



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO**

HERMELINDO VIEIRA DE BARROS JUNIOR

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM
COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS**

Maceió
2025



HERMELINDO VIEIRA DE BARROS JUNIOR

Viabilidade da utilização de resíduos da construção civil em cobertura final de aterros sanitários

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador (a): Prof. Dr. Daniel Pinto
Fernandes

Maceió
2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

B277v Barros Junior, Hermelindo Vieira de.
Viabilidade da utilização de resíduos da construção civil em cobertura final de aterros sanitários / Hermelindo Vieira de Barros Junior. – 2024.
53 f. : il. color.

Orientador: Daniel Pinto Fernandes.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 49-53.

1. Agregado reciclado. 2. Camada de cobertura. 3. Aterro Sanitário - Maceió (AL).
I. Título.

CDU: 628.472.3(813.5)



Folha de Aprovação

HERMELINDO VIEIRA DE BARROS JÚNIOR

VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.
Em: 25 /02 /2025

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL PINTO FERNANDES
Data: 27/02/2025 15:59:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes
(Orientador - PPGRHS/ CTEC/UFAL)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br KARINA RIBEIRO SALOMON
Data: 11/03/2025 18:00:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Karina Ribeiro Salomon
(Examinadora Interna – PPGRHS/ CTEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br RONDERSON QUEIROZ HILARIO
Data: 28/02/2025 07:28:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ronderson Queiroz Hilário
(Examinador Externo à Instituição - UFMG)

Dedico

À minha esposa, Gisele Sevigne, e aos meus filhos Miguel, Maria Eduarda e Pedro, pelo amor a mim dedicado e por compreenderem a importância deste trabalho. A toda minha família pela amizade e pelo estímulo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que me tem proporcionado e por me fazer uma pessoa melhor a cada dia.

A minha, esposa Gisele, pela paciência e por ser acima de tudo uma amiga, companheira e por entender a importância desse mestrado para mim e para nossa família.

Aos meus filhos Miguel, Maria Eduarda e Pedro, pela compreensão dos meus momentos de ausência em reuniões familiares e em alguns momentos de lazer.

Aos meus pais Hermelindo e Aldenice pela criação, educação que deram a mim e aos meus irmãos, pelo incentivo aos estudos e por tudo que já fizeram por mim.

Ao meu orientador professor Drº Daniel Pinto Fernandes, por sua competência, paciência e toda ajuda disponibilizada para conclusão desse trabalho.

Aos colegas técnicos do laboratório de solos da Ufal, Basilio Junior e Marcos Wanderley, pelo acolhimento, por toda ajuda nos ensaios e grandes ensinamentos de vida.

Aos bolsistas do laboratório de solos, envolvidos no projeto, por sua contribuição nos ensaios.

A todos os professores do PPGRHS, pelos ensinamentos transmitidos em suas aulas.

Aos meus colegas de turma pela grande ajuda e convívio gratificante.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta, para que eu pudesse trilhar todo esse caminho até o final do curso.

RESUMO

A crescente preocupação com a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos tem impulsionado análises mais aprofundadas sobre o potencial de reutilização de materiais provenientes da construção civil e demolição. Este estudo concentra-se na avaliação do agregado reciclado obtido a partir do beneficiamento desses resíduos, misturados com solo, visando à sua aplicação como substituto dos agregados naturais em camadas de revestimento final de aterros sanitários, com foco no município de Maceió. A pesquisa investiga as características físicas, químicas e ambientais do resíduo de demolição (RD) beneficiado, oriundo de uma área afetada por subsidência do solo que atingiu cinco bairros de Maceió, onde as demolições de edificações geraram grande quantidade de resíduos. Foram analisados o solo, o RD e misturas em diferentes proporções: 85% RD + 15% solo, 70% RD + 30% solo e 60% RD + 40% solo, sendo esta última a que apresentou melhores condições nos principais parâmetros para camadas de revestimento. Os parâmetros analisados incluem resistência ao cisalhamento, erodibilidade e condutividade hidráulica das misturas, enquanto a caracterização química, realizada por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, identificou os elementos presentes nas amostras. A caracterização ambiental envolveu ensaios de lixiviação e solubilização, que garantiram a confiabilidade do material para uso em solo. Os resultados mostram que a mistura com 60% de RD e 40% de solo apresenta características típicas de solo granular, com densidade máxima de 1,68 g/cm³, umidade ótima de 17,35%, ângulo de atrito interno de 24,56° na condição inundada e coeficiente de permeabilidade da ordem de 10⁻⁶ cm/s. Este material demonstrou ser erodível, não dispersivo, classificado como não inerte e não perigoso, sugerindo sua viabilidade para camadas de cobertura de aterros sanitários e outras potenciais aplicações na gestão de resíduos.

Palavras-chave: Agregado reciclado; Camada de Cobertura; Aterro Sanitário; Maceió-AL.

ABSTRACT

The growing concern for the sustainable management of urban solid waste has driven more in-depth analyses of the potential reuse of materials derived from construction and demolition waste. This study focuses on evaluating the recycled aggregate obtained from the processing of these residues, mixed with soil, aiming to use it as a substitute for natural aggregates in the final cover layers of sanitary landfills, with a specific focus on the municipality of Maceió. The research investigates the physical, chemical, and environmental characteristics of the processed demolition waste (DW), sourced from an area affected by soil subsidence that impacted five neighborhoods in Maceió, where building demolitions generated a significant amount of waste. The study analyzed the soil, the DW, and mixtures with different proportions: 85% DW + 15% soil, 70% DW + 30% soil, and 60% DW + 40% soil, with the latter demonstrating the best conditions across key parameters for cover layers. The parameters assessed include shear strength, erodibility, and hydraulic conductivity of the waste-soil mixtures, while chemical characterization, conducted through X-ray diffraction and scanning electron microscopy, identified the elements present in the samples. Environmental characterization involved leaching and solubilization tests, ensuring the material's reliability for soil use. The results indicate that the mixture containing 60% DW and 40% soil exhibits typical granular soil characteristics, with a maximum dry density of 1.68 g/cm^3 , an optimum moisture content of 17.35%, an internal friction angle of 24.56° under saturated conditions, and a permeability coefficient on the order of 10^{-6} cm/s . This material proved to be erodible, non-dispersive, classified as non-inert and non-hazardous, suggesting its viability for use in landfill cover layers and other potential applications in waste management.

Key-words: Recycled aggregate; Cover Layer; Sanitary Landfill, Maceio-AL.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:CLASSIFICAÇÃO DOS RCD RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307/2002	23
FIGURA 2: MAPA DE MACEIÓ, COM DESTAQUE PARA ÁREA AFETADA.....	27
FIGURA 3 - CAMADAS DE UM SISTEMA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO	31
FIGURA 4 - CAMADAS DE UM SISTEMA DE COBERTURA FINAL	34
FIGURA 5 - MATERIAL TRAZIDO AO LABORATÓRIO DE SOLOS PARA ANÁLISES.	40
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DE MATERIAL EM PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE	41
FIGURA 7: PENEIRAMENTO PARA ENSAIO DE GRANULOMETRIA.	42
FIGURA 8 - CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA RD (GRANULOMETRIA).....	42
FIGURA 9 - ENSAIO DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	44
FIGURA 10: ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ.	45
FIGURA 11: ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE.	46
FIGURA 12 - AMOSTRAS DE SOLO E MISTURA (70-30) EM PREPARAÇÃO PARA ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	48
FIGURA 13: ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.	49
FIGURA 14: ENSAIO DE PERMEABILIDADE.	50
FIGURA 15:PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE E VARIÁVEL	51
FIGURA 16: MOLDURAS E PAPEL FILTRANTE	52
FIGURA 17: FLUXOGRAMA ENSAIO DE CURVA CARACTERÍSTICA	53
FIGURA 18: ESQUEMA DO ENSAIO DE DISPERSÃO RÁPIDA.	54
FIGURA 19: FLUXOGRAMA DO ENSAIO DE DISPERSÃO RÁPIDA.	55
FIGURA 20: AMOSTRAS PRONTAS PARA ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO.....	56
FIGURA 21: ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO COM AMOSTRA TOTALMENTE SUBMERSA.	57
FIGURA 22: FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO ENSAIO DE DEGRADAÇÃO.....	58
FIGURA 23: PRENSA UTILIZADA PARA ENSAIOS DE CISALHAMENTO.....	60
FIGURA 24: MOLDAGEM E SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO.	61
FIGURA 25:CORPO DE PROVA PÓS CISALHAMENTO.	61
FIGURA 26: EQUIPAMENTO DIFRATÔMETRO DRX-6000 DA SHIMADZU.	62
FIGURA 27: MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV.....	64
FIGURA 28: AGITADOR ROTATIVO PARA EXTRATO LIXIVIADO	66
FIGURA 29: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO	67
FIGURA 30:FILTRAÇÃO E LEITURA DAS AMOSTRAS EM ESPECTROFOTÔMETRO	68

FIGURA 31: CURVA GRANULOMÉTRICA, SOLO MUTANGE.	70
FIGURA 32: CURVA GRANULOMÉTRICA, 100% RD.....	71
FIGURA 33: CURVA GRANULOMÉTRICA, MISTURA 85% RD/15% SOLO.....	73
FIGURA 34:CURVA GRANULOMÉTRICA, MISTURA 70% RD / 30% SOLO.....	74
FIGURA 35:CURVA GRANULOMÉTRICA, MISTURA 60% RD / 40% SOLO.....	75
FIGURA 36:CURVA COMPARATIVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	76
FIGURA 37: CURVA DE COMPACTAÇÃO RD.....	80
FIGURA 38: CURVAS DE COMPACTAÇÃO SOLO.....	80
FIGURA 39: CURVA DE COMPACTAÇÃO MISTURA 85%- 15%	81
FIGURA 40:CURVA DE COMPACTAÇÃO 70%-30%	81
FIGURA 41:CURVA DE COMPACTAÇÃO 60%-40%	82
FIGURA 42: CURVA COMPACTAÇÃO COMPARATIVA.	82
FIGURA 43:GRÁFICO DE CURVA CARACTERÍSTICA.....	86
FIGURA 44: ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA 60/40.....	89
FIGURA 45:ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA SOLO, RD E MISTURA 60/40	90
FIGURA 46:GRÁFICO DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: FONTE GERADORA E COMPONENTES DO RCD.	29
TABELA 2: CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PLASTICIDADE (BURMISTER, 1949).....	47
TABELA 3: PERCENTAGEM DE ARGILA, SILTE, AREIA E PEDREGULHO NAS AMOSTRAS.	76
TABELA 4: DENSIDADE REAL DOS GRÃOS, QUADRO COMPARATIVO.....	78
TABELA 5:ÍNDICE DE PLASTICIDADE.....	79
TABELA 6:UMIDADE ÓTIMA E DENSIDADE MÁXIMA.....	83
TABELA 7: RESULTADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE	85
TABELA 8:RESULTADO DOS ELEMENTOS EDX.	92
TABELA 9: CONCENTRAÇÃO DE METAIS NO RCC – ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO	93
TABELA10: CONCENTRAÇÃO DE METAIS NA MISTURA 60%-40% –ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO	94

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1:CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS NOS CANTEIROS DE OBRAS.....	24
QUADRO 2: COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM FUNÇÃO AO TIPO DE SOLO.	37
QUADRO 3:CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA PARA O ENSAIO DE DISPERSÃO RÁPIDA.	55
QUADRO 4:CATEGORIZAÇÃO DO ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO.	59
QUADRO 5:AValiação QUALITATIVA DO ENSAIO DE DISPERSÃO RÁPIDA.	88

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1: DETERMINAR O ÍNDICE DE PLASTICIDADE.....	47
EQUAÇÃO 2: DETERMINAR O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.	50
EQUAÇÃO 3: DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE CARGA VARIÁVEL.....	51
EQUAÇÃO 4: PARA UMIDADES DO PAPEL FILTRO $> 47\%$	54
EQUAÇÃO 5: PARA UMIDADES DO PAPEL FILTRO $\leq 47\%$	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATT – Área de Transbordo e Triagem de Resíduos da Construção Civil

CCL – Revestimento de argila compactado

CU - Coeficiente de uniformidade

CC – Coeficiente de curvatura

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

GCL – Revestimento de argila geossintético

IP – Índice de Plasticidade

K0 – Condutividade Hidráulica

LL – Limite de Liquidez

LP -Limite de Plasticidade

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Técnica Brasileira

RCD – Resíduo de Construção Civil e Demolição

RD – Resíduo de demolição

SM – Solo Mutange

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS E METAS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Definições, Conceito e Classificação	21
3.1.1 Definição	21
3.1.2 Classificação	23
3.2 Histórico	26
3.3 Composição dos Resíduos de Construção Civil	28
3.4 Emprego de Resíduos em Diversas Finalidades	30
3.5 Sistema de Cobertura de Aterro	30
3.6 Fatores Avaliados No Projeto Do Sistema De Cobertura Final.....	31
3.7 Cobertura	32
3.7.1 Tipos de Cobertura	32
3.7.2 Componentes de Uma Cobertura Final	33
3.8 Coberturas Alternativas.....	36
3.9 Comportamento Geotécnico da Estrutura de Cobertura.....	36
3.9.1 Normas e Aspectos Legais.....	37
4 METODOLOGIA.....	40
4.1 Introdução	40
4.2 Coleta da Amostra	40
4.3 Caracterização Física	41
4.3.1 Preparação de Material Para Análise.....	41
4.3.2 Análise Granulométrica.....	41
4.3.3 Densidade Real dos Grãos.....	43
4.3.4 Limites de Consistência.....	44
4.3.4.1 Limites de Liquidez.....	44
4.3.4.2 Limites de Plasticidade.....	46
4.3.5 Ensaio de Compactação.....	47
4.3.6 Ensaio de Condutividade Hidráulica	49

4.3.7 Curva Característica	52
4.3.8 Ensaio de Erodibilidade.....	54
4.3.8.1 Ensaio de Dispersão Rápida	54
4.3.8.2 Ensaio de Desagregação	56
4.3.9 Ensaio de Cisalhamento Direto	59
4.4 Caracterização Química.....	62
4.4.1 Difração de Raio X.....	62
4.4.2 Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raios X (EDX).....	63
4.5 Classificação Ambiental.....	64
4.5.1 Ensaio de Lixiviação	66
4.5.2 Ensaio de Solubilização.....	66
5 RESULTADOS	69
5.1 Caracterização Física	69
5.1.1 Ensaio de Granulometria	69
5.1.2 Ensaio de Densidade Real dos Grãos	76
5.1.3. Ensaio de Limites de Consistência	78
5.2 Ensaio de Compactação	79
5.3 Ensaio de Permeabilidade.....	84
5.4 Ensaio de Curva Característica	85
5.5 Ensaio de Erodibilidade	85
5.5.1 Ensaio de Dispersão Rápida	88
5.5.2 Ensaio de Desagregação	86
5.6 Ensaio de Cisalhamento Direto	89
5.7 Caracterização Química.....	91
5.7.1 Difração de Raio X.....	91
5.7.2 Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raios X (EDX).....	91
5.8 Classificação Ambiental	93
5.8.1 Ensaio de Lixiviação	93
5.8.2 Ensaio de Solubilização.....	94
6 CONCLUSÕES	95
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	96
7 REFERÊNCIAS	98

1. INTRODUÇÃO

A importância dos temas ligados à preservação do meio ambiente nos diversos setores da economia e nas políticas públicas governamentais tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas. Com isso, as questões associadas à geração de resíduos sólidos urbanos causam grande inquietação para a população a nível global, colocando pressão sobre toda a sociedade civil para buscar soluções sustentáveis para o problema.

