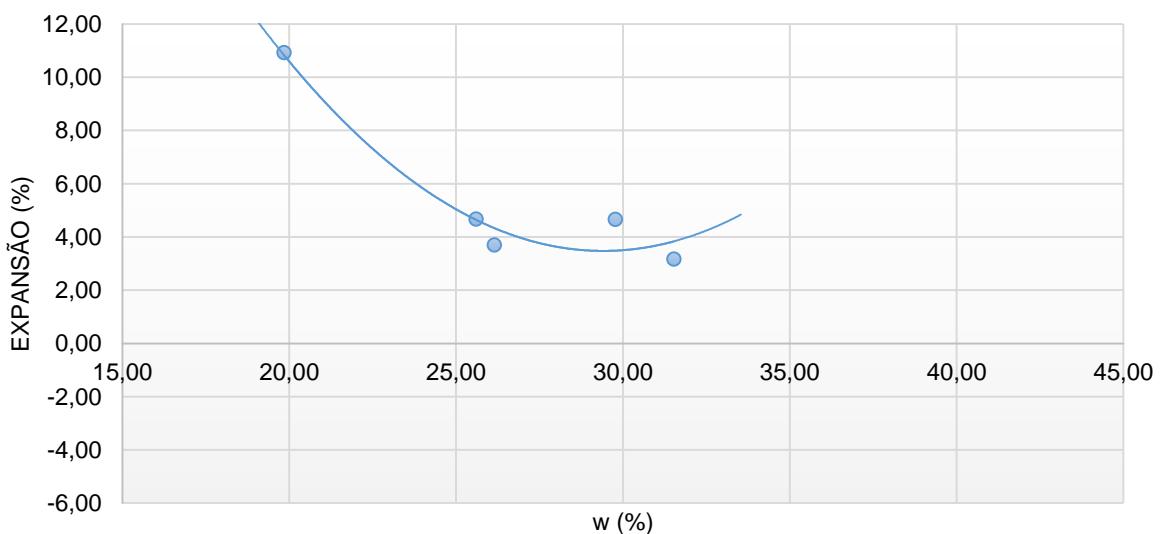
Gráfico 14: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_5,0%) – mistura solo-RSU compostado 5,0%.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados obtidos para o ensaio de expansão da mistura solo-RSU compostado (SR\_EXP\_5,0%) encontram-se exibidos no Gráfico 15, apresentando o valor de 3,87% quando analisado em relação a umidade ótima. Sendo o valor encontrado inferior a 4%, a mistura atende ao preconizado pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

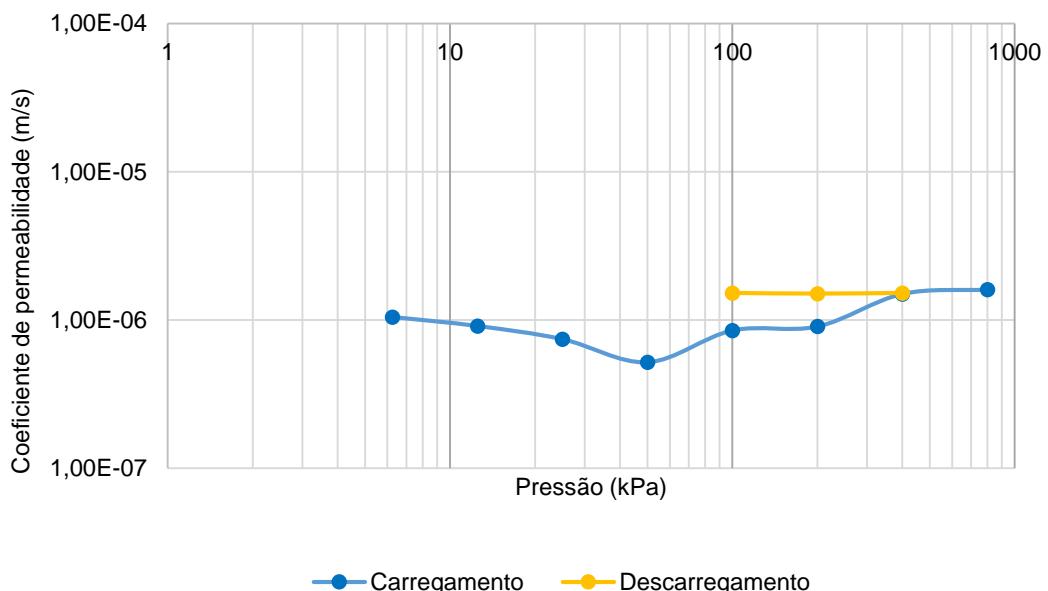
Gráfico 15: Ensaio de expansão (SR\_EXP\_5,0%) – mistura solo-RSU compostado 5,0%.



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 16 apresenta os resultados obtidos no processo para a determinação da permeabilidade da mistura realizada (ensaio SR\_PE\_5,0%). Os valores encontrados encontram-se na ordem de  $10^{-7}$  m/s quando as tensões atuantes atingem o patamar de até 200 kPa, apresentando valores próximos ao encontrado para o solo puro. As tensões superiores avaliadas (400 kPa e 800 kPa) revelam um aumento da permeabilidade para valores da ordem de  $10^{-6}$  m/s. A mistura solo-RSU compostado apresenta uma faixa de valores próxima ao considerado recomendado pela NBR13896/1997, porém ainda maior que o mínimo estabelecido. Mais uma vez a causa pode ser o próprio solo puro que por si só já apresenta um valor de  $10^{-7}$  m/s. Estes resultados sugerem que para a aplicação como cobertura de aterro sanitário deve-se buscar um solo com permeabilidade menor que o mínimo estabelecido que é  $10^{-8}$  m/s, para se ter uma maior segurança, já que o composto nesta proporção aumentou a permeabilidade.

Gráfico 16: Ensaio de Permeabilidade (SR\_PE\_5,0%) – mistura solo-RSU compostado 5,0%.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 11 apresenta de maneira resumida os resultados obtidos para os parâmetros ensaiados na mistura solo-RSU compostado com teor de 5,0%. A mistura em questão pode ser utilizada como corpo de aterro compactado conforme determinam os critérios estabelecidos pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A).

Quanto aos resultados obtidos para permeabilidade o resultado se apresenta, até a tensão aplicada de 200kPa, da mesma ordem de grandeza do obtido para o solo puro. Dessa forma, os resultados se aproximam do indicado como ideal pela NBR13896/1997 para cobertura de aterros sanitários. Para as tensões superiores a 200kPa a permeabilidade sofre aumento, porém por apresentar valores ainda próximos aos obtidos para os níveis abaixo deste limite a viabilidade da utilização ainda pode ser considerada caso se utilize um solo puro com permeabilidade menor que  $10^{-8}$  m/s.

Tabela 11: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 5,0%.

<b>Código do ensaio</b>	<b>Resultado do Ensaio</b>
SR_LC_5,0%	23,0%
SR_LP_5,0%	31,0%
SR_LL_CS 5,0%	39,0%
SR_LL_FCT 5,0%	32,0%
SR_COMP_5,0%	$\rho_d = 1,41 \text{ g/cm}^3$ Umidade ótima = 27,2%
SR_ISC_5,0%	9,3%
SR_EXP_5,0%	3,87%
SR_PE_5,0%	Até 200 kPa = $10^{-7}$ m/s Acima de 200 kPa = $10^{-6}$ m/s

Fonte: Autor (2020).

#### 4.5 MISTURA SOLO-RSU COMPOSTADO – 7,5%

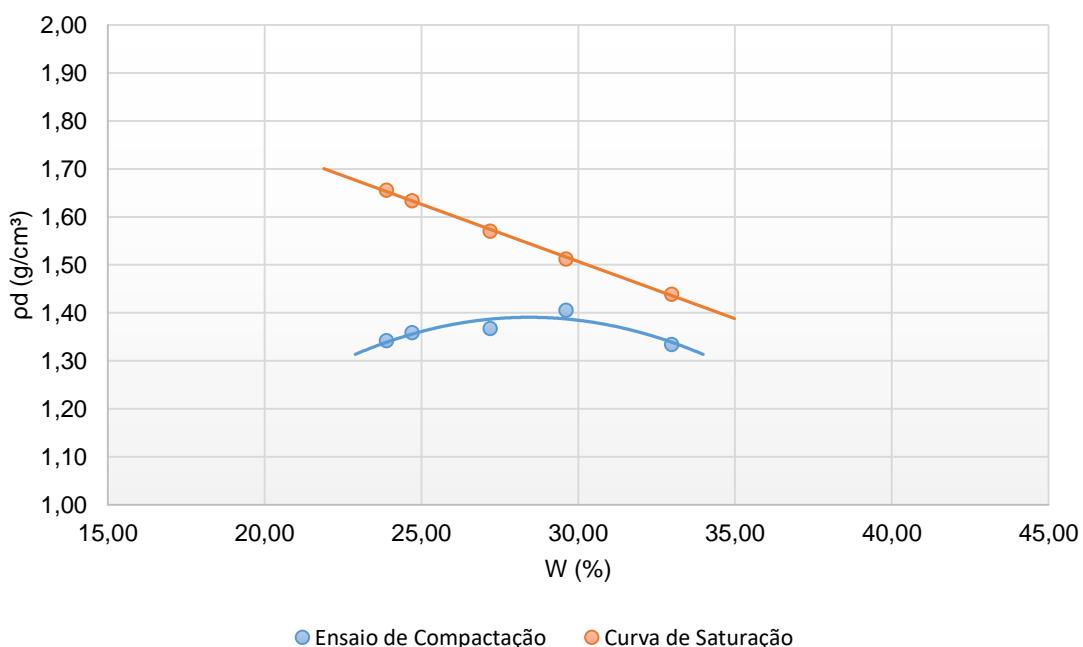
A proposta de mistura entre solo e RSU compostado para análise, neste tópico, foi considerada com teor de 7,5% (em peso) de RSU-compostado em relação ao peso de solo.

O valor obtido para o limite de contração a partir do ensaio SR\_LC\_7,5% indicou o resultado de 31%. O resultado obtido para o limite de plasticidade através do ensaio

SR\_LP\_7,5% revelou, após o procedimento, o valor de 35%. O limite de liquidez, obtido através do método de Casagrande (ensaio SR\_LL\_CS 7,5%) apontou como resultado para o parâmetro o valor de 47%. Quando utilizado o cone de penetração (SR\_LL\_FCT 7,5%) o resultado obtido para o limite de liquidez foi 42%.

O Gráfico 17 apresenta os dados gerados após a execução do ensaio de compactação (SR\_COMP\_7,5%) para a mistura em estudo. A análise dos resultados obtidos permite encontrar um valor para a massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ) de  $1,40 \text{ g/cm}^3$ , considerando a umidade ótima obtida de 28,6%.