No Brasil, a urbanização acelerada nas áreas municipais tem intensificado a necessidade de obras de construção civil, setor que gera impactos significativos no meio ambiente. O elevado consumo de recursos naturais, em sua maioria não renováveis, aliado ao grande volume de resíduos produzidos durante as obras, traz consequências preocupantes. Quando esses resíduos não recebem o tratamento e descarte adequados, podem resultar em problemas como o assoreamento de corpos hídricos, a obstrução de sistemas de drenagem e o aumento de focos de agentes transmissores de doenças. Esses processos contribuem diretamente para a degradação ambiental e afetam negativamente a qualidade de vida da população (CONAMA, 2011).

A geração de resíduos é uma das principais causas de degradação ambiental. Algumas medidas que buscam reduzir os prejuízos causados pelos resíduos, são: diminuição da sua geração, reciclagem e reutilização. Para que seja possível essa redução, é necessário analisar os processos produtivos, buscando uma significativa diminuição dos resíduos (FERNANDES, 2005). A reutilização ou reciclagem é um processo que envolve uma análise completa dos resíduos para determinar uma finalidade de reuso, buscando reduzir custos. Desse modo, a redução do volume gerado muitas vezes está relacionada a limitações técnicas e operacionais difíceis de contornar (MASUERO, 2001). Por outro lado, a reciclagem é uma alternativa bastante aplicada.

Grande parte dos resíduos gerados em canteiros de obras possui potencial para ser reutilizada ou reciclada, servindo como matéria-prima para a produção de agregados em diversos processos construtivos. Entre as aplicações possíveis estão a fabricação de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas, argamassas de revestimento, bem como camadas de base e sub-base para pavimentação. De acordo com a resolução Conama 307/2002, modificada pela nº 448/2012, esses resíduos são classificados como pertencentes à classe A e não devem ser descartados em aterros de resíduos sólidos urbanos, áreas de despejo descontrolado, encostas, corpos hídricos, terrenos baldios ou regiões protegidas por legislação específica

(CONAMA, 2012). Contudo, a falta de mercados consolidados para os produtos reciclados faz com que esses materiais permaneçam por longos períodos em aterros de classe A, destinados à reservação para usos futuros (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Nesse contexto, o tema vem sendo amplamente discutido no meio técnico-científico, enfatizando a diminuição do desperdício, o reuso e a reciclagem de materiais, pois contribuem para a preservação do meio ambiente, ao conservar os recursos naturais e reutilizar resíduos que normalmente seriam descartados em aterros ou em locais públicos. Esses debates vêm crescendo consideravelmente e são impulsionados principalmente por uma maior consciência ambiental da sociedade e pela rigorosa legislação ambiental (RIOS, 2016).

A produção contínua de resíduos causa danos ao meio ambiente, resultando em problemas sociais e econômicos em várias partes do mundo. Por esse motivo, alguns países estão se esforçando para lidar com esse problema por meio de pesquisas acadêmicas visando à reciclagem desses resíduos. Devido à dificuldade em encontrar locais apropriados para o descarte e à escassez de recursos naturais, a busca pela economia se torna cada vez mais frequente. (FERREIRA, 2009).

A construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do Brasil, empregando uma grande força de trabalho e impulsionando a economia nacional. No entanto, essa atividade também se destaca como uma das principais responsáveis pela geração de resíduos sólidos, produzidos em diversas fases, desde a fabricação de materiais e componentes até a construção, manutenção, modernização e, por fim, a demolição de edificações. Cerca de 40% dos materiais agregados utilizados na indústria da construção são extraídos diretamente de recursos naturais, o que exige uma abordagem cautelosa, dado o impacto ambiental significativo da exploração em larga escala em diversos países. (JOHN, 2011).

De acordo com estimativas da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), em 2021, o Brasil gerou aproximadamente 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD), o que corresponde a uma média de 227 kg por habitante. Esse valor representa um aumento de 2,9% em relação ao ano anterior. Estima-se que cerca de 30% dos resíduos sólidos urbanos no país sejam provenientes da construção civil. Apesar de a maioria desses materiais ser potencialmente reciclável, apenas cerca de 16% são reaproveitados, com a produção anual de agregados reciclados variando entre 16 e 21 milhões de toneladas

Um fator muito importante que influencia a geração de resíduos na construção está relacionado com o nível de desenvolvimento social, cultural e econômico das áreas urbanas. Isso acontece porque o crescimento econômico está ligado ao aumento da atividade construtiva, o que por sua vez aumenta a demanda por materiais e energia. Isso pode levar a um aumento na quantidade de resíduos gerados durante os processos de construção. No Brasil, é importante destacar que a falta de moradias é um dos principais motivos para a construção de novas habitações, o que também contribui para a geração de resíduos.

A forma correta de tratar os resíduos da construção e demolição (RCD) é estabelecida pela resolução CONAMA n° 307 (Brasil, 2002). Essa regulamentação determina que os RCDs devem ser gerenciados conforme sua categorização, com ênfase na promoção da reutilização e reciclagem. É fundamental ressaltar a relevância da gestão apropriada e destino adequado desses resíduos, destacando a responsabilidade compartilhada entre os produtores de resíduos e as autoridades públicas. Foi por esta razão que, em 2010, foi promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), visando a regular esta questão de maneira abrangente e sustentável.

Aproveitar o RCD resulta em uma menor exploração de recursos naturais, contribuindo para a conservação dos biomas, reduzindo os custos de obtenção de materiais naturais e aumentando a vida útil dos aterros. O RCD é extremamente versátil e possui diversas aplicações amplamente difundidas no meio acadêmico, como a confecção de blocos de concreto, argamassa para revestimentos, base e sub-base de pavimentos, produção de concretos magros não estruturais, entre outras. A reutilização, redução e reciclagem são opções adequadas para o destino do RCD, seguindo os princípios da sustentabilidade e eco eficiência na construção civil estabelecidos pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010).

No que diz respeito ao uso de resíduos de construção e demolição reciclados como material alternativo para cobertura de aterros sanitários, há pouca documentação disponível em literaturas técnicas. No entanto, de acordo com Koerner e Daniel (1997), alguns materiais provenientes de construção e demolição podem ser utilizados na camada final de cobertura. É sabido que, em muitos centros urbanos, como o aterro metropolitano de Jardim Gramacho, em Duque de Caxias - RJ, esses resíduos são usados empiricamente sem passar por nenhum processo de beneficiamento. Também foi constatado que na cidade de Belo Horizonte - MG, existe um aterro sanitário onde o resíduo de construção e demolição (não beneficiado) tem sido

utilizado como camada diária de cobertura, porém com monitoramento e avaliação da compactação desse material (SIMÕES ET AL., 2005).

Nesse contexto, as instituições de pesquisa e universidades brasileiras têm direcionado significativa atenção para a formulação de propostas destinadas a solucionar as problemáticas inerentes a esse setor. O desenvolvimento de investigações relacionadas a essa temática tem sido constante, com vários pesquisadores contribuindo de maneira substancial. Este projeto, por exemplo, faz referência a algumas dessas contribuições. Nesse cenário, torna-se evidentemente necessário conceber soluções e alternativas que não apenas atenuem, mas que também redefinam o impacto ambiental originado pela indústria da construção.

2. OBJETIVOS E METAS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aproveitamento do material proveniente dos resíduos de demolição (RD) como uma alternativa viável em substituição aos agregados naturais em um sistema de cobertura final de aterro sanitário no município de Maceió-AL.

2.2 Objetivos Específicos

- I. Realizar a avaliação das características físicas e do comportamento mecânico do agregado reciclado, comparando seus parâmetros de densidade, condutividade hidráulica e grau de compactação com os requisitos estabelecidos pelas Normas Brasileiras para agregados naturais. Para isso, serão realizados ensaios como distribuição granulométrica, densidade real dos grãos, teste de compactação, permeabilidade, curva característica, teste de erosão e ensaio de cisalhamento direto, possibilitando a verificação da viabilidade técnica da incorporação do agregado reciclado em coberturas finais de aterros sanitários.
- II. Analisar os requisitos técnicos estabelecidos para camada final do sistema de cobertura e verificar se esses critérios são adequados aos parâmetros observados no agregado reciclado proveniente de resíduos de demolição.
- III. Realizar uma avaliação ambiental da amostra do agregado reciclado com o objetivo de identificar a possível presença de componentes poluentes.
- IV. Realizar uma análise química da amostra de agregado reciclado proveniente de RD, com o objetivo de identificar os compostos mineralógicos por meio da técnica de difração de raios-X e a identificação dos elementos presentes com o uso de microscopia eletrônica de varredura.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Definições, conceito e classificação

3.1.1. Definição

De acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004/2004, resíduo sólido é o que resulta de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição. Essa definição inclui os lodos originados de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, além de certos líquidos com características que inviabilizam seu descarte na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou que demandam soluções técnicas e economicamente inviáveis em relação à melhor tecnologia disponível.

O termo "resíduo de construção e demolição" abrange os restos e descartes resultantes de edificações recém-criadas, reformas e processos de demolição, conforme descrito por (Barros, 2005). De acordo com a resolução CONAMA nº 307/2002, o conceito de "resíduo de construção e demolição" engloba os entulhos resultantes de empreendimentos de construção, reformas, ajustes e desmontagens de estruturas civis, além dos materiais oriundos da preparação do solo e das escavações. Essa categoria compreende uma variedade de elementos, incluindo tijolos, blocos cerâmicos, concreto em suas diferentes formas, solos, rochas, metais, resinas, adesivos, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, sistemas de tubulação e fiação elétrica, frequentemente referidos como "entulho de obras", "caliça" ou "metralha".

Para uma melhor compreensão do assunto, a resolução CONAMA nº 307/2002 fornece definições adicionais no Artigo 2 que são pertinentes para o entendimento do tema. Segundo o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o Artigo 2 da referida resolução estabelece as seguintes definições:

- II. Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;
- III. Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;
- IV. Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

- V. Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;
- VI. Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação dele;
- VII. Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo após ter sido submetido à transformação;
- VIII. Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto. (BRASIL, 2002)

Para complementar esta série de definições que auxiliam na compreensão do assunto no Artigo 2 da Resolução CONAMA 448 de 2012, apresenta-se as seguintes definições complementares:

- IX. Aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros: é a área tecnicamente adequada onde serão empregadas técnicas de destinação de resíduos da construção civil classe A no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente e devidamente licenciado pelo órgão ambiental competente;
- X. Área de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos (ATT): área destinada ao recebimento de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, para triagem, armazenamento temporário dos materiais segregados, eventual transformação e posterior remoção para destinação adequada, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;
- XI. Gerenciamento de resíduos sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010;
- XII. Gestão integrada de resíduos sólidos: conjunto de ações voltadas para encontrar soluções para os resíduos sólidos, levando em consideração os aspectos políticos, econômicos, ambientais, culturais e sociais, com participação social e com o objetivo do desenvolvimento sustentável. (BRASIL, 2002)

3.1.2 Classificação

A figura 1, classifica e diferencia os resíduos em categorias de A a D, descrevendo-os como resíduos reutilizáveis, recicláveis para outras finalidades, com aplicações economicamente inviáveis ou sem tecnologia para reciclagem e resíduos perigosos. Também são apresentados exemplos de utilização, conforme Santos (2011), com base na resolução CONAMA nº 307/2002.

Figura 1: Classificação dos RCD resolução CONAMA nº 307/2002



Fonte: HB Ambiental (2020)

Em adição ao primeiro quadro, a Resolução **CONAMA 307/2002** apresenta em seu Artigo 3, as seguintes categorias para os tipos de resíduos:

I – Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição,
- b) etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem

como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (BRASIL, 2002)

Para facilitar a identificação dos resíduos gerados na construção civil e demolição estão classificados no Quadro 1. Vale destacar que a classificação varia a partir da aglomeração de um material com outro.

Quadro 1:Classificação dos resíduos gerados nos canteiros de obras.

Resíduo	Descrição	Classificação (CONAMA Nº 307)	Classificação (NBR 10.004)
Metralha tipo A	Materiais a base de cimento	A	II-B
Metralha tipo B	Materiais a base de cimento, areia, brita, solo etc.	A	II-B
Metralha tipo C	Metralha tipo B + gesso	C	II-A
Solo	Resíduos de solo	A	II-B
Gesso	Resíduos de gesso	C	II-A
Plástico	Aparas de plástico não contaminados por produtos químicos	B	II-B
Madeira	Pequenos pedaços de madeira	B	II-B
Pó-de-Serra	Pó-de-serra produzido nas atividades de marcenaria	B	II-B
Papel Branco	Aparas de papel de escritório etc.	B	II-B
Papel Sujo	Sacos de cimento, argamassas, caixas de cerâmica etc.	B	II-B

Metal	Pedaços de armaduras, pregos, arames de amarração etc.	B	II-B
Manta Asfáltica	Pequenos pedaços de manta asfáltica	D	I
Amianto	Resíduos de telhas e demais materiais que contém amianto	D	I
Esquadrias usadas	Portas e janelas provenientes de demolição	B	II-B
Latas de Tinta	Latas de tinta contaminada	D	I ou II-A
Tambores contaminados	Tambores plásticos e de papelão contaminados por produtos químicos (selantes, desmoldantes, cola branca etc.).	D	I
Isopor	Restos de isopor usados nas lajes	B	II-B
Telas	Telas de proteção de poliéster etc.	B	II-B
Tecidos	Restos de uniformes usados e contaminados etc.	C	I ou II-A
Vidros	Restos de vidro de janelas, recipientes etc.	B	II-B
Resíduos Orgânicos	Restos de comidas etc.	-	II-A

Fonte: (Gusmão, 2008).

A NBR 10004-2004 vem acrescentando uma nova classificação para os resíduos de acordo com os riscos apresentados:

a) Resíduos classe I – Perigosos: Podem apresentar, periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

b) Resíduos classe II – Não perigosos:

c) Resíduos classe II A – Não inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta norma. Os resíduos classe II A não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

XII. Resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

3.2 Histórico

Segundo relatos, os Fenícios foram os primeiros a disseminar o uso de materiais reciclados como revestimento de pavimentos. Setecentos anos depois, os romanos também adotaram técnicas de reciclagem, como a britagem de alvenaria para produção de concreto, conforme Schulz e Hendricks (1992) e Leite (2001) mencionam. Na era moderna, a reciclagem entrou em declínio devido à crença de que a matéria-prima era abundante e o custo de reutilização e reciclagem era alto, o que resultou no afastamento desses resíduos dos grandes centros urbanos. No entanto, com os problemas causados pela Segunda Guerra Mundial, as quantidades de materiais recicláveis (entulho) cresceram exorbitantemente, e não havia local adequado para a sua disposição, o que levou à necessidade de utilização em larga escala. A reutilização do RCD (Resíduo de Construção e Demolição) começou a mudar a partir desse marco histórico, e em 1946, o desenvolvimento de técnicas inéditas e pesquisas na área de reutilização do RCD se tornaram o tema central, conforme evidenciado por Levy e Helene (2000).

Ocorreu na Alemanha, por exemplo, a geração e processamento de 600 milhões de metros cúbicos de resíduos até 1960, o que resultou na construção de 175.000 unidades habitacionais (Leite, 2001 e Levy, 1997). No Japão, em 1970, a reciclagem conseguiu reaproveitar 2/3 do RCD produzido na pavimentação (VÁSQUEZ e BARRA, 2000). Em países menores, a motivação para a utilização do RCD foi a escassez de áreas adequadas para disposição dos resíduos e a falta de matéria-prima, o que impulsionou a área de pesquisa Affonso, (2005).

3.3 Composição dos Resíduos de Construção Civil

O Resíduo de construção civil apresenta uma diversidade de características físicas, mantendo, contudo, uma consistência sólida e um perfil padronizado. Suas dimensões e geometrias são coerentes com os materiais de construção, abrangendo tanto componentes convencionais como plásticos, metais, argamassas, concretos, bem como fragmentos de madeira (ZORDAN, 2001).

Quando esse material tem origem de atividades construtivas, a composição do RCD inclui uma proporção de materiais separados, decorrente da natureza sequencial da aplicação desses materiais e da influência dos processos artesanais, o que concorre para o aumento da geração de resíduos. Por outro lado, nos casos em que o RCD se origina de demolições e reformas, observa-se a presença de fragmentos dos materiais em seu estado final, frequentemente unidos e interligados (PORTO E SILVA, 2008).

Segundo Barros (2005), diversos fatores desempenham um papel crucial para determinar a composição do RCD:

- a) O tipo de construção;
- b) O nível de desenvolvimento econômico e cultural da localidade;
- c) O tipo de material preponderante na região;
- d) A natureza da arquitetura das edificações;
- e) As técnicas específicas empregadas nos processos construtivos e de demolição.

As construções maiores têm um impacto direto nessas quantidades, pois contribuem com grandes volumes de resíduos. Portanto, essas construções causam alterações na composição e quantidade dos RCDs. (CARNEIRO ET AL., 2001)

De acordo com a caracterização realizada por Cabral e Lima (2013) em Fortaleza/CE, seguindo as recomendações da ABNT com a NBR 10.004/2004, foi constatado que areias e solos, juntamente com materiais cimentícios e cerâmicos, correspondem a 80% dos RCDs produzidos e estão distribuídos da seguinte forma: 24,6% de areia e solo, 22% em argamassa, 15,6% de concreto, 10,4% de tijolo branco. Os grupos cerâmicos vermelha e cerâmica de revestimento representam, respectivamente, 14,4% e 6,3%. A presença de gesso varia entre 4,9% e 5,1%, enquanto os outros 1,6% consistem em resíduos das classes C e D.

Foram encontrados valores em proporções diferentes em Vitória/ES de acordo com Ramos (2007). No entanto, os materiais mais influentes nesses quantitativos continuam a ser

areias, materiais cimentícios e materiais cerâmicos, distribuídos da seguinte forma: solo e areia variam de 22,9% a 44%; argamassas apresentam variações entre 10% e 23,2%; concreto representa de 4,6% a 18,1% do total; material cerâmico chega a 9,2%; e a rocha e brita encontradas na amostra variam de 0,8% a 5,8%, respectivamente.

Esses resultados evidenciam a ideia de que os materiais cimentícios e cerâmicos estão sempre presentes nos RCC em Salvador. Na composição do RCC encontrada, concreto e argamassa representam 53%, solo e areia representam 22%, material cerâmico representa 14%, rocha representa 5%, plástico representa 4% e outros materiais estão presentes em proporções de 2%, como gesso. (CARNEIRO ET AL., 2001).

No trabalho de Levy (1997) encontramos um índice da composição de RCD distribuído de acordo com a tabela 1:

Tabela 1: Fonte geradora e componentes do RCD.

Componentes presentes	Trabalhos Rodoviários (%)	Escavações (%)	Sobras de Demolição (%)	Obras diversas (%)	Sobra de limpeza (%)
Concreto	48,0	6,1	54,1	17,5	18,4
Tijolos	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira e lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,5	-	1,6	-	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira de construção	0,1	1,1	7,2	18,3	10,5

Papel e material orgânico	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Fonte: Levy (1997 apud Santos, 2009)

3.4 Emprego de Resíduos em Diversas Finalidades

Conforme assinalado por Gusmão (2008), é notável que entre 20% e 50% do total de recursos naturais explorados pela humanidade sejam destinados à indústria da construção civil. No contexto nacional, observa-se uma crescente implementação da reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em várias cidades do Brasil. Além da expansão cada vez mais acentuada dessa prática de reutilização, é evidente que o potencial de aplicação do RCD está longe de atingir seus limites.

Na cidade de São Paulo, o processo de reciclagem de RCD remonta aos anos 90, e os materiais resultantes desse processo têm sido empregados de forma diversificada, tais como na pavimentação de vias urbanas e como agregado na produção de concreto. Em paralelo, em Belo Horizonte, observa-se uma utilização disseminada não apenas para base de pavimentação, mas também para a produção de argamassas.

No tocante às possibilidades de aplicação, Noronha et al. (2005) apresentam várias alternativas além das já mencionadas, tais como a utilização de RCD após o processo de moagem para contenção de encostas, calçamento de concreto, produção de blocos e tubos para drenagem, bem como sua utilização em coberturas de aterros, entre outras aplicações. A diversificação de usos demonstra a versatilidade desse material e sua contribuição multifacetada para a sustentabilidade no setor da construção.

3.5 Sistema de Cobertura de Aterro

Barros (2005) afirmou que o sistema é estabelecido quando o espaço de armazenamento do aterro é totalmente utilizado, portanto a área precisa ser protegida para resguardar a saúde pública. Assim como outros sistemas como aterros de resíduos perigosos, projetos de ação corretiva etc., a cobertura dos aterros sólidos municipais é fragmentada, conforme esquema abaixo:

Figura 3 - Camadas de um sistema de cobertura de aterro sanitário



Fonte: (Koerner e Daniel, 1997).

Como método amplamente utilizado no mercado, utilizamos solos compactados com baixa condutividade hidráulica, sendo a cobertura o sistema que impede a liberação de gases para a atmosfera e impede a entrada de líquidos que agravariam a produção de lixiviado. (HUSE, 2007).

3.6 Fatores Avaliados no Projeto do Sistema de Cobertura Final

Conforme estabelecido pela NBR 13896/1997, é delineado um conjunto de etapas que deve ser seguido desde a concepção até o encerramento completo da utilização de um aterro. No contexto do planejamento de encerramento, é imprescindível que se inclua tanto o projeto quanto a execução da cobertura final do aterro de resíduos não perigosos, com o intuito de:

- a) Reduzir ao máximo a infiltração de água na célula de deposição;
- b) Demandar um mínimo de atividades de manutenção;
- c) Evitar ser suscetível à erosão;
- d) Permitir acomodações sem rachaduras ou fraturas;
- e) Apresentar um coeficiente de permeabilidade inferior àquele do solo natural da área em que o aterro está localizado.

Segundo foi observado por Catapreta (2008), ao determinar qual tipo de cobertura é mais adequado para um aterro, é necessário entender algumas características que dão

suporte à segurança e eficiência, como tentativas de reduzir as interações entre líquidos e/ou gases externos. O ambiente e o interior das células de resíduos têm uma barreira física de baixa permeabilidade. Esse material também pode ser diferenciado conforme as características climáticas da área onde o aterro está localizado mudam.

3.7 Cobertura

3.7.1 Tipos de Cobertura

As coberturas mais utilizadas e comumente encontradas na literatura são: cobertura convencional, coberturas evapotranspirativas e camadas oxidativas.

I. Cobertura Convencional

Segundo Pimentel (2006), as camadas tradicionais geralmente são aplicadas com uma camada de argila, que tem baixa permeabilidade a resíduos volumosos e não requer intermediário. Isso evita o contato com a precipitação, mas dependendo do clima da região onde é utilizado, pode causar problemas como ressecamento, trincas e trincas.

Barreira Capilar Simples

De acordo com as observações feitas por Costa (2015), uma síntese da técnica envolve a aplicação de uma camada de material granular, tipicamente areia, seguida por uma cobertura com material mais fino, como argila ou silte-argiloso. Nessa configuração, a água é retida na camada do material mais fino, impedindo sua penetração no interior do aterro, enquanto a camada granular acima promove o que se denomina de quebra hidráulica. Quando a camada superior fica saturada, ocorre um excesso de água que é absorvido pela camada inferior. Consequentemente, em caso de nova saturação, ocorre a drenagem da água para dentro do aterro.

Cobertura Evapotranspirativa

As coberturas de evapotranspiração são sistemas que utilizam diversos tipos de vegetação nativa para reduzir o escoamento superficial. O sistema age como uma esponja que coleta a umidade em uma ou mais camadas de solo que absorvem a umidade durante as chuvas. Liberação dessa água por escoamento superficial e evaporação (CATAPRETA, 2008).

II. Camada Monolítica Evapotranspirativa

Essa camada utiliza apenas um solo sobre a massa de rejeito para cumprir a dupla função de atuar como barreira hidráulica e substrato para a vegetação. E da vegetação a ser utilizada e da espessura da camada de solo se dá o sucesso dessa cobertura (SILVA JUNIOR, 2010).

Barreiras Capilares Evapotranspirativas

Nesse contexto, esse tipo específico de barreira apresenta uma distinção singular em comparação com a camada monolítica de evapotranspiração. O aspecto distintivo é a presença de uma barreira análoga à barreira capilar simples, complementada por uma cobertura vegetal em sua superfície conforme observado por Catapreta (2008). Assim, a primeira barreira, composta por solo fino, desempenha o papel de acumular água, facilitando tanto o escoamento quanto a evapotranspiração. Por sua vez, a segunda camada atua como uma espécie de franja capilar na interface entre os solos, contribuindo ainda mais para a retenção de água na primeira camada.

III. Camada Oxidativa

Evidências mostram que a camada oxidativa desempenha um papel crucial na contenção das emissões de CH_4 . Esse mecanismo é viabilizado quando produtos compostados são incorporados ao solo, proporcionando um ambiente propício para o florescimento e multiplicação de micro-organismos que consomem o metano, como discutido por Humer et al. (2009).