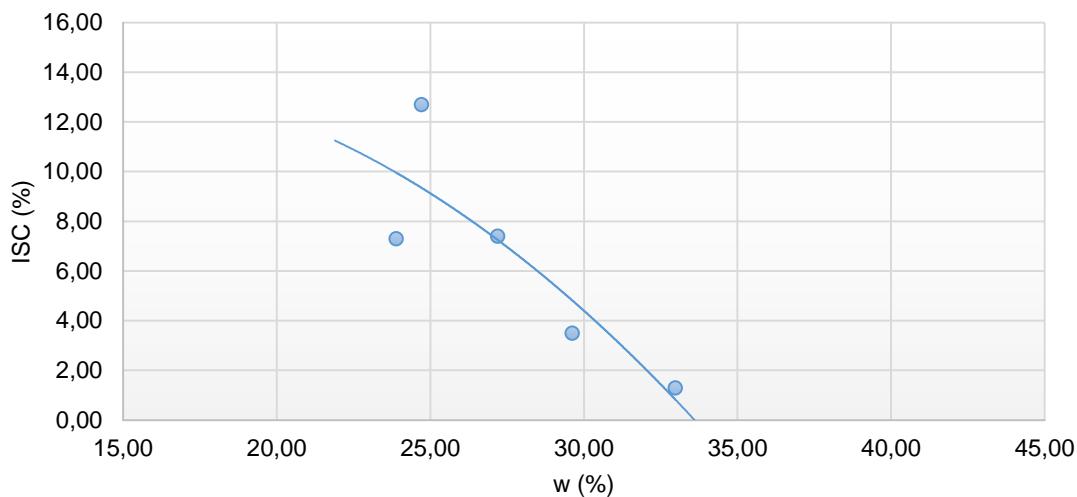
Gráfico 17: Curva de compactação (SR\_COMP\_7,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 7,5%.



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 18 exibe os resultados obtidos para a análise do ensaio de índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_7,5%). Considerando-se a umidade ótima de 28,6%, os dados indicam um valor de ISC igual a 6,0%. O resultado aos parâmetros estabelecidos pelas normativas DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

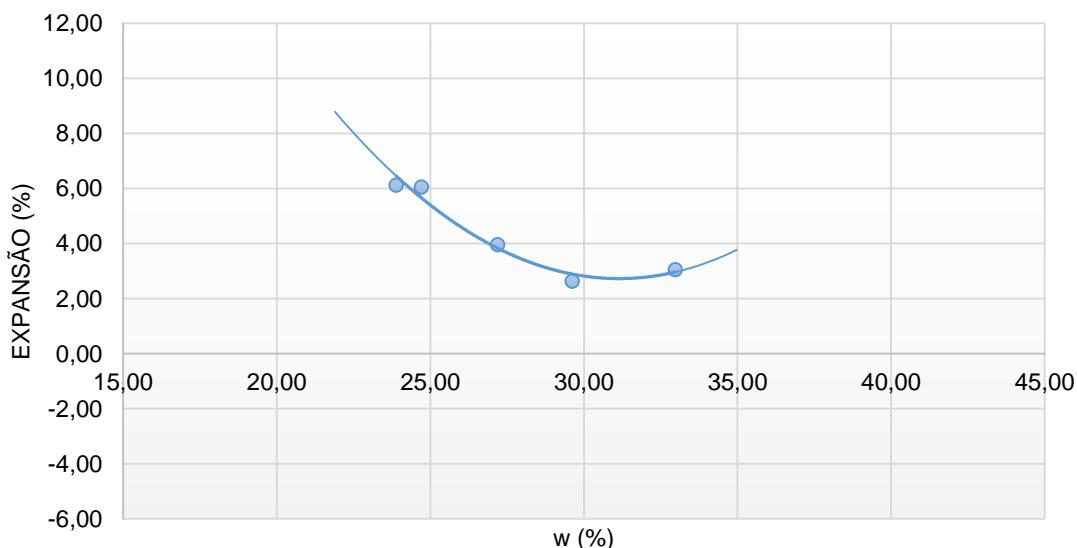
Gráfico 18: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_7,5%) – mistura solo-RSU compostado 7,5%.



Fonte: Autor (2020).

O ensaio de expansão para a mistura solo-RSU compostado (SR\_EXP\_7,5%) exibe os resultados obtidos no Gráfico 19, apontando o valor de 3,17% quando analisado em relação a umidade ótima. Como o valor encontrado foi inferior a 4%, a mistura atende ao estabelecido pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

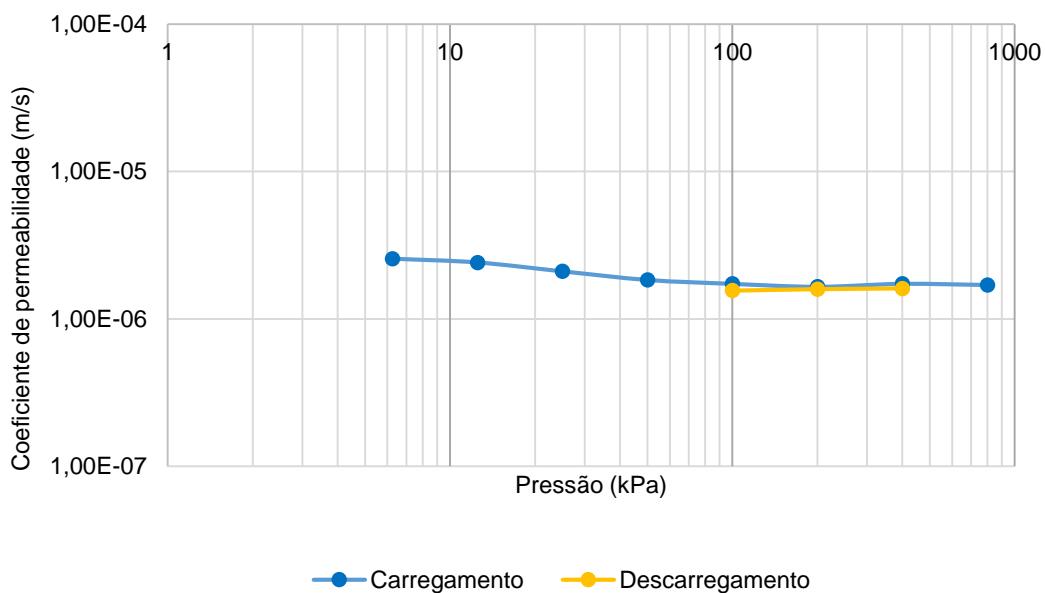
Gráfico 19: Ensaio de expansão (SR\_EXP\_7,5%) – mistura solo-RSU compostado 7,5%.



Fonte: Autor (2020).

Os valores obtidos no procedimento para a determinação da permeabilidade (ensaio SR\_PE\_7,5%), com resultados expressos no Gráfico 20, aponta que para os diferentes níveis de tensão vertical aplicados a permeabilidade encontrada é da ordem de  $10^{-6}$  m/s. O resultado encontrado apresenta um aumento em relação a situação inicial verificada para o solo puro (valor na ordem de  $10^{-7}$  m/s), sendo recomendado pela NBR13896/1997 valores inferiores a  $10^{-8}$  m/s. Também para o teor de 7,5% se verifica a importância de se utilizar um solo que esteja com certa folga em relação ao valor de  $10^{-8}$  m/s, visto que o composto tende a aumentar a permeabilidade.

Gráfico 20: Ensaio de Permeabilidade (SR\_PE\_7,5%) – mistura solo-RSU compostado 7,5%.



Fonte: Autor (2021).

Os resultados obtidos para a mistura solo-RSU compostado com teor de 7,5% encontram-se apresentados, de maneira sintética, na Tabela 12. A mistura em análise pode ser utilizada como corpo de aterro compactado conforme os critérios adotados pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A). Quanto as considerações sobre permeabilidade, o resultado encontrado se afasta do indicado como ideal pela NBR13896/1997 para cobertura de aterros sanitários e também se apresenta superior ao encontrado para a situação somente com solo puro, porém a viabilidade da utilização da mistura pode ser considerada.

Tabela 12: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 7,5%.

Código do ensaio	Resultado do Ensaio
SR_LC_7,5%	31,0%
SR_LP_7,5%	35,0%
SR_LL_CS 7,5%	47,0%
SR_LL_FCT 7,5%	42,0%
SR_COMP_7,5%	$\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ Umidade ótima = 28,6%
SR_ISC_7,5%	6,0%
SR_EXP_7,5%	3,17%
SR_PE_7,5%	$10^{-6} \text{ m/s}$

Fonte: Autor (2020).

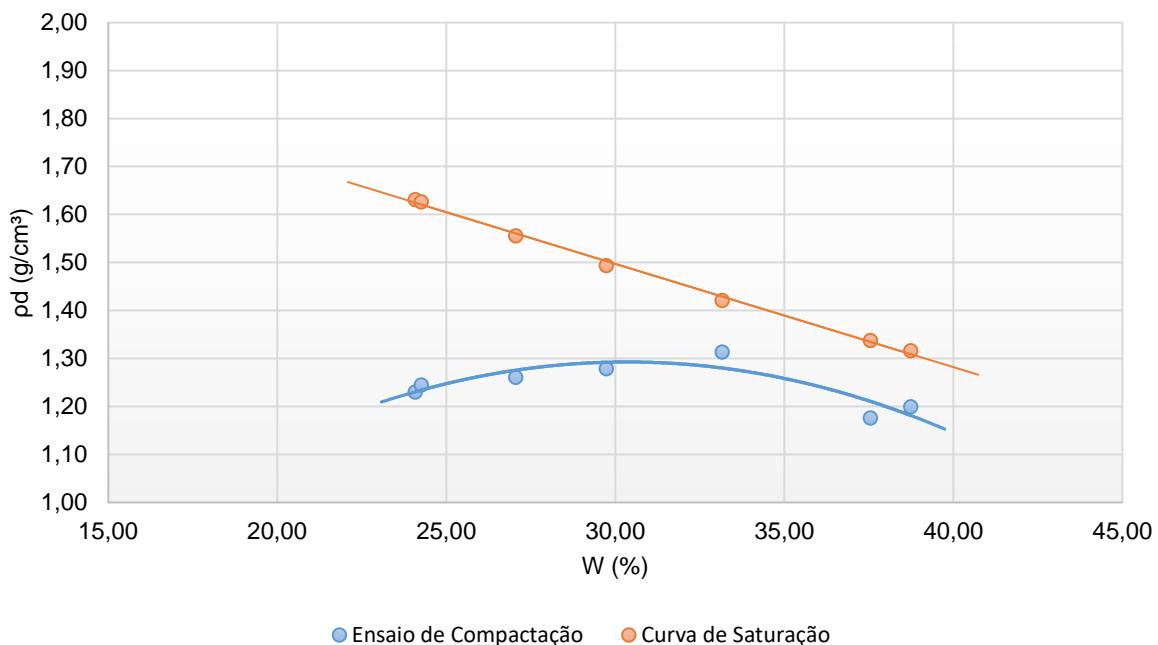
#### 4.6 MISTURA SOLO-RSU COMPOSTADO – 12,5%

O teor de RSU-compostado escolhido para a análise na proposta de mistura deste tópico foi de 12,5% (em peso) de RSU-compostado em relação ao peso de solo.

O valor para o limite de contração encontrado a partir do ensaio SR\_LC\_12,5% indicou o resultado de 30%. O limite de plasticidade obtido para a mistura em questão através do ensaio SR\_LP\_12,5% apontou como resultado o valor de 34%. O limite de liquidez, através método de Casagrande (ensaio SR\_LL\_CS 12,5%), encontrou como resultado para o parâmetro o valor de 42%. No procedimento realizado utilizando o cone de penetração (SR\_LL\_FCT 12,5%) o resultado obtido para o limite de liquidez foi 34%.

Os dados apresentados no Gráfico 21 revelam os resultados obtidos para o ensaio de compactação (SR\_COMP\_12,5%). A análise dos dados expostos permite encontrar uma massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ) de  $1,28 \text{ g/cm}^3$  em uma umidade ótima de 30,0%.

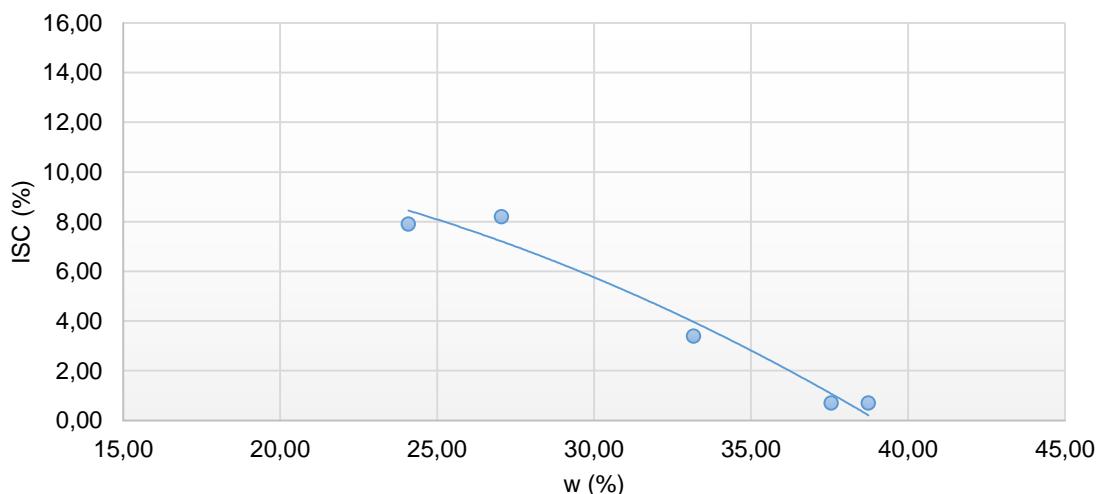
Gráfico 21: Curva de compactação (SR\_COMP\_12,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 12,5%.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados apresentados no Gráfico 22 expressam os dados para análise do índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_12,5%). No valor da umidade ótima de 28,0%, obteve-se ISC igual a 6,5%. O valor atende ao estabelecido nas normativas DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

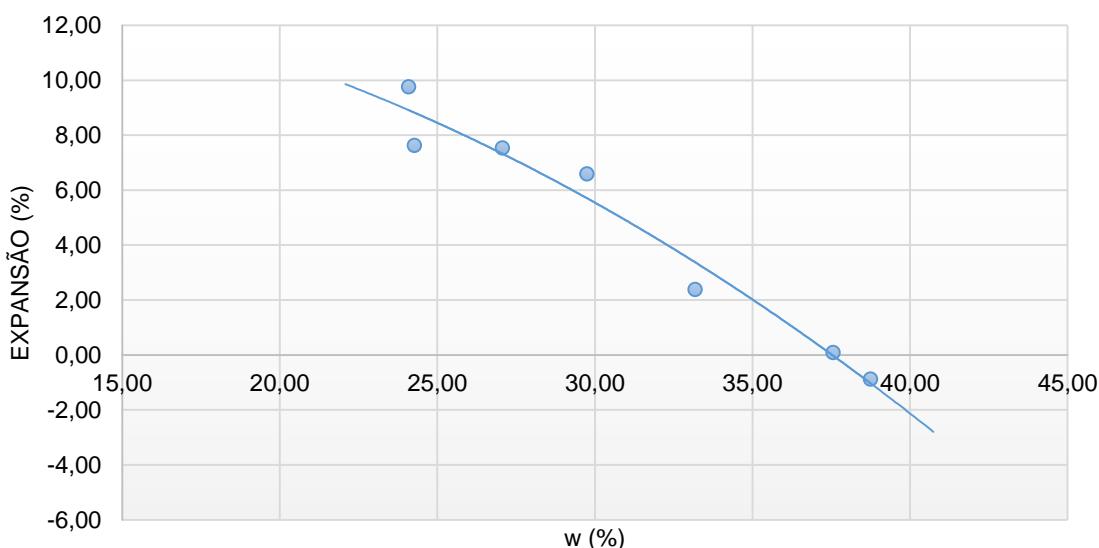
Gráfico 22: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_12,5%) – mistura solo-RSU compostado 12,5%.



Fonte: Autor (2020).

O ensaio de expansão expresso no Gráfico 23 (SR\_EXP\_12,5%) apresenta resultado de 5,54% quando analisado em relação a umidade ótima. Sendo o resultado encontrado superior a 4%, a mistura não atende ao preconizado por DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados. Dessa forma, o aumento no teor de composto acabou por fazer com que a expansão ultrapassasse o limite da norma.

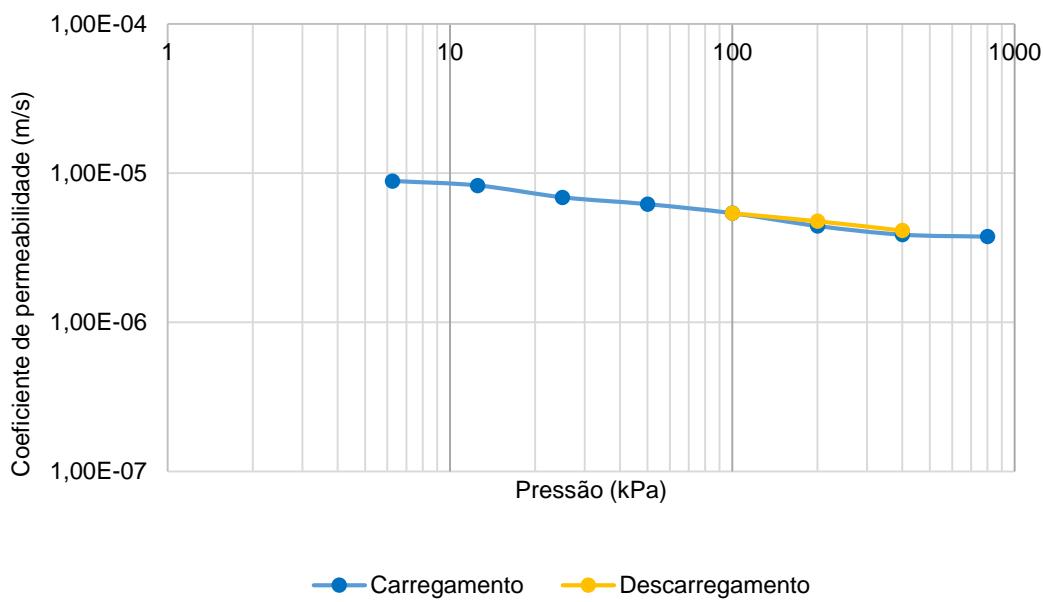
Gráfico 23: Ensaio de expansão (SR\_EXP\_12,5%) – mistura solo-RSU compostado 12,5%.



Fonte: Autor (2020).

A determinação da permeabilidade realizada através do ensaio SR\_PE\_12,5% e com resultados apresentados no Gráfico 24 revela, para os diferentes níveis de tensão avaliados, valores obtidos da ordem de  $10^{-6}$  m/s. Esse valor apresenta um aumento em relação ao encontrado para o solo puro (situação inicial da ordem de  $10^{-7}$  m/s) e também em relação as misturas anteriores, que mostravam um comportamento semelhante ao observado pelo solo puro ao longo das tensões aplicadas. Para a mistura em questão, nota-se uma tendência ao aumento da permeabilidade de forma mais nítida do que nas misturas anteriores.

Gráfico 24: Ensaio de Permeabilidade (SR\_PE\_12,5%) – mistura solo-RSU compostado 12,5%.



Fonte: Autor (2021).

Os resultados encontram-se apresentados, de maneira sintética, na Tabela 13. É possível perceber que a mistura em questão pode ser utilizada como corpo de aterro compactado conforme os critérios estabelecidos pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) quando avaliado o índice de suporte Califórnia, porém não atende os requisitos com relação a expansão. No que diz respeito as considerações sobre permeabilidade o resultado se apresenta mais distante do indicado como ideal pela NBR13896/1997 para cobertura de aterros sanitários e também superior ao encontrado para a situação somente com solo puro, apresentando resultados com maior discrepância em relação ao obtido para as misturas anteriores. Essa tendência ao afastamento do comportamento observado para as misturas anteriores faz com que sua utilização não seja vista como adequada.

Tabela 13: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 12,5%.

Código do ensaio	Resultado do Ensaio
SR_LC_12,5%	31,0%
SR_LP_12,5%	35,0%
SR_LL_CS 12,5%	47,0%
SR_LL_FCT 12,5%	42,0%
SR_COMP_12,5%	$\rho_d = 1,28 \text{ g/cm}^3$ Umidade ótima = 30,0%
SR_ISC_12,5%	6,5%
SR_EXP_12,5%	5,54%
SR_PE_12,5%	$10^{-6} \text{ m/s}$

Fonte: Autor (2020).

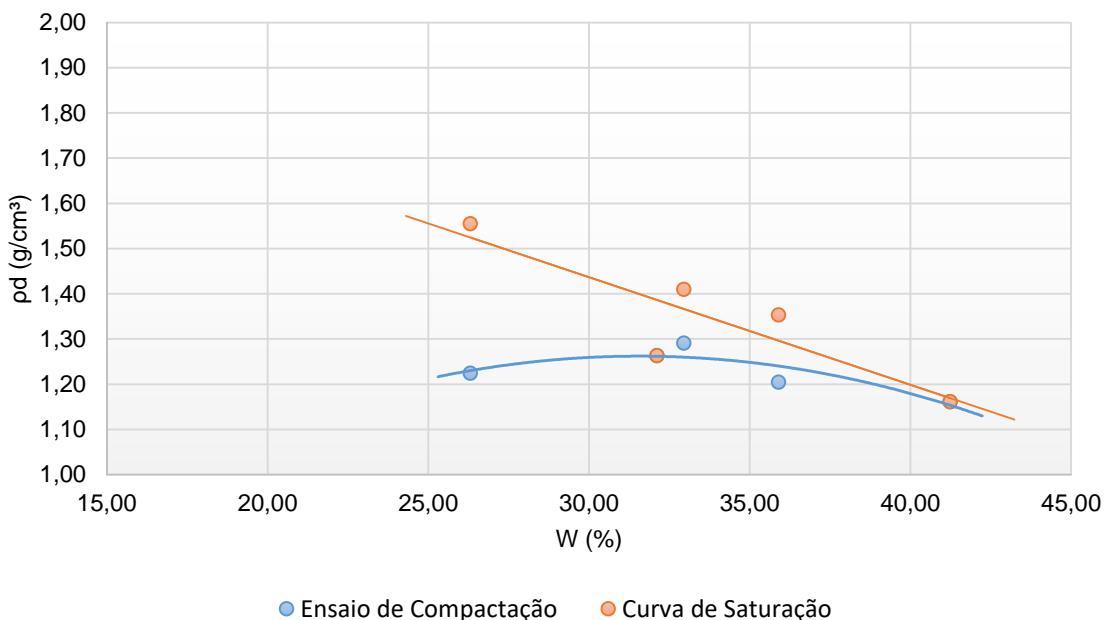
#### 4.7 MISTURA SOLO-RSU COMPOSTADO – 17,5%

O teor de RSU-compostado escolhido para a análise da última proposta de mistura foi de 17,5% (em peso) de RSU-compostado em relação ao peso de solo.