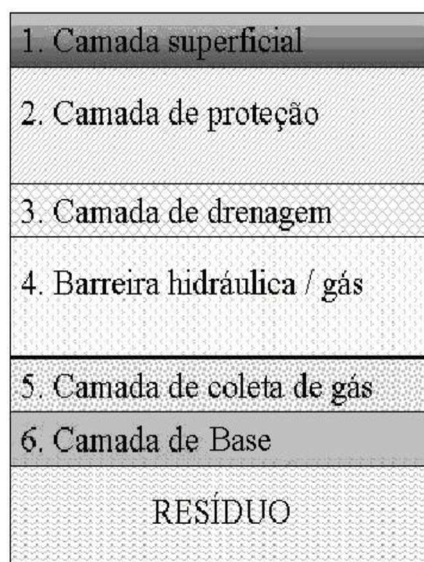
Lopes (2011), por sua vez, ressalta a importância dessa camada em situações nas quais a exploração do biogás não é viável do ponto de vista técnico. Nesse contexto, a capacidade dessa camada de reduzir as emissões se torna valiosa para operadores de aterros de menor porte ou para abordagens que buscam enfrentar os desafios relacionados aos lixões.

3.7.2. Componentes de uma Cobertura Final

Os elementos constituintes de uma cobertura final são categorizados em seis componentes primordiais, a saber: uma camada superficial voltada para a vegetação, uma camada de proteção, uma camada drenante, uma camada impermeabilizante ou barreira hidráulica, uma camada de coleta de gás e uma camada de base. Essa classificação, conforme

ilustrada na figura subsequente, está alinhada com as diretrizes do Guia Técnico da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) de 2004.

Figura 4 - Camadas de um sistema de cobertura final



Fonte: Koerner e Daniel (1997)

A seleção das camadas a serem aplicadas pode variar de acordo com sua aplicação específica. Por exemplo, em uma região árida, a camada de drenagem pode não ser necessária. Da mesma forma, se o resíduo não produzir gás tóxico, a camada de gás não será necessária, eliminando a obrigação de coleta e gerenciamento. Além disso, em certas situações, camadas podem ser combinadas, como ilustrado pela fusão da camada superficial com a camada de proteção, formando assim uma única camada (KOERNER E DANIEL, 1997).

I. Camada Superficial

Esta camada tem como objetivo proteger o interior do aterro, isolando-o do meio externo e evitando erosões. Também pode ser utilizada para o plantio de vegetação. A mistura mais comumente utilizada é composta por argila, silte e areia, podendo também ser aproveitado o resíduo de construção e demolição. (KOERNER E DANIEL, 1997).

II. Camada de Proteção

Essa estrutura encontra-se situada imediatamente abaixo da camada superficial, desempenhando também o papel de evitar processos erosivos e a liberação de gases. Ela

desempenha a função de escudo, protegendo as camadas subsequentes da exposição à umidade. Além disso, atua como um reservatório, possibilitando o retorno da água ao ambiente externo por meio da evapotranspiração. Essa camada ainda oferece acomodação às raízes das plantas presentes na camada superior, ao mesmo tempo que impede seu avanço para camadas internas. Além disso, ela desempenha um papel preventivo, caso ocorram aberturas causadas por animais ou incidentes (KOERNER E DANIEL, 1997).

III. Camada Drenante

Essa camada desempenha o propósito de encaminhar a água que consegue transpor as camadas acima, redirecionando-a para fora do aterro. Com esse enfoque, viabiliza-se a absorção do excesso de água. Requer um cuidado específico, como a inclusão de um elemento filtrante imediatamente após a camada superior, a fim de evitar obstruções excessivas. (KOERNER E DANIEL, 1997).

IV. Camada Impermeabilizante

A presente camada mantém seu propósito de evitar a entrada de água no interior do aterro e o escape dos gases para a atmosfera, ao mesmo tempo em que possibilita a drenagem lateral. Sua construção, assim como a camada drenante, pode ser complementada com geomembranas, revestimento de argila geossintética (GCL) e revestimento de argila compactada (CCL). (KOERNER E DANIEL, 1997).

Conforme Lukiantchuk (2007), essa camada deve possuir baixa condutividade hidráulica, ser impermeável, durável, resistente e aguentar as condições meteorológicas.

V. Camada de Controle de Gás

Essa camada orienta os gases originados a partir do montante de resíduos em direção aos sistemas de drenagem de gás, aderindo a determinadas diretrizes como delineadas por Koerner e Daniel, (1997):

- A espessura mínima requerida é de 300 mm, ao usar o solo natural, e é imperativo que haja, pelo menos, uma conexão externa para disposição e tratamento;
- O material que compõe essa camada precisa ser granular e possuir uma alta taxa de permeabilidade (utilizando cascalho ou pedregulho);

- É crucial adotar precauções em relação às extremidades dos tubos, a fim de evitar a entrada indesejada de água.

VI. Camada de Base

Essa camada é igualmente conhecida como camada de base e desempenha o papel de oferecer suporte a todas as demais camadas. A seleção dessa camada varia conforme o propósito do aterro, sendo empregada diariamente para resguardar os resíduos, tornando-se assim a etapa anterior ao início da formação da cobertura do aterro.

3.8 Coberturas alternativas

A limitação dos recursos consolidados destinados à construção da cobertura do aterro atua como estímulo para a exploração de alternativas mais amplamente disponíveis. Isso gera a possibilidade de combinar diferentes materiais, provocando a introdução ou a descontinuação de determinadas camadas, bem como a variação em suas espessuras. Consequentemente, emergem soluções inovadoras para a conclusão do aterro.

Além de conferir um novo propósito a materiais com potencial de serem descartados de maneira inadequada, a adoção de substâncias alternativas reduz a necessidade de explorar recursos naturais de solo e fomenta a reutilização de produtos industriais que atendam aos critérios técnicos exigidos.

Alguns estudos têm sido realizados para avaliar e demonstrar a viabilidade dessas abordagens, empregando resíduos de construção e demolição como alternativas para a formação das camadas de cobertura de aterro sanitário.

3.9 Comportamento geotécnico das estruturas de cobertura em aterros

O entendimento do comportamento e das propriedades do solo é fundamental para o desenvolvimento, implementação e operação de aterros sanitários. Na construção das camadas de cobertura, os solos argilosos são frequentemente utilizados devido às suas características geotécnicas favoráveis. No entanto, é importante monitorar esses solos, pois a secagem pode ocasionar o surgimento de fissuras, o que compromete sua permeabilidade.

Para que um solo argiloso seja considerado adequado como material impermeabilizante em aterros, é necessário que atenda aos seguintes critérios:

- Classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS);
- Teor de partículas menores que 0,075 mm superior a 30% conforme análise granulométrica pela peneira N° 200 da ASMT (NBR 7181/84);
- Limite de liquidez igual ou superior a 30% (NBR 6459/84);
- Índice de plasticidade igual ou superior a 15 (NBR 7180/84).

Os requisitos mencionados anteriormente evidenciam que a seleção dos materiais para a camada impermeabilizante é fundamentada na porcentagem de argila ou finos, no limite de liquidez, no índice de plasticidade e na permeabilidade do solo utilizado nas camadas de cobertura.

Entre os parâmetros físicos das camadas, a permeabilidade é a variável mais crítica na construção da cobertura de aterros. Conforme destacado por Quissini (2009), é crucial que o solo apresente baixa permeabilidade, a fim de minimizar o risco de contaminação dos aquíferos. Ademais, é fundamental que as áreas escolhidas para a construção do aterro possuam características argilosas, sendo desaconselhável a utilização de solos arenosos.

Quadro 2: Coeficiente de permeabilidade em função ao tipo de solo.

TIPO DE SOLO	PERMEABILIDADE K (M/S)
Pedregulhos	$>10^{-3}$
Areia	10^{-3} a 10^{-5}
Baixa permeabilidade (siltes e argilas)	10^{-5} a 10^{-7}
Muito baixa permeabilidade (argila)	10^{-7} a 10^{-9}
Baixíssima (argila)	$<10^{-9}$

Fonte: Quissini (2009).

3.9.1 Normas e aspectos legais

As legislações e normas brasileiras ainda são amplamente baseadas nas diretrizes internacionais, especialmente de países mais desenvolvidos, que se conscientizaram mais cedo sobre os problemas ambientais. Apesar de essas regulamentações serem frequentemente fruto

de pesquisas de longo prazo e de dados obtidos em aterros em operação, elas ainda precisam ser adaptadas ao contexto nacional, levando em consideração os recursos humanos, econômicos, as condições climáticas e os materiais característicos do Brasil.

Nesse sentido, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) emite diversas Resoluções que afetam direta ou indiretamente os aterros de resíduos. A resolução CONAMA Nº 1 (1986) estabelece critérios básicos e diretrizes gerais para o estudo de impacto ambiental (EIA) e para o relatório de impacto ambiental (Rima), tornando-os obrigatórios para o licenciamento de atividades que alteram o meio ambiente.

As resoluções CONAMA Nº 237 (1997), Nº 307 (2002) e Nº 308 (2002) tratam, respectivamente, do licenciamento ambiental segundo a política nacional do meio ambiente, da gestão dos resíduos da construção civil e do licenciamento ambiental de sistemas de disposição final de resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte.

A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) apresenta as seguintes normas relacionadas a aterros de resíduos:

NBR 8.418 (1984) – Especificações para projetos de aterros de resíduos industriais perigosos.

NBR 8.419 (1992) – Regras para a elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos.

NBR 8.849 (1985) – Normas para projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos.

NBR 10.157 (1987) – Diretrizes para o projeto, construção e operação de aterros de resíduos perigosos.

NBR 13.896 (1997) – Critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos.

NBR 15.112 (2004) – Diretrizes para áreas de transbordo e triagem de resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos.

NBR 15.113 (2004) – Normas para aterros de resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes.

NBR 15.114 (2004) – Diretrizes para projetos de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil.

Contudo, as legislações e normas brasileiras sugerem que, para aterros industriais de classe I, a camada superior de impermeabilização é obrigatória, mas não há regulamentação específica

para características de projeto, como espessura, permeabilidade intrínseca ou condutividade hidráulica (Ibam, 2001). Para aterros industriais de classe II, a camada de impermeabilização deve ser composta por geomembrana (com espessura de 0,8 a 1,2 mm) ou por argila de boa qualidade ($k = 10^{-6}$ cm/s e espessura superiores a 50 cm).

A vegetação sobre a camada final de cobertura é recomendada, pois sua presença aumenta a evapotranspiração, reduz a erosão e oferece um benefício estético ao projeto de encerramento do aterro.

A camada de cobertura deve ser projetada levando em consideração o uso futuro do aterro após o encerramento de suas atividades.

4. METODOLOGIA

4.1 Introdução

Com o objetivo de investigar o desempenho do agregado resultante da demolição de edificações nos bairros do Bebedouro, Pinheiros e Mutange, na cidade de Maceió - AL, como uma alternativa viável para compor a camada de cobertura em aterros sanitários, foi conduzido um extenso conjunto de ensaios. Esse programa experimental foi focado na avaliação das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos resíduos de RD, além da análise de parâmetros geotécnicos e ambientais.

4.2 Coleta da Amostra

O material analisado foi coletado na área impactada pela subsidência causada pela exploração de sal gema, por uma empresa Alagoana, em Maceió/AL, abrangendo aproximadamente 10 pontos distintos. Esses locais são grandes depósitos de resíduos de demolição dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro. Além do agregado britado, também foram coletadas amostras de solo do bairro Mutange para caracterização e testes, sendo posteriormente utilizadas nas misturas.

Antes da coleta, o material britado é homogeneizado e transformado em agregado com o auxílio de uma retroescavadeira. Em seguida, as amostras passam por um processo de quarteamento para garantir a representatividade do material. Após essa etapa, são acondicionadas em sacos de náilon de 50 kg e transportadas para o Laboratório de Geotecnia da UFAL. No laboratório, antes da caracterização e dos ensaios, as amostras passam por um novo processo de quarteamento para padronização.

Figura 5 - Material trazido ao laboratório de solos para análises.



Fonte: Autor (2024)

4.3 Caracterização Física

4.3.1 Preparação do material para análise

O material foi separado em lotes, homogeneizado para garantir uma boa representatividade dos materiais e em seguida é pesado para dar início aos ensaios.

Figura 6 - Fluxograma de material em preparação para análise



Fonte: Autor (2024)

4.3.2 Análise Granulométrica

A caracterização granulométrica de um solo possibilita a identificação das proporções das partículas presentes em relação às suas dimensões, conferindo-lhe uma relevância significativa para antecipar o comportamento desses materiais quando empregados em projetos de engenharia. A avaliação da granulometria pode ser conduzida através de peneiramento ou, no caso deste estudo em específico, por meio da combinação de peneiramento e sedimentação.

O procedimento é recomendado pela Norma Brasileira NBR 7181/84 (Solo – Análise Granulométrica). Para a efetuação do ensaio, é necessário preparar antecipadamente as mostras

de solo conforme especificado na Norma NBR 6.457/86 (Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização).

Figura 7: Peneiramento para ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2024)

Após a preparação preliminar da amostra de solo, foi mensurada uma quantidade aproximada de 1500 g do material para passar pelo peneiramento na peneira #10 (2,00 mm). O material retido na peneira #10 (2,00 mm) foi empregado na etapa de peneiramento grosso da amostra. Já o material que passar a peneira #10 foi separado para a realização do ensaio de sedimentação.

Figura 8 - Caracterização da amostra RD (granulometria).



Fonte: Autor (2024)

A transferência do material para um béquer de 250 cm³ foi seguida pela adição de um defloculante, composto por 125 cm³ de solução de hexametáfosfato. A mistura foi transferida para um recipiente de dispersão e preenchida até que o nível atinja 5 cm abaixo das bordas, enquanto o aparelho dispersor é acionado por 15 minutos. O material foi então transferido para uma proveta, complementando-se o volume até atingir 1.000 cm³. Agitando com uma haste de vidro para manter as partículas em suspensão, foram registradas as leituras de sedimentação após a agitação.