O limite de contração encontrado a partir do ensaio SR\_LC\_17,5% indicou como resultado o valor de 25%. O limite de plasticidade obtido através do ensaio SR\_LP\_17,5% apontou para o procedimento o valor de 38%. O limite de liquidez, através do procedimento indicado pelo método de Casagrande (ensaio SR\_LL\_CS 17,5%) encontrou como resultado para o parâmetro o valor de 44%. No procedimento realizado utilizando o cone de penetração (SR\_LL\_FCT 17,5%) o resultado obtido para o limite de liquidez foi 37%.

Os dados presentes no Gráfico 25 apresentam os resultados obtidos para o ensaio de compactação (SR\_COMP\_17,5%). A análise dos dados permite encontrar, para a mistura em estudo, massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ) de  $1,23 \text{ g/cm}^3$  em uma umidade ótima de 30,5%.

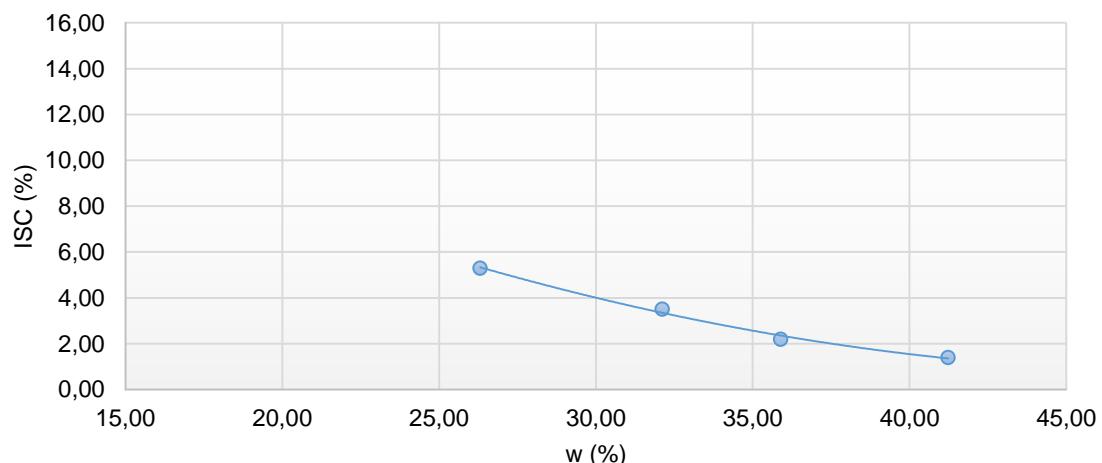
Gráfico 25: Curva de compactação (SR\_COMP\_17,5%) e curva de saturação – mistura solo-RSU compostado 17,5%.



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 26 exibe os resultados obtidos para a análise do ensaio de índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_17,5%). Considerando-se a umidade ótima de 30,5%, os dados indicam um valor de ISC igual a 3,8%. O resultado não atende aos parâmetros estabelecidos pelas normativas DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados.

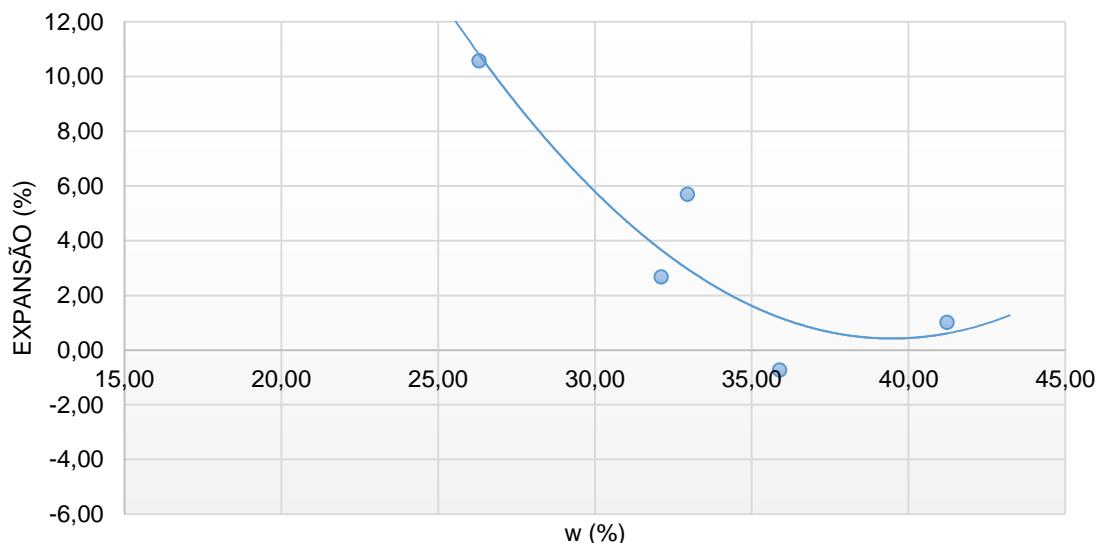
Gráfico 26: Ensaio de Índice de suporte Califórnia (SR\_ISC\_17,5%) – mistura solo-RSU compostado 17,5%.



Fonte: Autor (2020).

O ensaio de expansão para a mistura solo-RSU compostado (SR\_EXP\_17,5%) exibe os resultados obtidos no Gráfico 27, apontando o valor de 5,15% quando analisado em relação a umidade ótima. Como o valor encontrado foi superior a 4%, a mistura não atende ao estabelecido pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) para uso em aterros compactados. Ressalta-se a importância de se testar a mistura antes de utilizar em aplicação de aterros compactados, visto que para maiores teores de composto na mistura tem-se uma expansão acima do limite aceitável pela norma.

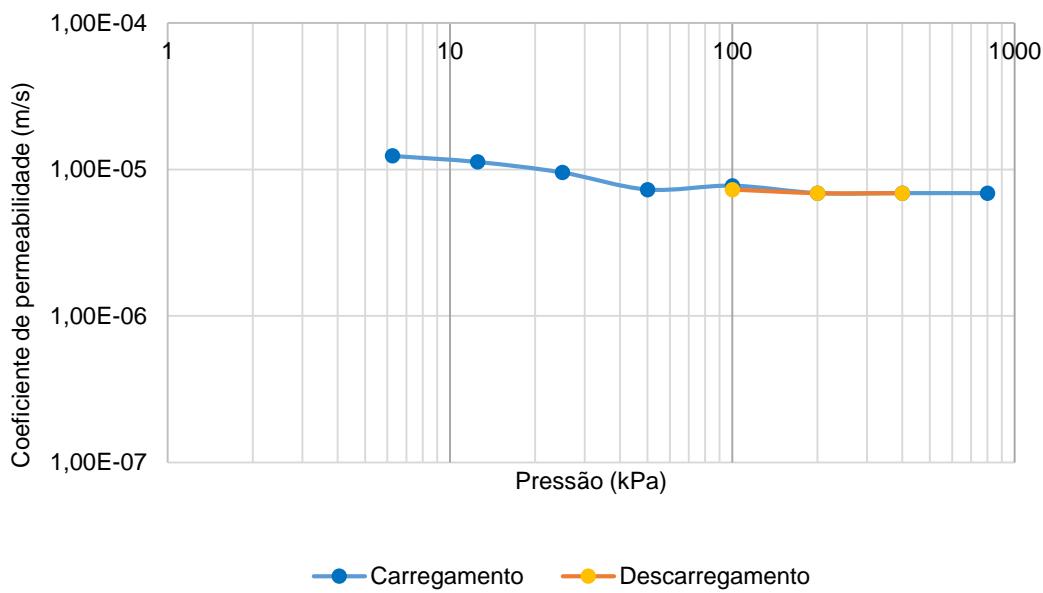
Gráfico 27: Ensaio de expansão (SR\_EXP\_17,5%) – mistura solo-RSU compostado 17,5%.



Fonte: Autor (2020).

A determinação da permeabilidade realizada através do ensaio SR\_PE\_17,5% e com resultados apresentados no Gráfico 28 revela, nos níveis iniciais de tensão aplicados, valores obtidos da ordem de  $10^{-5}$  m/s. No processo de acréscimo das tensões aplicadas os valores obtidos atingem a ordem de  $10^{-5}$  m/s, apresentando comportamento com tendência semelhante ao observado para a mistura com teor de 12,5% - o aumento da permeabilidade é percebido de forma mais nítida do que na comparação com as misturas com teor de RSU compostado até 7,5%.

Gráfico 28: Ensaio de Permeabilidade (SR\_PE\_17,5%) – mistura solo-RSU compostado 17,5%.



Fonte: Autor (2021).

Os resultados obtidos encontram-se, de maneira sintética, na Tabela 14. É possível perceber que a mistura em questão poderia ser utilizada como corpo de aterro compactado conforme os critérios estabelecidos pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) quando avaliado o índice de suporte Califórnia, porém não atende os requisitos com relação a expansão. No que diz respeito as considerações sobre permeabilidade o resultado se apresenta mais distante do indicado como ideal pela NBR13896/1997 para cobertura de aterros sanitários e também superior ao encontrado para a situação somente com solo puro, apresentando resultados com maior discrepância em relação ao obtido para as misturas até 7,5% de teor de RSU-compostado. Assim como percebido para a mistura com teor de 12,5% de RSU-compostado, essa tendência ao afastamento do comportamento observado para as misturas anteriores faz com que sua utilização não seja vista como adequada.

Tabela 14: Resultado dos ensaios – mistura solo-RSU compostado 17,5%.

Código do ensaio	Resultado do Ensaio
SR_LC_17,5%	25,0%
SR_LP_17,5%	38,0%
SR_LL_CS 17,5%	44,0%
SR_LL_FCT 17,5%	37,0%
SR_COMP_17,5%	$\rho_d = 1,23 \text{ g/cm}^3$ Umidade ótima = 30,5%
SR_ISC_17,5%	3,8%
SR_EXP_17,5%	5,15%
SR_PE_17,5%	Até 25 kPa = $10^{-5} \text{ m/s}$ Acima de 25 kPa = $10^{-6} \text{ m/s}$

Fonte: Autor (2020).

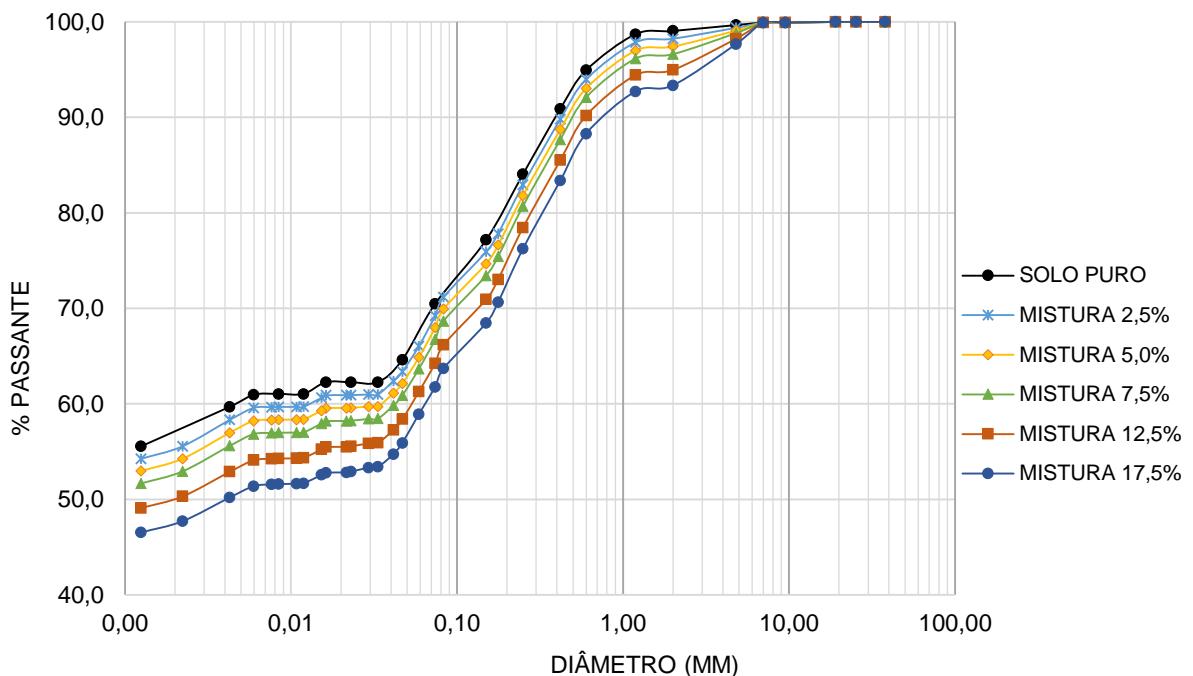
#### 4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As discussões acerca dos resultados obtidos, após executada a série de ensaios prevista no programa experimental, tem por objetivo reunir os dados observados para cada uma das situações simuladas em laboratório. Assim, torna-se facilitada a comparação entre os dados referentes ao solo e as misturas realizadas com o objetivo de visualizar o efeito que o acréscimo de RSU compostado causa nos parâmetros obtidos para a situação apenas com solo puro.

As curvas granulométricas, estimadas através de ponderação de acordo com as curvas obtidas para os materiais considerados de maneira separada e o teor de RSU-compostado a ser adicionado em cada situação, são apresentadas no Gráfico 29. O acréscimo de RSU compostado, material cuja granulometria demonstra predominarem as frações com diâmetros maiores (pedregulho e areia), altera a granulometria do solo puro tendendo a reduzir a representatividade da fração mais fina dominante na situação original (predominantemente argila). Quanto maior for o teor de RSU-compostado considerado na mistura com o solo puro, maior será o

impacto percebido na redução do percentual de finos do solo original. Assim, haverá impacto também na permeabilidade da mistura resultante, fazendo com que o aumento no teor de RSU compostado indique uma tendência de aumento nos valores de permeabilidade obtidos.

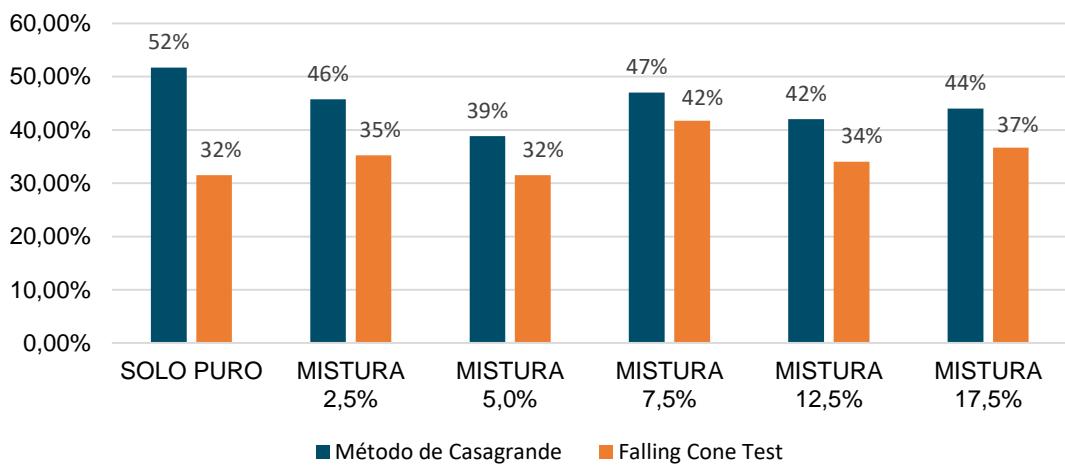
Gráfico 29: Curvas granulométricas estimadas – solo puro e misturas solo-RSU compostado.



Fonte: Autor (2020).

A avaliação dos limites de liquidez observados para os cenários alvo de ensaio encontram-se no Gráfico 30. Por serem utilizadas duas metodologias distintas, diferenças nos resultados são obviamente observadas. Porém, a tendência de comportamento após o acréscimo de RSU-compostado é percebida tanto para os ensaios realizados com o método de Casagrande quanto para o Falling Cone Test (FCT). O aumento do teor de RSU-compostado não é capaz de impactar de maneira significativa os resultados apresentados, que são consideradas variações intrínsecas entre um ensaio realizado pelo método de Casagrande (em que há parcela de subjetividade) e o ensaio FCT. Foi possível concluir que este parâmetro em análise tende a se comportar de maneira constante, revelando que os teores de composto adotados não chegaram a influenciar nos resultados de forma significativa.

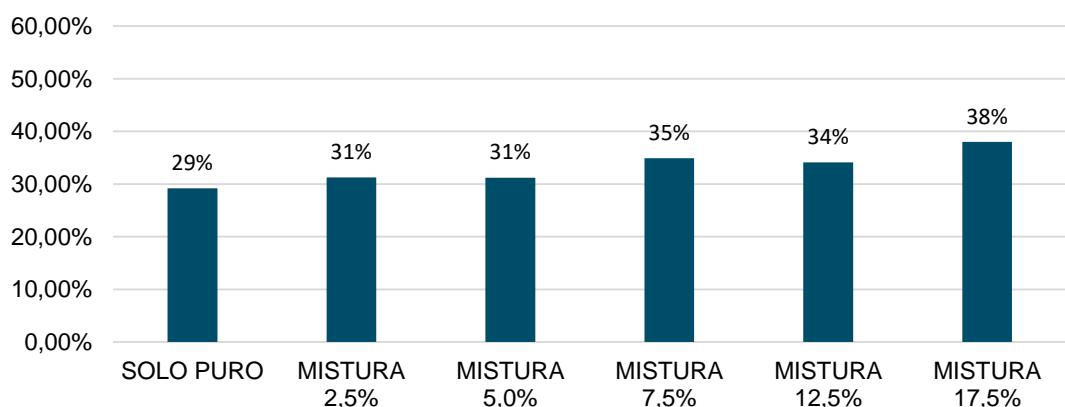
Gráfico 30: Limite de liquidez das misturas solo-RSU compostado – método de Casagrande e Falling Cone Test (FCT).



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 31 apresenta a avaliação a respeito do comportamento do limite de plasticidade resultante dos ensaios realizados para o solo puro e para as misturas realizadas em diferentes teores de RSU-compostado. Os resultados apontaram um potencial de acréscimo do teor de umidade necessário para provocar a transição da mistura em estudo do estado semi-sólido para o estado plástico, sendo o valor mais elevado observado para a mistura com teor de 17,5% de RSU-compostado (38%).

Gráfico 31: Limite de plasticidade das misturas solo-RSU compostado.

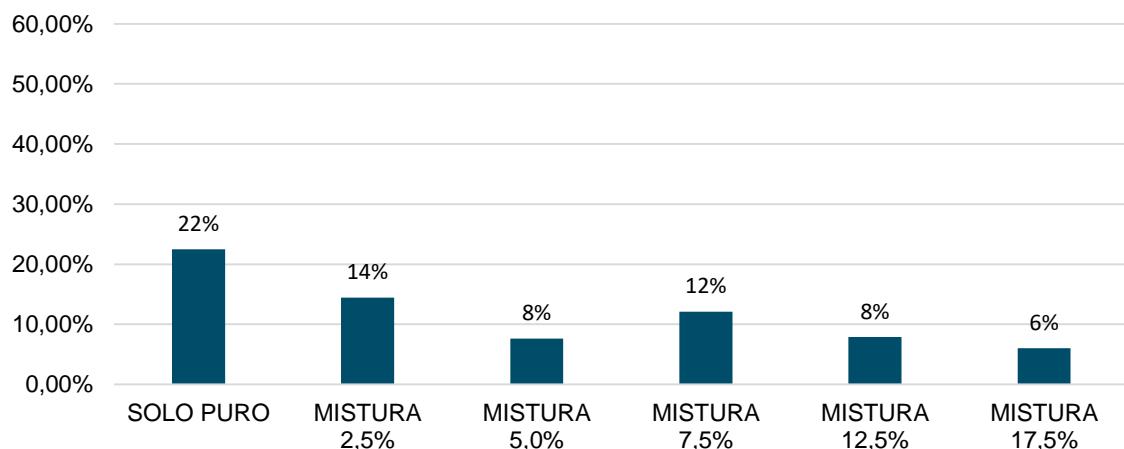


Fonte: Autor (2020).

As considerações a respeito do índice de plasticidade observados, após definidos os limites de liquidez e de plasticidade, serão apresentadas com base no apresentado

no Gráfico 32. Pinto (2000), ao apresentar resultados típicos de limites de Atterberg para solo brasileiros, define como sendo possível que uma mesma classificação para um solo argiloso tenha seus valores de índice de plasticidade variando em uma faixa de até 15% a até 30%. Essa faixa de valores se deve, novamente, a subjetividade envolvida nos ensaios que determinam os limites – caráter que não inviabiliza as metodologias existentes pois as mesmas são amplamente difundidas. Cabe destacar que, ao inserir um material classificado como não plástico junto ao solo, claramente o sistema resultante apresentará redução no índice de plasticidade. Considerando o acréscimo de RSU-compostado em diferentes teores ao solo utilizado a máxima diferença encontrada entre as diferentes misturas foi de 8%, sendo um indicativo de que o aumento dos teores considerados para as misturas não provocaria impacto significativo nas considerações sobre a plasticidade do sistema formado. No entanto a diferença foi significativa ao se comparar o solo puro com um teor de composto de 17,5%, observando-se diferença de 16% no IP.

Gráfico 32: Índice de plasticidade das misturas solo-RSU compostado.

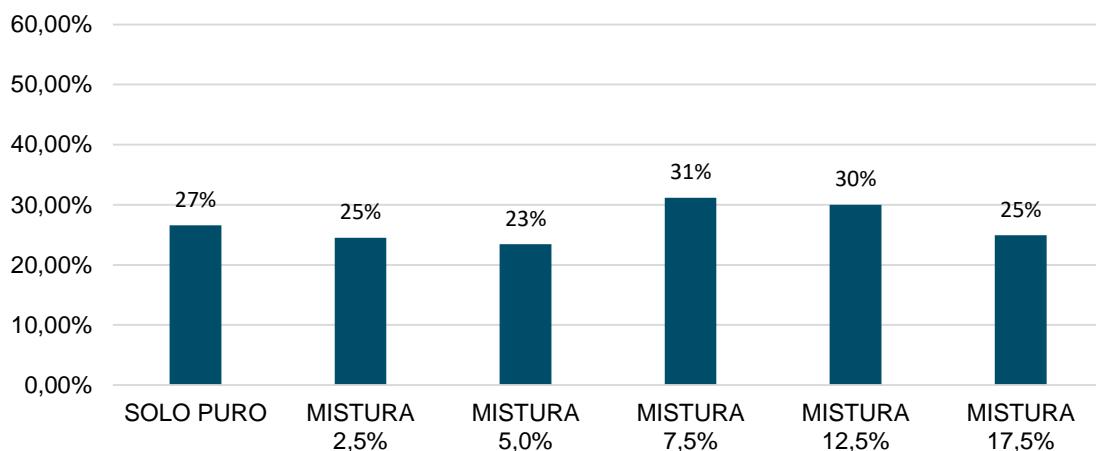


Fonte: Autor (2020).