4.3.3 Densidade Real dos Grãos

O ensaio de determinação da densidade real dos grãos, conforme a ABNT NBR 6508, é um procedimento que visa calcular a relação entre a massa dos grãos sólidos de uma amostra e o volume por eles ocupado, excluindo os poros internos e externos. Este ensaio é de grande relevância em análises geotécnicas, pois fornece dados fundamentais para o cálculo da porosidade e do grau de saturação de solos. O procedimento inicia-se com a preparação da amostra, que é previamente seca em estufa a uma temperatura controlada entre 105 °C e 110 °C por um período mínimo de 24 horas. Após a secagem, a amostra é resfriada em um dessecador para evitar a absorção de umidade antes de sua utilização.

O picnômetro, instrumento utilizado para medir o volume dos sólidos, é pesado vazio e seco, sendo essa massa registrada. Em seguida, uma quantidade específica de solo seco é introduzida no picnômetro, e a nova massa do conjunto é determinada. Após a adição do solo, o picnômetro é parcialmente preenchido com água destilada e agitado suavemente para remover bolhas de ar aderidas aos grãos. Posteriormente, o recipiente é completado com água até a marca de calibração e a massa total é novamente registrada. Para fins de referência, o picnômetro é então esvaziado, limpo e preenchido apenas com água destilada até a mesma marca de calibração, sendo a massa medida mais uma vez.

Figura 9 - Ensaio de densidade real dos grãos



Fonte: Autor (2024)

Durante o ensaio, é essencial medir a temperatura da água para aplicar o fator de correção da densidade do líquido, considerando as variações decorrentes da temperatura ambiente. O cálculo da densidade real dos grãos é realizado utilizando a fórmula definida na norma, que considera a massa do solo seco e os volumes deslocados pela água no picnômetro. Esse cálculo garante uma medição precisa, desde que cuidados sejam tomados para eliminar completamente as bolhas de ar durante o processo.

4.3.4 Limites de Consistência

4.3.4.1 Limite de Liquidez (LL ou WL)

O limite de liquidez (LL) pode ser definido como o teor de água no solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para fechar numa concha (PINTO, 2006). Ele é usualmente determinado pelo aparelho de Casagrande (Figura 9).

Figura 10: Ensaio Limite de Liquidez.



Fonte: Autor (2024)

O procedimento de ensaio é padronizado no Brasil pela ABNT (Método NBR 6459/2016). Parte da amostra é colocada em um recipiente de porcelana e aos poucos, adiciona-se água até a homogeneização da massa. Em seguida, certa quantidade desse material é passada para a concha do Aparelho de Casagrande aplainando-o com a espátula, de tal forma que a parte central fique com 1cm de espessura. Então, faz-se com o cinzel uma ranhura no meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho. Após este procedimento, inicia-se a aplicação dos golpes, girando a manivela à razão de duas voltas por segundo, contando-se o número de golpes até que a ranhura se feche. É retirada uma pequena quantidade do material no local onde as bordas da ranhura se tocam para a determinação da umidade. O material que resta na concha é transferido de volta ao recipiente de porcelana, adiciona-se certa quantidade de água. Assim, o processo é repetido por mais cinco vezes aumentando gradativamente a quantidade de solo de modo que o número de golpes necessários para o fechamento da canelura seja aproximadamente de 10, 20, 30, 40 e 50 golpes. Com os pares de valores (número de golpes, teor de umidade) é construído um gráfico relacionando teores de umidade, em escala aritmética (nas ordenadas) com o número de golpes em escala logarítmica (nas abscissas).

4.3.4.2 Limite de Plasticidade (LP ou WP)

O Limite de Plasticidade constitui o teor de umidade em que o solo, estando no estado plástico, se perder umidade, passa para o estado semissólido. Atterberg convencionou que a condição para que uma amostra de solo esteja no estado plástico é a possibilidade de com ela ser possível moldar um cilindro de 10 cm de comprimento por 3 mm de diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro. O procedimento de ensaio é padronizado no Brasil pelo Método NBR 7180/2016.

A amostra de solo é colocada em uma bacia de porcelana, adicionando água destilada em pequenas quantidades, e misturando-se durante o tempo de 15 a 30 minutos de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. Em seguida, com cerca de 10 g da amostra assim preparada, forma-se com os dedos uma pequena bola, que é rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar a forma de um cilindro com as dimensões próximas às do gabarito de comparação, até que haja fragmentação do cilindro. As partes fragmentadas são rapidamente transferidas para um recipiente adequado, para determinação da umidade pelo método da estufa (NBR 6457/2016). O procedimento deve ser repetido por 3 vezes para a obtenção de três valores de umidade e posterior média desses valores. A Figura 11 apresenta a execução do ensaio de Limite de Plasticidade.

Figura 11: Ensaio Limite de Plasticidade.



Fonte: Autor (2024)

4.3.4.3 Índice de Plasticidade

O Índice de Plasticidade (IP) é obtido através da diferença numérica entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) pela Equação 1 abaixo.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

O IP é expresso em percentagem e pode ser interpretado, em função da massa de uma amostra, como a quantidade máxima de água que pode lhe ser adicionada, a partir de seu Limite de Plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica. BURMISTER (1949) classificou o Índice de Plasticidade de forma quantitativa. A Tabela 2 apresenta a classificação pelo Índice de Plasticidade.

Tabela 2: Classificação do índice de plasticidade (BURMISTER, 1949).

IP	DESCRIÇÃO
0	Não plástico
1 – 5	Ligeiramente plástico
5 – 10	Plasticidade baixa
10 – 20	Plasticidade média
20 – 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

4.3.5 Ensaio de Compactação

O ensaio de Compactação Proctor, estabelecido conforme as diretrizes da NBR 7182/2016 (Solo – Ensaio de Compactação), ressalta que é necessário realizar no mínimo 5

medições da relação entre densidade seca e umidade para construir a representação gráfica da curva de compactação do solo. A preparação das amostras do solo destinadas ao ensaio de Compactação deve seguir as práticas recomendadas pela norma NBR 6457/2016 (Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização).

Figura 12 - Amostras de solo e mistura (70-30), em preparação para ensaio de compactação.



Fonte: Autor (2024)

No caso da camada de cobertura do aterro, a energia de compactação aplicada foi a Proctor Normal, uma vez que não se prevê um carregamento expressivo sobre esse sistema. A amostra foi submetida ao processo de secagem ao ar, desagregada, tornada homogênea e subdividida em partes iguais, de acordo com os princípios da NBR 7182/86 (Solo – Ensaio de Compactação). Após essa etapa preparatória, o solo passará por uma peneira com abertura de 19mm e foi compactado usando a energia normal, com 12 impactos aplicados por um soquete de 2,5 kg, deixando-o cair de uma altura de 30,5 cm sobre a camada de solo. Isso visa a formação de cinco camadas uniformes, cada uma com cerca de 12,5 cm de altura, após a compactação.

Uma vez concluída a compactação da amostra, o cilindro adicional foi retirado para possibilitar a medição do peso do material compactado com umidade. A amostra foi retirada do molde cilíndrico, sendo obtidas duas partes que servirão para determinar a umidade do material.

A relação entre a parte úmida e a parte seca da amostra revelará o teor de umidade do material compactado, essencial para calcular a umidade ótima do material.

Figura 13: Ensaio de compactação.



Fonte: Autor (2024)

O procedimento foi repetido variando os teores de umidade em incrementos, realizando essa sequência por 5 vezes para caracterizar devidamente a curva de compactação.

4.3.6 Ensaio de Condutividade Hidráulica (Permeabilidade)

A permeabilidade hidráulica saturada do solo (K_o) constitui um parâmetro fundamental para avaliar a velocidade de movimentação da água no solo. No contexto deste estudo, os coeficientes de permeabilidade serão identificados mediante a condução do ensaio de condutividade hidráulica com cargas constantes e variáveis.

Para a determinação da permeabilidade de materiais compactados, seguem-se as diretrizes estabelecidas pela NBR 14545, que especifica a realização de ensaios de carga hidráulica variável para materiais argilosos. Por outro lado, para solos arenosos, a referência é a NBR 13292 (ABNT, 1995), que orienta a execução de ensaios de carga hidráulica constante. Conforme Barros (2005), o experimento utilizando o permeâmetro de carga constante envolverá a manutenção de uma carga hidráulica h ao longo de um período determinado. A água que atravessar a amostra em análise foi coletada, e o volume correspondente foi quantificado.

Figura 14: Ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor (2024)

Com base na vazão e nas propriedades geométricas do corpo de prova, como sua área e altura, é possível determinar o coeficiente de permeabilidade utilizando a equação 2, a seguir:

$$\frac{k = Q L_1 R_t}{h A T} \quad (2)$$

Onde:

k – Coeficiente de permeabilidade [L/T]

Q – Volume de água percolada num tempo T [L3]

L1 – Altura do corpo de prova [L]

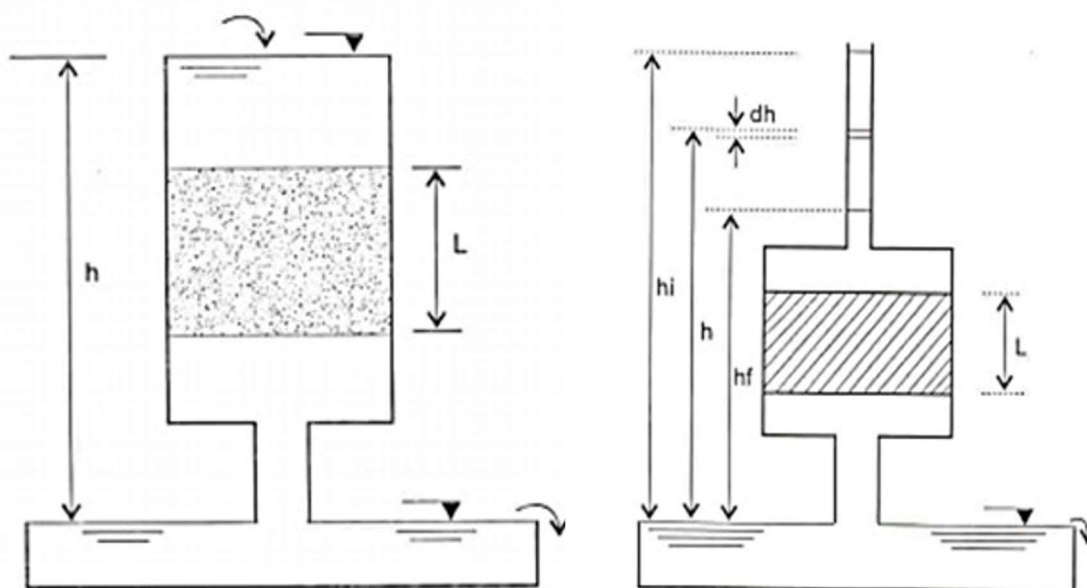
Rt – Fator de correção da viscosidade da água (a 20° C)

h – Perda de carga hidráulica [L]

A – Área do CP [L2]

T – Tempo decorrido [T]

Figura 15: Permeâmetro de carga constante e variável



Fonte: Barros 2005

A avaliação com o permeâmetro de carga variável, tal como descrito por Barros (2005), consistirá na observação do intervalo de tempo necessário para que o nível da água na bureta superior diminua de sua altura inicial (h_i) para uma altura final (h_f) em um determinado instante (t), a partir do momento inicial. A carga inicial é h , e o gradiente é h/L . O cálculo do coeficiente de permeabilidade é efetuado por meio da seguinte equação 3:

$$k = 2,3 \left(\frac{a L R t}{A t} \right) \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (3)$$

Onde:

k – Coeficiente de permeabilidade [L/T]

a – Seção do tubo do permeâmetro [L²]

L – Altura do corpo de prova [L]

R_t – Fator de correção da viscosidade da água (a 20° C)

h_i – Carga inicial [L]

h_f – Carga final [L]

A – Área do CP [L²]

T – Tempo decorrido [T]

Neste projeto foi realizada uma série de ensaios, compreendendo ensaios efetuados utilizando amostras de agregado proveniente de RD 100%, solo 100% e das misturas de RD/solo (85/15, 70/30, 60/40) utilizando amostras compactadas em Proctor Normal.

4.3.7 Curva Característica

Com o propósito de estabelecer a curva característica ou curva de retenção de água do agregado proveniente de RD, bem como gerar a curva de condutividade hidráulica não saturada desse material, foi conduzida a avaliação da sucção matricial do mesmo por meio da abordagem do papel filtrante.

Figura 16: Molduras e papel filtrante



Fonte: Autor (2024)

A realização do ensaio empregando o método do papel filtrante seguiu os protocolos delineados na norma ASTM-D 5298-03.

Foi executado o molde de 5 corpos de prova em moldes cilíndricos. Após a etapa de moldagem, as amostras foram submetidas ao processo de secagem, para obter amostras com teores distintos de umidade. A diferenciação nos níveis de umidade foi controlada com base na quantidade de água perdida devido à evaporação. Depois da variação nas umidades, as amostras ficaram em contato com o papel filtrante. Em conformidade com as disposições da norma

ASTM-D 5298-03, foram posicionados 2 papéis filtrantes em cada superfície da amostra. Logo após, as amostras foram envolvidas por película de PVC e acondicionadas em um invólucro para evitar desequilíbrios de umidade entre as faces do papel filtrante. Após este estágio, as amostras foram mantidas em repouso, e decorridos 7 dias, os papéis filtrantes foram removidos das amostras e pesados.