Os resultados obtidos para os limites de contração estudados são apresentados no Gráfico 33. O comportamento com relação a este parâmetro que indica o teor de umidade necessário para que o solo passe do estado sólido para o semi-sólido, após inserido o RSU-compostado, não apresentou tendência clara de variação. As misturas com teor de 2,5%, 5,0% e 17,5% apresentam redução quando comparadas ao solo puro, enquanto as misturas com teor de 7,5% e 12,5% apresentam acréscimo em relação ao solo puro. Em ambos os casos, porém, a variação apresentada de 4% não

chega a ser significativa para indicar mudança de comportamento do material. Corrobora esta observação o fato de que, após a cápsula de material ensaiado ser envolta em parafina e submersa em água para a leitura do volume final, a precisão do recipiente graduado tem influência sobre o resultado do ensaio. A necessidade de se estimar um valor intermediário entre dois valores presentes na graduação faz com que o resultado tenha um grau de imprecisão que, considerado em conjunto com os valores observados para os ensaios, pode aproxima-los e demonstrar uma tendência ao limite de contração se comportar de maneira constante.

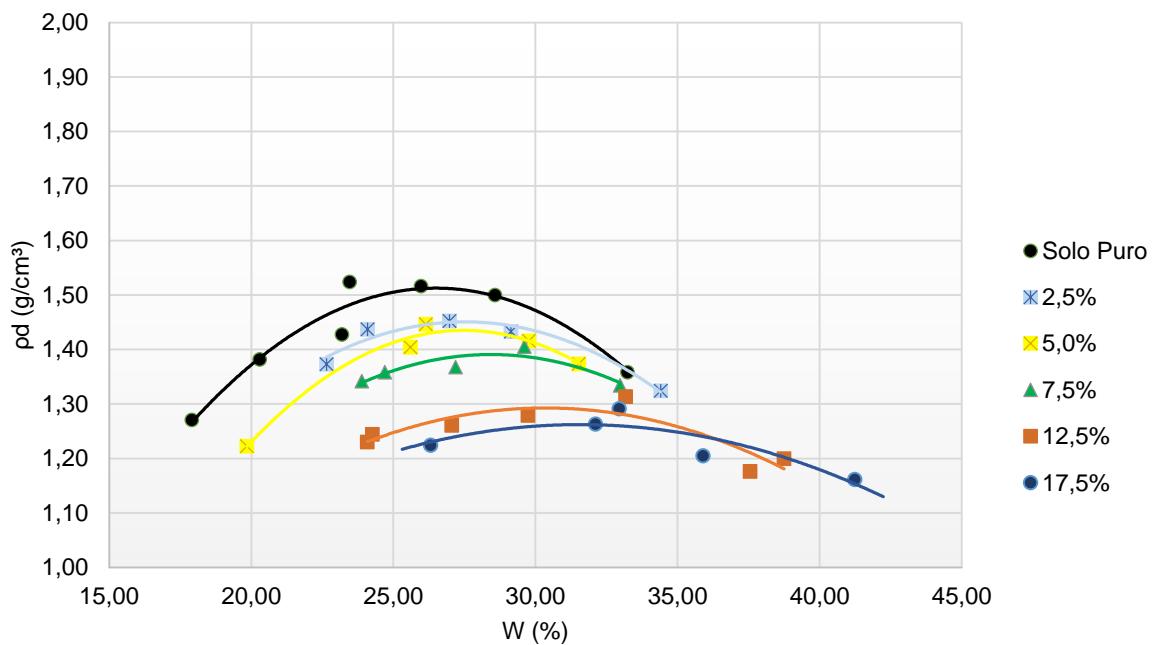
Gráfico 33: Limite de contração das misturas solo-RSU compostado.



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 34 apresenta os resultados encontrados nos ensaios de compactação realizados com o solo puro e com as misturas solo-RSU compostado. É possível perceber que, a medida em que o teor de RSU compostado aumenta, temos uma consequente redução nos valores obtidos para as massas específicas secas máximas, conforme esperado já que o peso específico real do composto é inferior ao das partículas de solo.

Gráfico 34: Resultados dos ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.

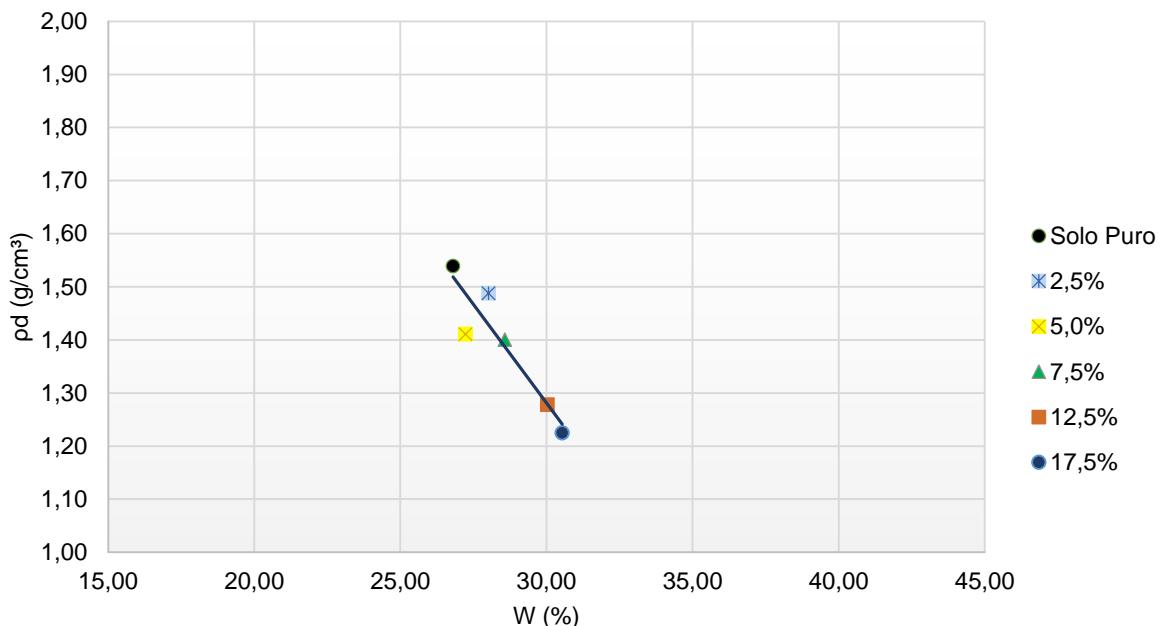


Fonte: Autor (2020).

Os valores encontrados para a massa específica seca máxima e a umidade ótima, para o solo puro e cada uma das misturas, são destacados no Gráfico 35. Fica explícita a tendência, de maneira linear, a um decréscimo nos valores de massa específica seca máxima enquanto a umidade ótima sofre um incremento. Exceção feita para a mistura com teor de 5,0% de RSU compostado, em que se observou umidade ótima (27,2%) inferior ao encontrado para a mistura com teor de 2,5% (28,0%).

Também fica clara a tendência de aumento do teor de umidade ótima com o aumento do teor de RSU-compostado. Isso mostra que ao se trabalhar com as misturas devem ser feitas curvas de compactação específicas de forma que se obtenha o maior peso específico aparente seco possível em campo para o teor de composto aplicado.

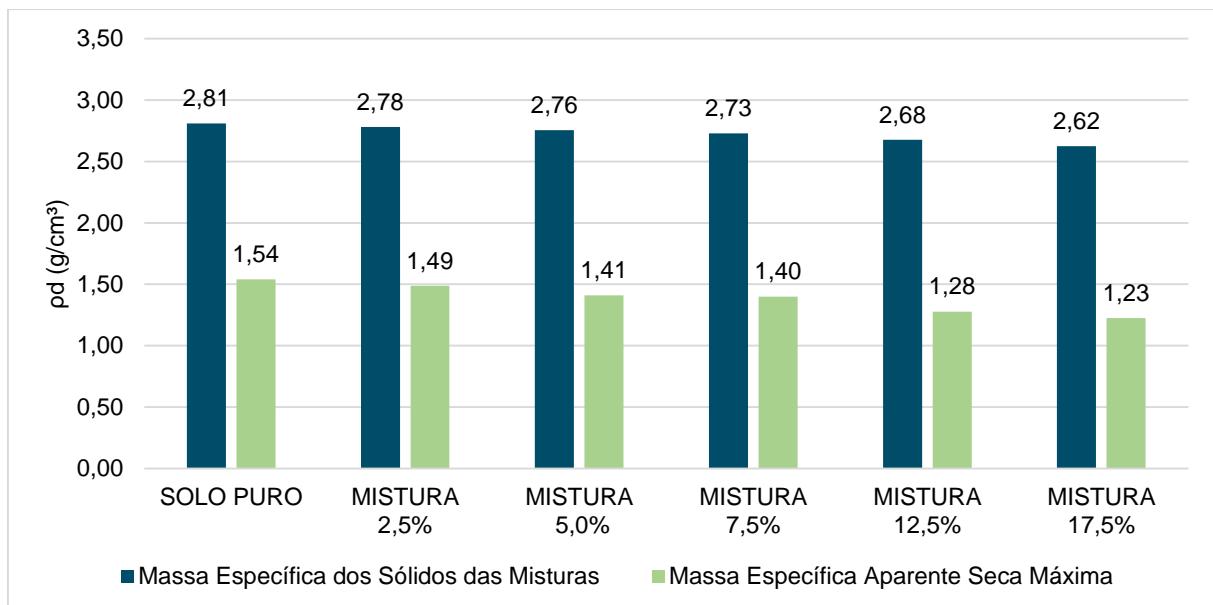
Gráfico 35: Valores ótimos – ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 36 apresenta uma comparação entre os valores das massas específicas dos sólidos para o solo puro e para as misturas entre solo-RSU compostado (para as misturas, valores calculados via média ponderada), bem como entre os valores de massa específica aparente seca máxima também para solo puro e as misturas nos diferentes teores (obtidos via ensaio de compactação). Em ambos os casos, os parâmetros revelam sofrer redução a medida em que o teor de RSU compostado aumenta. Esse fato explica-se pelo aumento da participação de um material com massa específica dos grãos inferior ao observado para o solo puro – substitui-se cada vez mais o solo puro ( $2,81 \text{ g/cm}^3$ ) por RSU-compostado ( $1,75 \text{ g/cm}^3$ ).

Gráfico 36: Comparativo entre massa específica dos sólidos e massa específica aparente seca máxima para o solo puro e as misturas solo-RSU compostado.

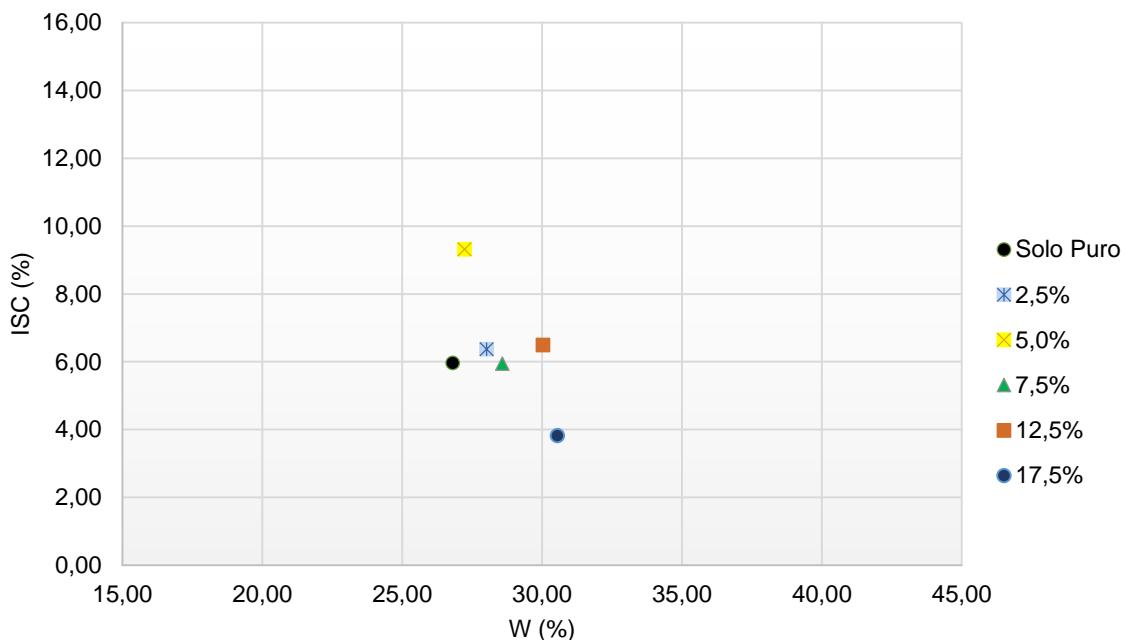


Fonte: Autor (2020).

Os resultados observados para a determinação do índice de suporte Califórnia são apresentados no Gráfico 37. O critério estabelecido, ao seguir o exposto pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A), indica que o material destinado a execução de corpo de aterro deve possuir  $ISC \geq 2\%$  para que esteja apto a ser utilizado. Mediante a esse fato, temos que as misturas entre solo e RSU compostado avaliadas atendem ao critério exigido na especificação normativa. As misturas realizadas com teor de 2,5%, 7,5% e 12,5% mostraram valor de  $ISC$  próximo ao encontrado para o solo puro, tomando este como valor de referência. A mistura realizada com teor de 5,0% apresentou o maior valor de  $ISC$  quando comparada aos demais valores obtidos, enquanto a mistura com teor de RSU compostado de 17,5% apresentou o menor  $ISC$  dentre os resultados analisados.

Cabe ressaltar que o critério para execução de bases e sub-bases de pavimentação com base no  $ISC$  é um critério que tem deixado de ser utilizado. Atualmente tais camadas de pavimentação são dimensionadas utilizando o parâmetro módulo de resiliência, obtido por meio de ensaios triaxiais dinâmicos.

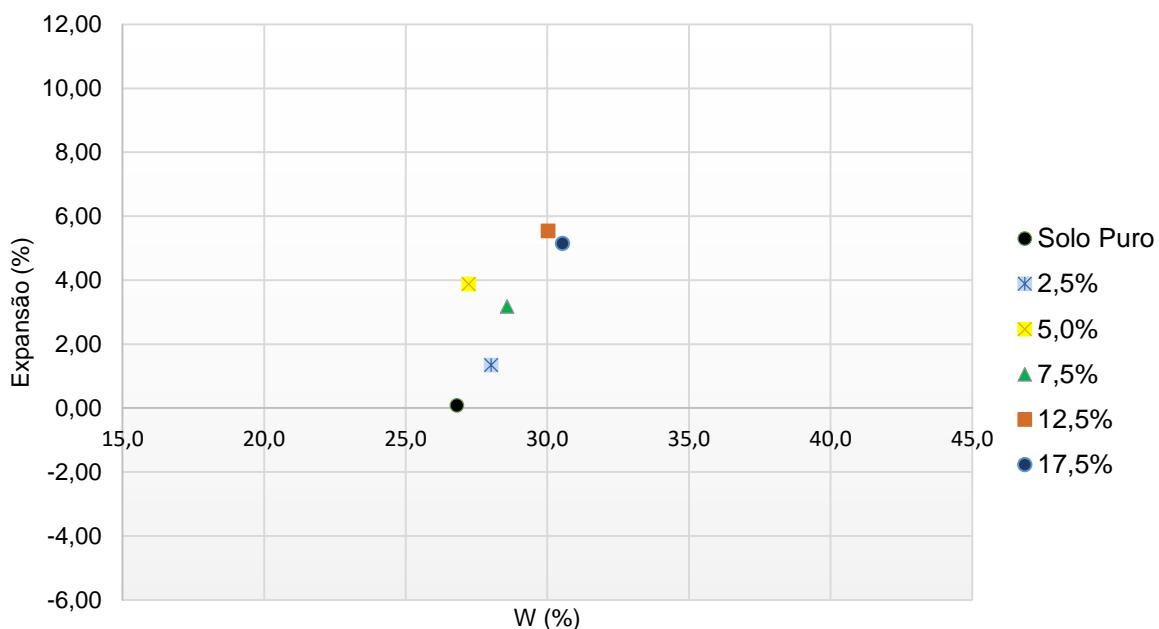
Gráfico 37: Teores de umidade ótimos – ensaios de ISC para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.



Fonte: Autor (2020).

Os valores obtidos nos ensaios de expansão encontram-se expressos no Gráfico 38. É possível notar uma tendência de aumento na expansão da mistura realizada a medida em que o teor que RSU compostado sofre acréscimo. Segundo o critério estabelecido pela DNER-ME 129/94 (Método A) e DNER-ME 49/94 (Método A) o material utilizado para execução de corpo de aterro deve possuir expansão menor ou igual a 4%. Assim, as misturas realizadas com teor de RSU compostado até 7,5% são capazes de atender ao resultado necessário. Já as misturas realizadas com teor de 12,5% e 17,5% possuíram expansão acima do valor recomendado, não podendo ter utilização recomendada. A mistura realizada com teor de 5,0% apresentou a maior expansão dentre aquelas possíveis de serem utilizadas.

Gráfico 38: Teores de umidade ótimos – ensaios de expansão para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.

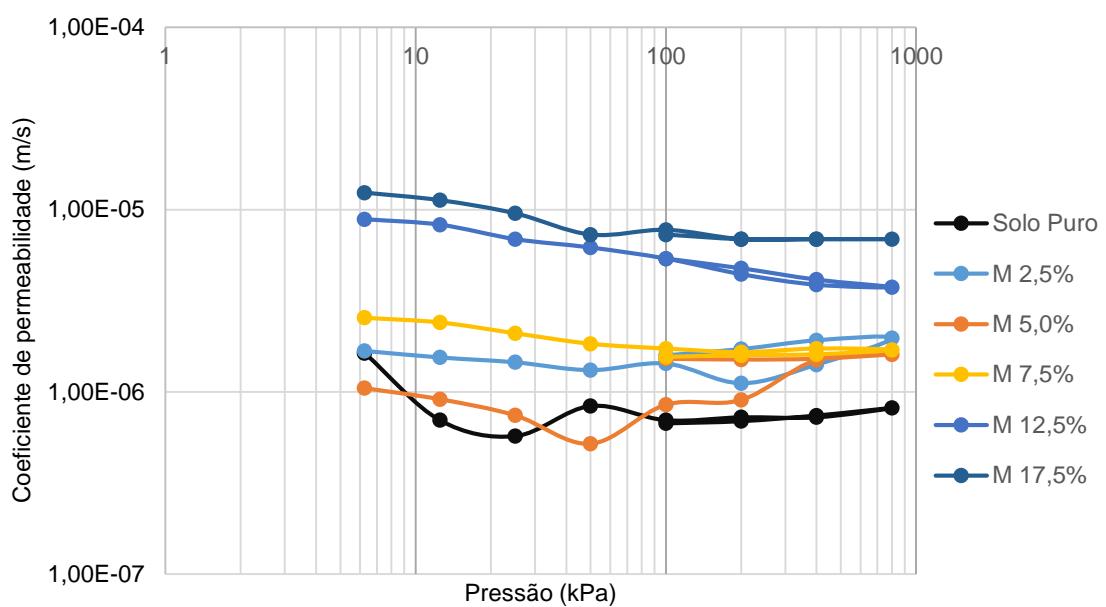


Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 39 exibe os resultados obtidos nos ensaios para determinação da permeabilidade do solo puro e das misturas solo-RSU compostado. A NBR13896/1997 recomenda, para cobertura de aterros sanitários, que o material utilizado tenha permeabilidade inferior a  $10^{-8}$  m/s. O solo puro utilizado para os ensaios já apresenta permeabilidade de  $10^{-7}$  m/s, sendo ligeiramente superior a recomendação normativa estabelecida, e as misturas solo-RSU compostado mostram sofrer aumento de permeabilidade a medida em que o teor de RSU-compostado aumenta. As misturas com teor até 7,5% demonstraram ter comportamento semelhante ao observado para o solo puro quando observado o acréscimo dos níveis de tensão aplicados, tendo valor de permeabilidade da ordem de  $10^{-6}$  m/s e não havendo variações significativas de permeabilidade para os valores referentes a mesma mistura. O comportamento exibido pela mistura com teor de 5,0% se aproximou mais do observado para o solo puro, apresentando permeabilidade de  $10^{-7}$  m/s para tensões aplicadas de até 200kPa. Já as misturas com teor de 12,5% e 17,5% apresentaram permeabilidade inicial mais elevada quando comparadas com o solo puro, havendo redução perceptível à medida que ocorre o acréscimo de tensões de acordo com as curvas plotadas. Sendo possível perceber que os valores de permeabilidade se

aproximam de  $10^{-5}$  m/s, os valores observados já se tornam mais distantes da situação inicial observada para o solo puro e a utilização destes teores mais elevados passa a não ser recomendada. Destaca-se que, como a permeabilidade inicial do solo utilizado já é superior ao recomendado pela normativa existente, a análise prévia de outro tipo de solo que possua permeabilidade inferior ao estabelecido por norma pode acarretar em melhores resultados para as misturas por permitir uma margem de segurança ao se acrescentar outro material que irá provocar um aumento na permeabilidade do sistema final. Uma explicação para tal comportamento pode estar no fato de que as fibras do RSU-compostado criaram caminhos preferenciais para a água, aumentando assim a permeabilidade do meio.

Gráfico 39: Ensaio de Permeabilidade para o solo puro e para as misturas solo-RSU compostado.



Fonte: Autor (2020).

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram executados uma série de ensaios para caracterização física e mecânica de forma a se verificar o impacto dos teores de RSU-compostado frente ao comportamento observado para o solo puro utilizado.

Verifica-se que, em alguns casos, os resultados tiveram variação não significativa ao se introduzir e aumentar o teor de RSU-compostado utilizado em cada uma das misturas analisadas. As conclusões obtidas no presente estudo são apresentadas a seguir na forma de tópicos para cada tipo de ensaio realizado. Também se apresenta, para as condições estudadas, em quais estruturas a presente configuração de mistura solo-RSU compostado apresenta potencial de utilização. Destaca-se a necessidade de investigações adicionais anteriores a definição, de fato, da utilização em uma estrutura.