Figura 17: Fluxograma ensaio de curva característica



Fonte: Autor (2024)

Depois da pesagem, os papéis filtrantes foram submetidos a um processo de secagem por um período de 24 horas, em seguida foram pesados novamente. Desse modo, foi obtida a umidade dos papéis filtrantes. A umidade das amostras da mistura 60% RD + 40% solo, também foi mensurada. Após a finalização do procedimento com o papel filtrante, as sucções matriciais do solo e a umidade volumétrica do solo são calculadas, aplicando as equações de Chandler et al. (1992, citado por Marques, 2006) para a calibração do papel filtro. As equações de sucção são as seguintes:

$$Sucção (kPa) = 10(6.05 - 2.48 \log w) \quad \text{para umidades do papel filtro} > 47\%. \quad (4)$$

$$Sucção (kPa) = 10(4.84 - 0,0622 w) \quad , \text{ para umidades do papel filtro} \leq 47\%. \quad (5)$$

Isso resultou na elaboração da curva de retenção de água do solo.

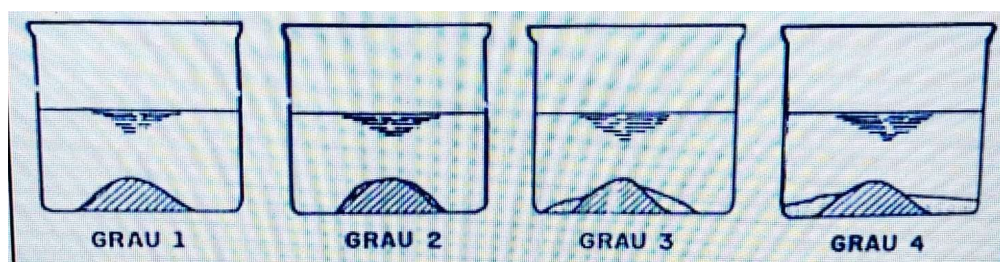
4.3.8 Ensaio de Erodibilidade

Com o intuito de verificar se o agregado proveniente de RD apresenta suscetibilidade à erosão, serão executados os testes de dispersão rápida e desagregação.

4.3.8.1 Ensaio de dispersão rápida.

Um torrão de solo, pesando aproximadamente 3 gramas, é colocado em um béquer contendo água. O comportamento do torrão em relação à erosão é então avaliado visualmente.

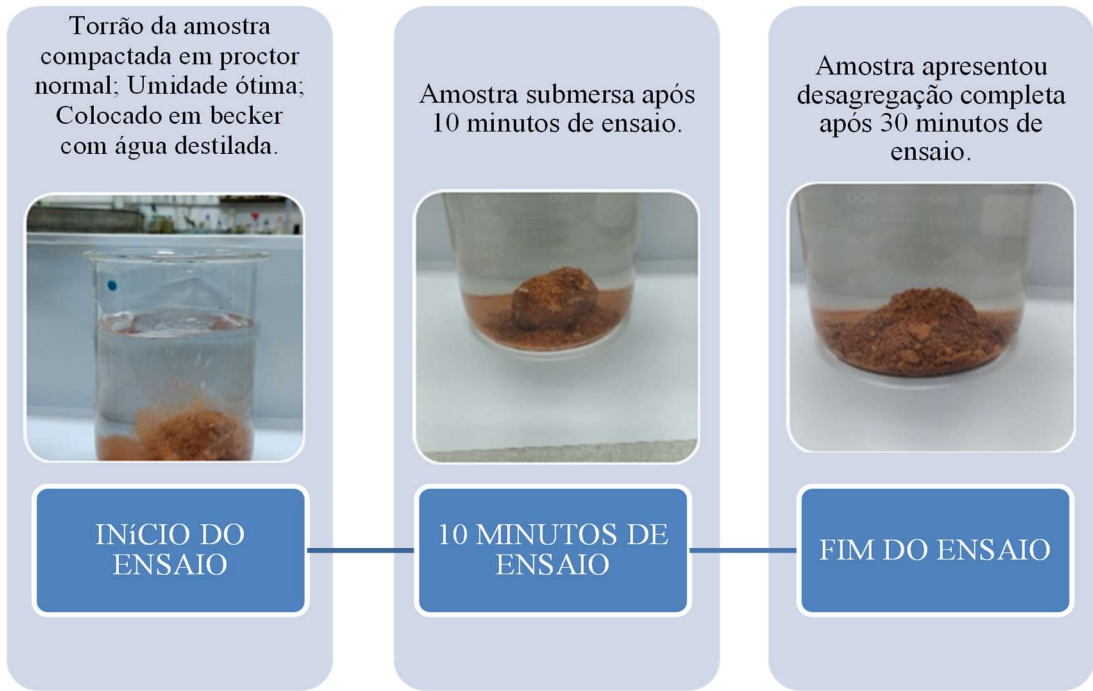
Figura 18: Esquema do ensaio de dispersão rápida.



. Fonte: (Silveira et. al., 1972)

É importante destacar que este teste não possui natureza quantitativa, mas sim, tem o foco em proporcionar resultados para uma avaliação qualitativa.

Figura 19: Fluxograma do ensaio de dispersão rápida.



Fonte: Autor (2024)

Quadro 3:Classificação proposta para o ensaio de dispersão rápida.

CLASSIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Não dispersiva	O torrão pode espalhar-se no fundo do recipiente, porém não se observa sinal de turveis causada por coloide em suspensão.
Levemente dispersiva	Aparecimento de turveis na superfície do torrão.
Moderadamente dispersiva	Aparecimento de nuvem de coloide em suspensão facilmente reconhecível, frequentemente espalhando-se em finas estrias na base do recipiente, e não chegando a cobrir toda a sua área.
Altamente dispersiva	Nuvem coloidal cobrindo toda a base do recipiente frequentemente em uma camada muito fina. Em casos extremos a água torna-se turva.

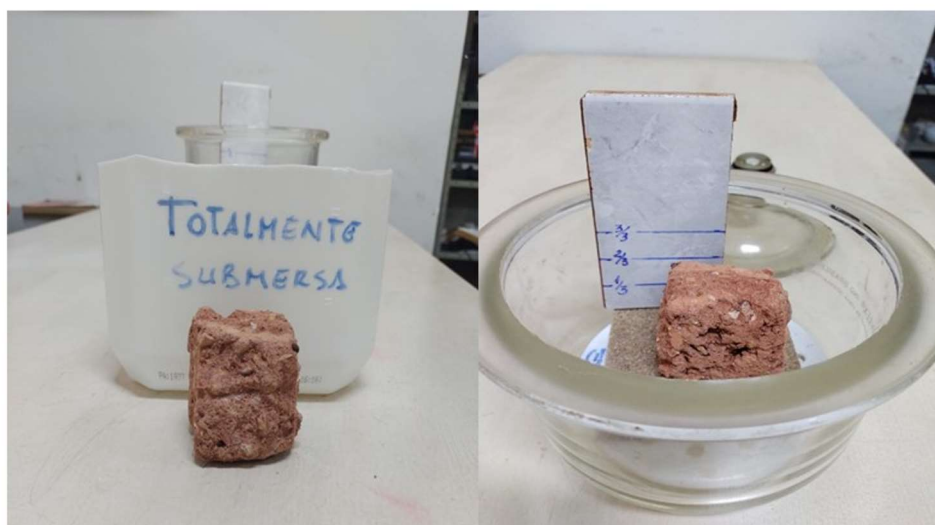
Fonte: Barros (2005)

4.3.8.2 Ensaio de Desagregação.

Segundo as considerações de Santos e Camapum (1998), o experimento de desagregação, proposto por Holmgren e Flanagan (1977), envolve a introdução de uma amostra com formato cúbico, contendo aresta de 6 cm, em um recipiente com água, observando, dessa forma, a reação da amostra ao processo de submersão.

Para obter a amostra não deformada, o agregado reciclado proveniente de RD foi moldado sob compactação estática, empregando um molde dividido em três partes, na umidade ótima. Posteriormente, utilizando uma lâmina e uma régua, o corpo de prova assim obtido foi cortado para atingir a configuração de um cubo com 6 cm de aresta.

Figura 20: Amostras prontas para ensaio de desagregação.



Fonte: Autor (2024)

As amostras foram colocadas em bandejas contendo água, e suas reações ao processo de submersão foram observadas. As amostras, cortadas em cubos com 6 cm de lado, foram distribuídas em duas bandejas para o experimento.

Na primeira bandeja, as amostras foram submetidas à imersão total desde o início do ensaio, como mostrado na figura 21, permanecendo nessa condição até o final do experimento, após 24 horas.

Figura 21: Ensaio de desagregação com amostra totalmente submersa.

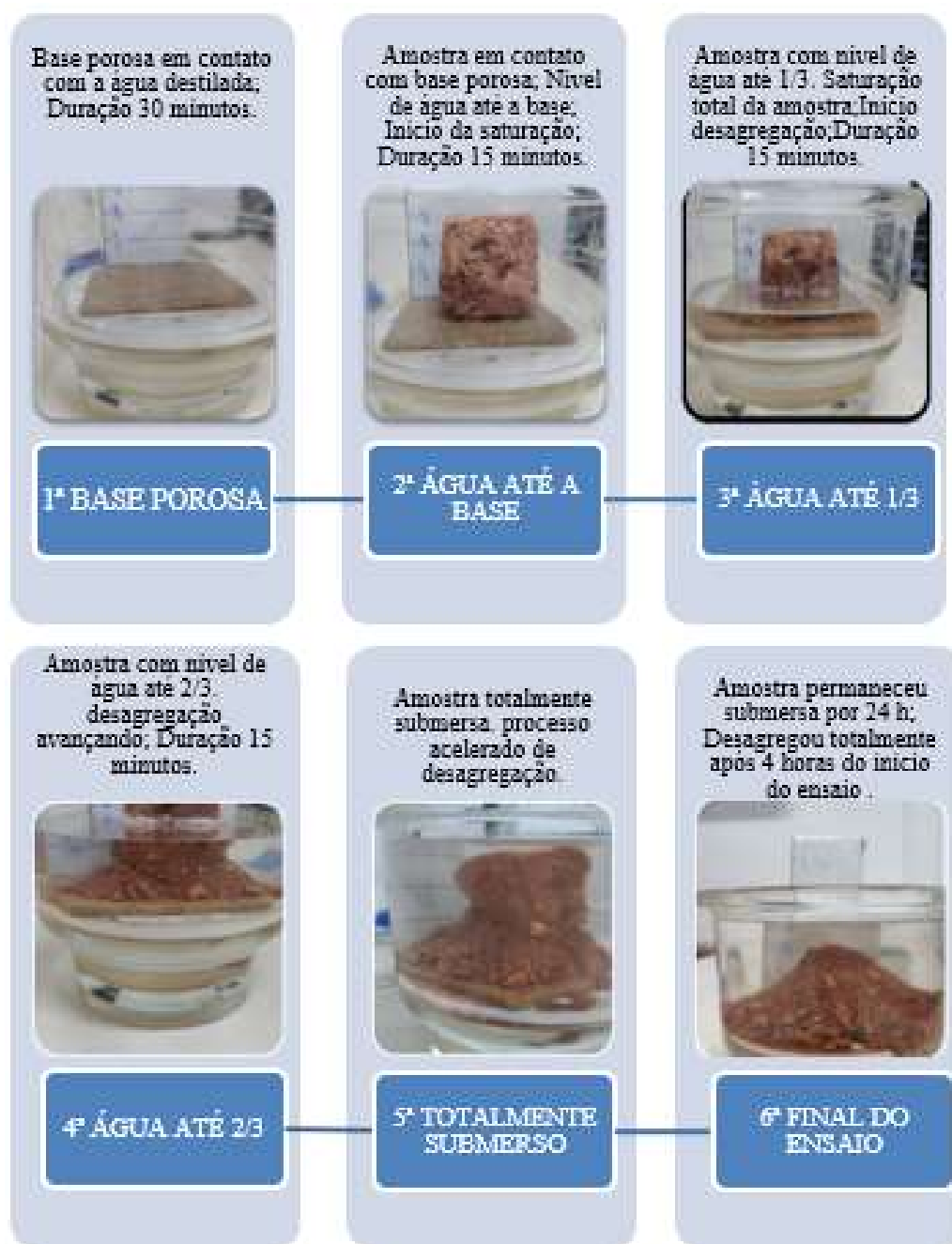


Fonte: Autor (2024)

Na segunda bandeja, as amostras foram inicialmente posicionadas sobre uma pedra porosa, com o nível da água mantido na altura da base das amostras por 30 minutos. Em seguida, a altura da água foi aumentada gradualmente para $1/3$ e $2/3$ da altura das amostras, com intervalos de 15 minutos entre cada fase, até alcançar a submersão total. Após a submersão total, o experimento continuou por um período de 24 horas (SANTOS ET AL., 1998).

A Figura 22 ilustra, por meio de um fluxograma, as etapas do processo experimental, detalhando cada fase desde a estabilização inicial até a completa submersão e a manutenção da imersão por 24 horas. Esse procedimento meticuloso não só facilitou a replicabilidade dos resultados, como também proporcionou uma abordagem sistemática para a avaliação dos efeitos da submersão nas amostras, contribuindo para uma análise mais robusta e confiável dos dados obtidos.

Figura 22: Fluxograma das etapas do ensaio de degradação.



Fonte: Autor (2024)

Os estágios do experimento foram:

(a) Exposição à água destilada na base das amostras por 30 minutos;

(b) Exposição à água destilada em 1/3 e 2/3 da altura das amostras por períodos de 15 minutos;

(c) Submersão total das amostras, mantendo-se por 24 horas.