- A análise granulométrica aponta que ao inserir o RSU compostado, em que predominam as frações de maior diâmetro, junto ao solo puro há como consequência a diminuição da representatividade das frações mais finas do solo a medida em que o teor utilizado aumenta. A modificação na granulometria apresenta um indicativo de tendência de aumento de permeabilidade;
- Os ensaios realizados para a avaliação do limite de liquidez, tanto pelo método de Casagrande quanto pelo Falling Cone Test, demonstraram que o aumento do teor de RSU-compostado na mistura com o solo puro não foi capaz de provocar variação significativa nos resultados;
- A observação dos limites de plasticidade indicou que o aumento no teor de RSU compostado presente na mistura com solo puro aponta para uma tendência de aumento no valor para o limite observado;
- A análise dos índices de plasticidade obtidos indicou que, considerando-se as misturas estudadas, o aumento nos teores de RSU-compostado não apresenta variação significativa nos valores obtidos. Entretanto, ao se comparar o resultado das misturas com o solo puro, o teor de RSU-compostado de 17,5% apresentou uma diferença no IP de 16%;

- Os resultados obtidos para a análise dos limites de contração obtidos para as misturas solo-RSU compostado não apresentaram variações significativas nos resultados obtidos;
- Os ensaios de compactação realizados demonstraram que, com o aumento no teor de RSU compostado presente na mistura com o solo puro, verifica-se um incremento nos valores para a umidade ótima e uma redução no valor da massa específica seca máxima. Importante realizar ensaio específico para o teor de RSU desejado na mistura de maneira a verificar o maior peso específico aparente seco possível de ser obtido em campo;
- A análise dos resultados obtidos para o índice de suporte Califórnia, cujo critério para utilização como corpo de aterro define que o material deve possuir  $ISC \geq 2\%$ , revela que as misturas solo-RSU compostado utilizada atendem ao necessário;
- Os valores encontrados para a expansão das misturas solo-RSU compostado, cujo critério define que deve ser menor ou igual a 4% para utilização em corpo de aterro, indicam que as misturas com 2,5%, 5,0% e 7,5% são capazes de atender ao estabelecido. Já as misturas com teores de 12,5% e 17,5% excedem o valor limite, não podendo ser utilizadas;
- Os resultados encontrados para a permeabilidade partiram, para critério de análise, da recomendação normativa prevista pela NBR13896/1997 que apresenta recomendação de valor inferior a  $10^{-8}$  m/s para ser utilizado como cobertura de aterro sanitário. O solo puro utilizado apresentava permeabilidade de  $10^{-7}$  m/s e as misturas apresentaram tendência a sofrer aumento no resultado obtido a medida em que os teores de RSU-compostado aumentavam. As misturas com 2,5%, 5,0% e 7,5% apresentaram resultados próximos ao verificado para o solo puro, sendo um indicativo de potencial de utilização. Em contrapartida, as misturas com 12,5% e 17,5% apresentaram elevação dos valores de permeabilidade obtidos, não tendo sua utilização recomendada;

- Dentre as possibilidades de utilização indicadas no item 2.4 deste trabalho, os materiais estudados não foram capazes de atender os critérios estabelecidos para utilização como base e sub-base em estruturas de pavimentos.

A análise realizada neste trabalho apresentou como foco a viabilidade de utilização do RSU-compostado em mistura com solo puro sob o ponto de vista de atendimento a critérios mecânicos existentes. Entretanto, as discussões sobre viabilidade possuem um viés amplo e outros fatores devem ser levados também em consideração. As questões que envolvem os custos do processo, seja com relação a produção ou quanto ao transporte, invariavelmente devem ser colocadas em pauta para uma avaliação de custo/benefício final.

Além de o solo a ser utilizado possuir características adequadas no local pretendido, o processo de produção do RSU compostado deve ser realizado com a maior proximidade possível em relação ao local em que for destinada sua utilização. Isso implicará em redução nos valores necessários ao transporte do material e também reduzirá a emissão de poluentes por parte dos veículos utilizados, fator que também possui relevância quando analisado o benefício ambiental de maneira global.

Ainda que o fator custo tenha participação relevante nas questões a respeito da decisão por se optar por iniciar um processo ou não, cumpre salientar que essa importância deve por vezes ser relativizada. Um processo pode não apresentar vantagem financeira imediata, porém os benefícios qualitativos obtidos através de sua implantação por vezes podem ser mais importantes quando observado o contexto geral – visão que tem extrema importância para as decisões que envolvem o zelo pelo ambiente em que vivemos.

Como sugestões para pesquisas futuras, são apresentadas:

- avaliar o impacto da elevação da energia de compactação nos resultados obtidos para as propriedades avaliadas;

- realizar ensaios triaxiais dinâmicos com vistas à verificação do módulo de resiliência das misturas;
- realizar ensaios de resistência ao cisalhamento com as misturas solo-RSU compostado;
- avaliar o uso das misturas solo-RSU compostado em aterro de solo reforçado;
- utilizar solo puro compactado com permeabilidade da ordem de  $10^{-9}$  m/s, ou preferencialmente inferior, de forma a se verificar a viabilidade da aplicação das misturas em coberturas de aterro sanitário;
- ampliar as discussões inserindo o fator custo nas análises, realizando um comparativo entre estimativas para aterros realizados apenas com solo puro e aterros utilizando misturas solo-RSU compostado.

## REFERÊNCIAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600. Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 1997.

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508. Determinação da Massa Específica dos grãos.** Rio de Janeiro, 1984.

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

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895. Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

ARAUJO, P. S. **Análise do Desempenho de um Solo Compactado Utilizado na Camada de Cobertura de um Aterro Sanitário.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017.** Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 19 Out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020.** Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 22 Mai. 2021.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4943-18. Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion Method.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

BRASIL. **Compostagem.** Ministério do Meio Ambiente. 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/7594-compostagem.html>> Acesso em 23 Abr. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Ministério do Meio Ambiente. 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>> Acesso em 23 Abr. 2020.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377-7:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes.** London, UK.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2008.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; SILVEIRA, R. M. B. **Execução de Camada de Cobertura Final de Aterros Sanitários de Grande Porte – Estudo de Caso do Aterro Sanitário de Belo Horizonte.** In: Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental, 7., Simpósio Brasileiro De Geossintéticos, 6., 2011, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: REGEO/Geossintéticos, 2011.

CATAPRETA, C.A.A.; SIMÕES, G.F. **Monitoramento Ambiental e Geotécnico de Aterros Sanitários.** VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande, PB. 2016.

CHIEMCHAISRI, C., CHIEMCHAISRI, W., KUMAR, S., WICRAMARACHCHI, P. N. **Reduction of Methane Emission from Landfill Through Microbial Activities in Cover Soil: A Brief Review.** Critical reviews in environmental science and technology, v. 42, n. 4, p. 412-434. 2012.

CHIEMCHAISRI, C., CHIEMCHAISRI, W., KUMAR, S., WICRAMARACHCHI, P. N. **Reduction of Methane Emission from Landfill Through Microbial Activities in Cover**

**Soil: A Brief Review.** Critical reviews in environmental science and technology, v. 42, n. 4, p. 412-434. 2012.

**COSTA, C.M.C. Avaliação da Fissuração por Ressecamento em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários Utilizando Materiais Alternativos.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 163 p. 2015.

**COSTA, M. D. Estudos de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas de Solos.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

**DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-IE 005/94. Solos - adensamento.** Rio de Janeiro, 1994.

**DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 108/2009 - ES. Terraplenagem - Aterros - Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2009.

**DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 139/2010 - ES. Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010.

**DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 141/2010 – ES. Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010.

**FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Orientações Técnicas para Atendimento da Deliberação Normativa 118/2008 do Conselho Estadual de Política Ambiental.** Belo Horizonte. 48 p.; il. 2008.

**FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais em 2017.** Belo Horizonte. 135p.: il. 2018.

**HAMDI, N.; SRASRA, E. Hydraulic Conductivity Study of Compacted Clay Soil Used as Landfill Liners for an Acidic Waste.** Waste Management, v.33, n.1, p.60-66, 2013.

**HENKEN-MELLIES, W. U.; SCHWEIZER, A. Long-Term Performance of Landfill Covers-Results of Lysimeter Test Fields in Bavaria (Germany).** Waste Management & Research, v. 29, n. 1, p. 59-68. 2011.

**IZZO, R. L. S.; MAHLER, C. F.; ROSE, L. Barreira Capilar Construída com Resíduo Pré-Tratado Mecânicamente e Biologicamente.** Eng Sanit e Ambient, v. 18, n. 4, p. 303-312. 2013.

**Lira, B. S. Uso de Composto Orgânico como Material Componente para Camada de Cobertura Oxidativa.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de

Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 2017.

LODI, P.C.; ZORNBERG, J.G.; BUENO, B. S. **Uma Breve Visão Sobre Geossintéticos Aplicados a Aterros Sanitários.** Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 30, n. 2, p. 188-197, dez. 2009.

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.

MALHER et al. **Lixo Urbano: o que você precisa saber sobre o assunto.** 192p. 2012.

O GLOBO. **Crivella apresenta equipamento doado à Comlurb que aumenta a capacidade de compostagem de resíduos.** 2018. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/crivella-apresenta-equipamento-doadoo-comlurb-que-aumenta-capacidade-de-compostagem-de-residuos-23008413>> Acesso em: 25 Set. 2019.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Agenda 2030 | ONU Brasil.** 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>> Acesso em: 19 Out. 2019.

ORNELAS-FERREIRA, B. **Estratégias Operacionais para o Incremento da Metanização em Estado Sólido de Resíduos Orgânicos Urbanos com Vistas ao Aproveitamento Energético do Biogás.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2019.

ORNELAS-FERREIRA, B. et al. **Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro – Brazil.** Renewable Energy, v. 146, p. 1976-1983, 2019.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** Editora Oficina de Textos, São Paulo. 2000.

RECESA - Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento: nível 2.** Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte. 120 p. 2008.

REDDY, E. N. YARGICOGLU, K. R. **Effects of Biochar and Wood Pellets Amendments Added to Landfill Cover Soil on Microbial Methane Oxidation: A Laboratory Column Study.** Journal of Environmental Management, v. 193, p. 13. 2017.

RIGHI, J. A. **Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Brasil: Desafios e Oportunidades.** Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnica. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2018.

RIGHI, J. A. **Estudo do Comportamento de Barreira Capilar em Aterros de Resíduos. Dissertação de mestrado.** UFRJ/ COPPE. Rio de Janeiro. 2011.

RIGHI, J. A. **Proposta de índice de avaliação de aterros de resíduos desativados a partir do potencial poluidor do lixiviado.** Tese de doutorado. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 2017.

ROSE, J.L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - UFRJ, 203p. 2009.

Santos, G. M. **Comportamento Hidromecânico de Solo e das Misturas Solo-Composto Utilizados em Camadas de Cobertura no Aterro Experimental da Muribeca, Pernambuco.** Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2015.

SANTOS, J. J. N. **Avaliação Geotécnica de Misturas de Solo e Composto Orgânico para Uso Como Biocoberturas em Aterros Sanitários.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 2019.

SILVA, T. F. **Estudo de Mistura de Solos para Impermeabilização Eficiente de Camada de Base de Aterros Sanitários.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 2017.

SOARES, N.D.; FAYER, S.K.; RIGHI, J. A. **Estudo de Barreiras Impermeabilizantes para Camada de Cobertura de Aterros de Resíduos.** VI Congresso de Engenharia Civil – CONENGE. 15 p. 2019.

TEIXEIRA, C.E. et al. **Estudos sobre a Oxidação Aeróbia do Metano na Cobertura de Três Aterros Sanitários no Brasil.** Eng Sanit e Ambient, v. 14, n. 1, 209. p. 99-108. 2009.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G.; Eds. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Brasília, DF. Embrapa, 2017.

TRAVAR, I. et al. **Development of Drainage Water Quality From a Landfill Cover Built With Secondary Construction Materials.** Waste Management, [s.l.], v. 35, p.148-158, jan. 2015.