Após a conclusão do ensaio, além de avaliar a desagregação, é possível realizar a categorização com relação à resposta à imersão, de acordo com os seguintes comportamentos:

Quadro 4: Categorização do ensaio de desagregação.

COMPORTAMENTO	CARACTERISTICA
Nenhuma resposta	Quando a amostra preserva sua forma e tamanho originais.
Abatimento (Slumping)	Quando a amostra se fragmenta originando um amontoado de material desestruturado.
Faturamento	Quando a amostra se divide em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas.
Dispersão	Quando as superfícies da amostra se tornam turvas, com o surgimento de uma "nuvem" coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

Fonte: Adaptado de Barros (2005)

4.3.9 Ensaio de Cisalhamento Direto

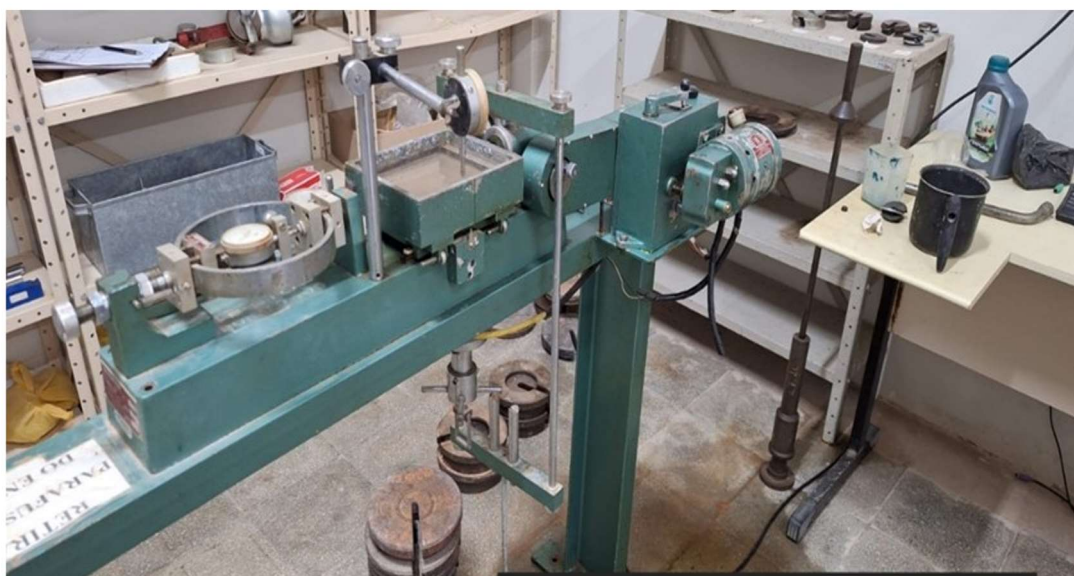
Com o objetivo de avaliar a viabilidade do agregado de RD como alternativa para a composição de sistemas de cobertura final, foram conduzidos testes de cisalhamento direto, para à determinação de sua resistência ao cisalhamento.

A escolha deste ensaio baseia-se em razões pertinentes, as quais incluem:

O ensaio de cisalhamento direto é um método técnico simples e antigo utilizado para medir a resistência ao cisalhamento do solo (Pinto, 2000). Por meio deste teste, é possível determinar a envoltória de resistência, bem como os parâmetros "c" (coesão) e "ø" (ângulo de atrito) do solo;

Tal ensaio possui ampla aplicabilidade e relevância em empreendimentos de construção civil, notadamente em projetos que lidam com a estabilidade de taludes, uma vez que essa estabilidade é crucial para a configuração adequada de um sistema de cobertura final, considerando que existem configurações em formato de talude.

Figura 23: Prensa utilizada para ensaios de cisalhamento.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 23 apresenta a prensa de cisalhamento direto utilizada nos ensaios. Esse equipamento foi fundamental para garantir a confiabilidade das medições e auxiliar na determinação dos parâmetros geotécnicos que embasam a viabilidade da incorporação dos resíduos de demolição na cobertura final de aterros.

Conforme a norma NBR 12025/2012, as amostras foram moldadas com diferentes teores de RCD, variando de 0% a 75%, e elaboradas em diferentes níveis de umidade. A amostra saturada foi submetida a um período de imersão de 24 horas antes do início do ensaio.

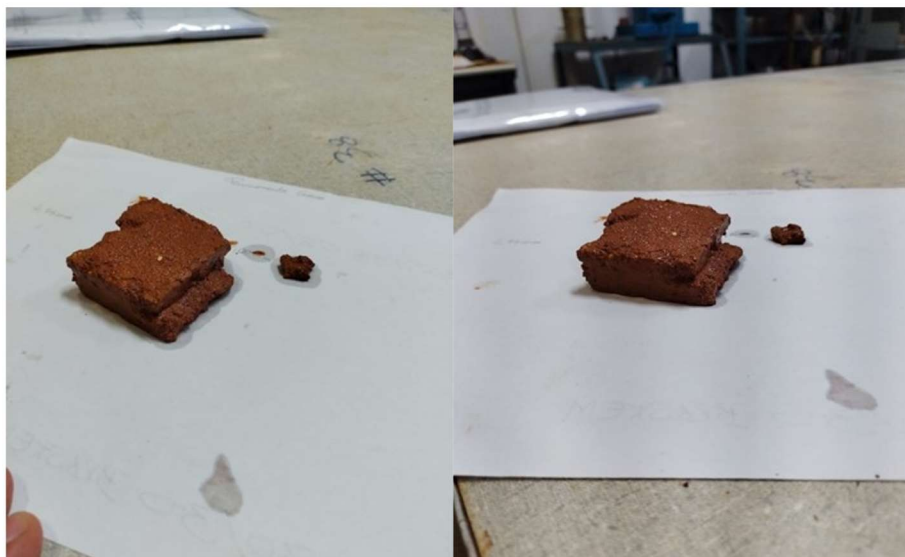
Figura 24: Moldagem e saturação das amostras para ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autor (2024)

A taxa de cisalhamento foi estabelecida em 0,02mm/min. As tensões normais para o teste de cisalhamento serão definidas em 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa.

Figura 25: Corpo de prova pós cisalhamento.



Fonte: Autor (2024)

A avaliação foi conduzida e a força necessária para promover o deslocamento do solo após aplicação de uma força tangencial foi quantificada.

4.4 Caracterização Química

4.4.1 Difração de Raio X

O teste através da técnica de difração de raios-X, está descrito na NBR 16099/2012, possibilita a identificação dos constituintes minerais da amostra ao revelar sua estrutura cristalina. As estruturas cristalinas são compostas por planos definidos, estreitamente relacionados com o raio atômico de cada átomo e seus tipos de conexão.

A execução desse experimento ocorre por meio de um instrumento denominado difratômetro, onde a amostra é submetida a uma radiação monocromática de raios-X, incidindo a partir de diferentes ângulos. A dispersão dos distintos comprimentos de onda segue os princípios da lei de Bragg.

Figura 26: Equipamento difratômetro DRX-6000 da Shimadzu.



Fonte: Autor (2024)

Os resultados da análise são expostos em forma de gráficos conhecidos como difratogramas, os quais exibem picos característicos correspondentes aos resultados derivados do processo de difração de raios-x nos planos cristalográficos dos materiais examinados. Nesses gráficos, o ângulo 2θ é confrontado com a intensidade dos picos difratados no eixo vertical. Esses picos emergem quando, para um dado valor de θ , um plano atômico específico apresenta uma distância interplanar que se alinha com os princípios da lei de Bragg.

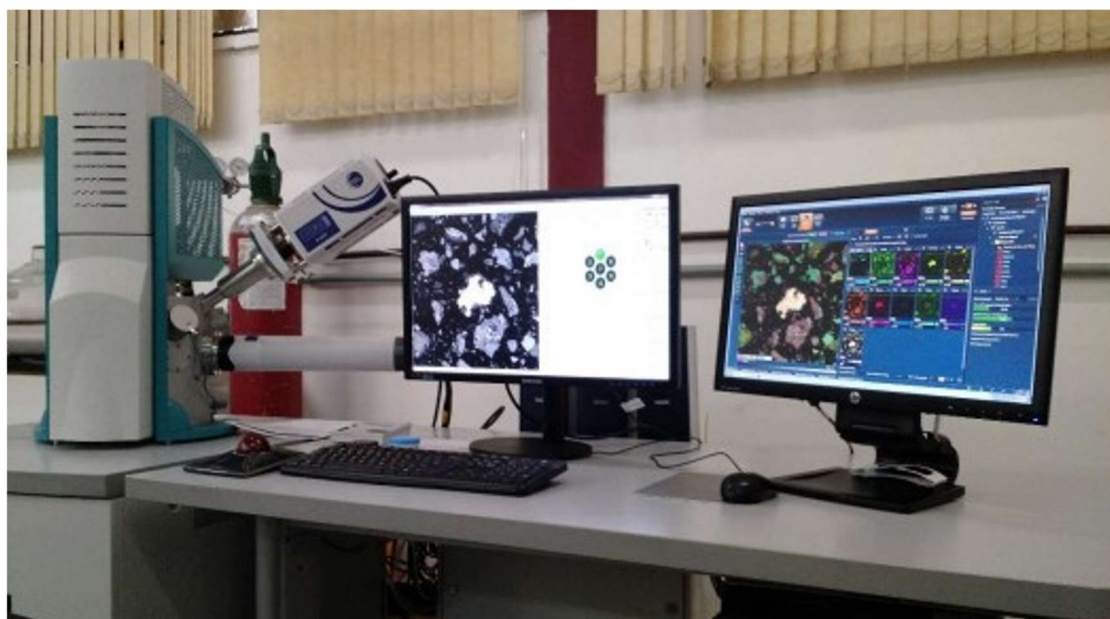
4.4.2 Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raios X (EDX)

A Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raios X (EDX ou EDS - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) é uma técnica analítica amplamente utilizada para a identificação e quantificação elementar em amostras sólidas. Esse ensaio é frequentemente acoplado a microscópios eletrônicos de varredura (MEV/SEM), permitindo a obtenção de um espectro de raios X característico dos elementos químicos presentes na superfície da amostra. Quando um feixe de elétrons incide sobre o material, ele excita os átomos presentes, resultando na emissão de raios X com energias específicas para cada elemento da tabela periódica. Dessa forma, a técnica possibilita a detecção qualitativa e semiquantitativa de elementos desde o sódio (Na) até o urânio (U), dependendo da resolução e sensibilidade do equipamento utilizado.

Na quantificação elementar, o espectro obtido é analisado para determinar os picos característicos de cada elemento, com suas respectivas intensidades sendo correlacionadas às concentrações relativas na amostra. A precisão da quantificação depende de diversos fatores, como o tempo de aquisição do espectro, a aceleração do feixe de elétrons, a composição da matriz do material e a presença de elementos leves ($Z < 11$), que podem ser subestimados devido à baixa eficiência de detecção dos raios X de baixa energia. Para minimizar erros, a calibração do equipamento é realizada com padrões de referência certificados, garantindo maior confiabilidade nos resultados. A técnica é particularmente útil em análises de materiais geotécnicos, cerâmicos, metálicos e polímeros, onde a identificação dos constituintes químicos é essencial para avaliar propriedades mecânicas e ambientais.

Apesar de suas vantagens, a técnica de EDX apresenta algumas limitações. A análise é restrita a uma profundidade superficial reduzida, geralmente na ordem de alguns micrômetros, tornando-a inadequada para identificar variações composicionais em profundidade. Além disso, a detecção de elementos leves, como hidrogênio, lítio e berílio, é limitada devido à baixa energia dos fótons emitidos. Outra restrição está na superposição espectral entre alguns elementos, o que pode dificultar a separação precisa de picos próximos no espectro.

Figura 27: Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV.



Fonte: Fernandes (2016).

A realização desse teste demanda que as amostras sejam condutoras em meio a presença de carbono, o que leva à necessidade de um procedimento conhecido como metalização. Para efetuar essa etapa, as amostras são preparadas como monocamadas, acomodadas em moldes cilíndricos metálicos, e cobertas com grafite através do uso de fita adesiva de dupla face. Imediatamente após essa etapa, as amostras são submetidas a um evaporador de vácuo por aproximadamente uma hora.

4.5 Classificação Ambiental

As decisões tomadas ao longo do gerenciamento de resíduos sólidos devem estar fundamentadas não apenas em critérios técnicos, mas também em aspectos econômicos, de modo a garantir soluções viáveis e sustentáveis. No entanto, essas escolhas não podem ser feitas isoladamente, devendo sempre considerar a classificação ambiental dos materiais, conforme estabelecido pelas normas vigentes. Essa categorização é essencial para determinar a viabilidade do reuso ou da reciclagem dos resíduos, bem como para avaliar os impactos ambientais e os custos associados ao seu gerenciamento.

A NBR 10004 estabelece critérios para a classificação dos resíduos sólidos, levando em conta suas características físicas, químicas e potenciais impactos ambientais e à saúde humana. Segundo as diretrizes dessa norma (ABNT, 2004a), os resíduos são categorizados com base na presença de substâncias potencialmente perigosas e nos riscos ambientais envolvidos. Assim, a norma permite comparar a viabilidade ambiental e econômica das diferentes alternativas de destinação, facilitando a tomada de decisão no gerenciamento de resíduos da construção civil.

A partir dessa categorização, os resíduos podem ser classificados da seguinte forma:

- Resíduos da Classe I - Perigosos: englobam resíduos que, devido às suas características de toxicidade, reatividade, inflamabilidade, corrosividade e patogenicidade, têm a capacidade de representar ameaças à saúde pública, contribuindo para um aumento nos índices de mortalidade ou o surgimento de doenças. Além disso, quando manuseados ou dispostos de maneira inadequada, esses resíduos podem causar danos ao meio ambiente.
- Resíduos da Classe II - Não perigosos:
 - Resíduos Classe II A - Não inertes: compreendem aqueles que não se enquadram nem na Classe I nem na Classe IIB. Apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - Resíduos Classe II B - Inertes: constituem os resíduos que, quando em contato estático e dinâmico com água destilada ou deionizada a temperatura ambiente, não solubilizam nenhum dos seus componentes em concentrações acima dos padrões de potabilidade da água. Isso exclui aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor.

Muitos dos resíduos tóxicos que são características de processos produtivos específicos estão listados em um anexo da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a). Se um resíduo não estiver relacionado na lista, é viável analisá-lo para determinar sua classificação. A coleta de amostras dos resíduos é detalhada na norma NBR 10007 (ABNT, 2004d). A propriedade de toxicidade é avaliada por meio do teste de lixiviação, definido na norma NBR 10005 (ABNT, 2004b), enquanto as características que definem inflamabilidade, corrosividade e reatividade são detalhadas na norma NBR 10004 (ABNT, 2004a). Por sua vez, o teste de solubilização é abordado na norma NBR 10006 (ABNT, 2004c).

4.5.1 Ensaio de Lixiviação

A norma NBR 10005 - Ensaio de Lixiviação de Resíduos (ABNT, 2004b) aborda o procedimento de lixiviação e caracteriza os resíduos como perigosos quando os valores dos poluentes presentes no extrato lixiviado superam as concentrações estabelecidas na listagem número 07 anexada à norma.

O ensaio é executado com uma quantidade de 100 g da amostra, cujas frações granulométricas devem estar abaixo da peneira de 9,5 mm. Essa amostra é transferida para um frasco de lixiviação e misturada com uma solução composta por ácido acético glacial ou por uma combinação de ácido acético e hidróxido de sódio. O frasco é mantido sob agitação contínua por 18 horas, à temperatura de 25° C, com uma rotação de 30 vezes por minuto no agitador rotatório. Após esse período, é realizada a filtração do produto e o extrato lixiviado resultante é submetido à análise.

Figura 28: Agitador rotativo para extrato lixiviado



Fonte: Fernandes (2016)

4.5.2 Ensaio de Solubilização

O ensaio de solubilização foi conduzido conforme a norma NBR 10006 (ABNT, 2004). Para isso, a mistura 60-40 (RD + Solo) foi peneirado para obter a granulometria especificada pela norma (material que passa na peneira com abertura de 9,5 mm), em uma quantidade de 1

kg. O material foi então submetido a secagem em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura média de 40°C por dois dias. Após a secagem, o material foi distribuído em três recipientes de 1500 ml (béqueres), contendo cada um 250 g da mistura (60-40) em massa seca. Em seguida, foram adicionados 1000 ml de água destilada a cada recipiente (figura 29). As amostras foram levadas ao Laboratório de Química (UFAL) e agitadas em agitador magnético por cinco minutos a baixa velocidade, conforme mostrado na figura 29. Após a agitação, os béqueres foram cobertos com plástico filme para evitar perdas de água por evaporação e deixados em repouso por sete dias.

Figura 29: Ensaio de solubilização



Fonte: Rios (2016)

Após concluído o processo, a substância resultante é submetida à análise conforme estipulado no anexo G da NBR 10004/2004. De acordo com as diretrizes da NBR 10004/2004 para a classificação de resíduos, esse ensaio é empregado para distinguir um resíduo inerte (Classe IIB) de um não inerte (Classe IIA).

Figura 30: Filtração e leitura das amostras em espectrofotômetro



Fonte: Rios (2016)

Três amostras de 100 ml foram filtradas como mostra a figura 30, das quais foram separadas alíquotas de 25 ml, às quais foram adicionados 1 ml de HNO_3 (1+1) e 1 ml de HCl diluído para verificar a possibilidade de precipitação. Como não houve precipitação, procedeu-se à acidificação das amostras de 50 ml. Em cada amostra, foram realizadas leituras para alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cloreto, cobre, cromo total, fenóis totais, ferro, fluoreto, manganês, mercúrio, nitrato (expresso em N), prata, selênio, sódio, sulfato (expresso em SO_4), surfactantes e zinco. Para realizar as leituras, foi utilizado um espectrofotômetro de absorção atômica (Figura 30).

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização Física

Para a caracterização física do material estudado, foi necessário realizar análises individuais do solo e do resíduo de demolição (RD). Com os resultados obtidos, verificou-se que o RD, devido à sua composição predominantemente granular, com elevada presença de pedregulhos e areia, não atendia ao principal critério estabelecido para a aplicação pretendida: a permeabilidade.

Diante dessa limitação, optou-se por incorporar uma fração de solo ao RD, uma vez que sua composição apresenta argila como componente principal. A argila, por suas características de baixa permeabilidade, contribui para a redução da permeabilidade da mistura, tornando-a mais adequada para a finalidade proposta.

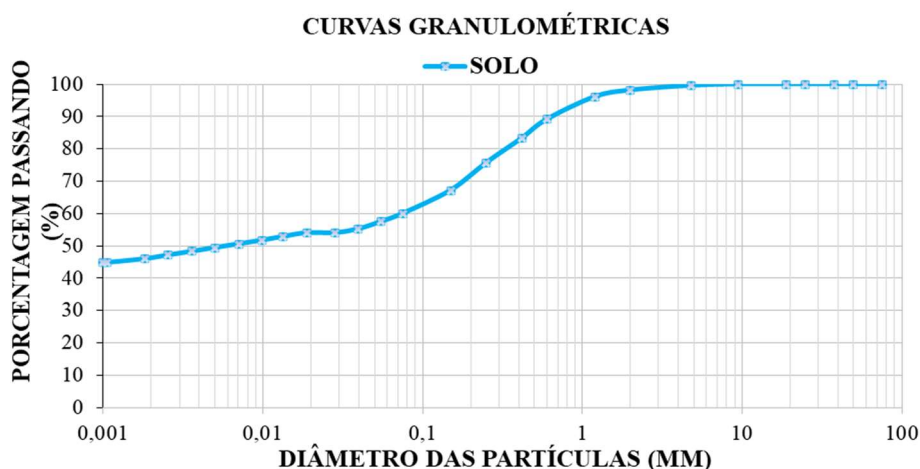
Inicialmente, foi adotada uma proporção de 15% de solo na mistura, aumentando-se esse percentual gradativamente até se alcançar um valor que atendesse aos requisitos técnicos. Em seguida, foram caracterizadas diferentes composições das misturas (85% RD / 15% solo, 70% RD / 30% solo e 60% RD / 40% solo), sendo analisadas individualmente até que os critérios estabelecidos fossem atendidos.

Neste trabalho, apresenta-se a caracterização completa da mistura composta por 60% de RD e 40% de solo, pois essa proporção foi a que melhor atendeu ao critério de permeabilidade exigido para a camada de cobertura final de aterros sanitários.

5.1.1 Ensaio de Granulometria

A análise granulométrica do solo do Mutange revelou a seguinte composição: 45,97% de argila, 11,52% de silte e 40,65% de areia, sendo 9,05% de areia grossa, 21,93% de areia média e 9,67% de areia fina, além de 1,86% de pedregulho, conforme indicado na Tabela 3.

Figura 31: Curva granulométrica, Solo Mutange.

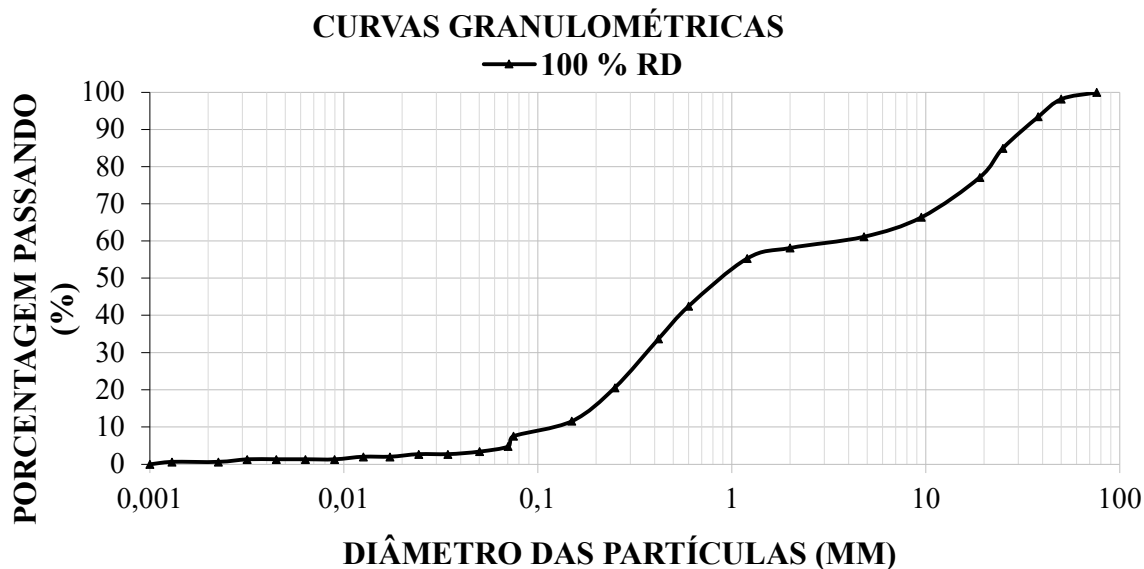


Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados apresentados pode-se afirmar que a amostra de solo do Mutange (SM) é classificada como material mal graduado – graduação aberta, em conformidade com o gráfico apresentado na Figura 31. Não foi possível estimar o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c), porque a curva no gráfico já inicia a porcentagem passante com mais de 40%. Somente é possível identificar o D_{60} com valor igual a 0,08. Nesse sentido, percebe-se na amostra SM uma predominância de material fino (argila) e de areia com uma ausência de materiais mais grosseiros (pedregulho).

No caso do resíduo de demolição (RD), a análise mostrou uma composição de 0,62% de argila, 7,56% de silte e 50,62% de areia, com 15,63% de areia grossa, 30,93% de areia média e 4,06% de areia fina, e 41,82% de pedregulho, também representada na Tabela 3.

Figura 32: Curva granulométrica, 100% RD.



Fonte: Autor (2024)

Com base na Figura 32, para calcular os parâmetros geotécnicos de C_u e C_c , é necessário identificar os valores correspondentes a D_{10} , D_{30} e D_{60} , que representam os diâmetros associados às porcentagens de 10%, 30% e 60% passantes, respectivamente.

Para o diâmetro correspondente a 10% de material passante tem-se o valor de 0,13 mm. Já para o diâmetro correspondente a 30% de material passante, o valor obtido foi de 0,38 mm. Em relação ao diâmetro correspondente a 60% de material passante encontra-se o valor de 3,6 mm. Os coeficientes calculados com base nos valores estimados são: C_u igual a 27,69, e C_c igual a 0,31. Esses valores indicam que o material possui uma boa dispersão de tamanhos de grãos ($C_u > 6$), mas o C_c sugere que a distribuição dos tamanhos pode não ser ideal para materiais bem graduados (o intervalo usual para C_c é entre 1 e 3).

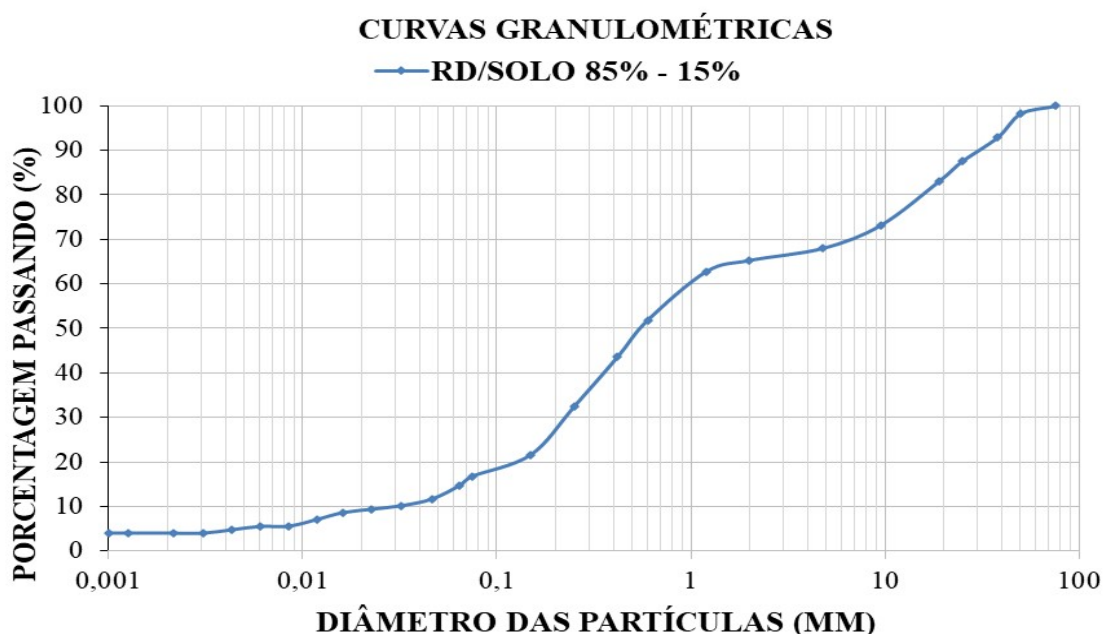
Para determinar se um material é bem-graduado ou mal graduado com base nos coeficientes C_u e C_c , utilizam-se os seguintes critérios, geralmente adotados pela ASTM D2487 para solos granulares (areias e cascalhos). Assim sendo, apesar do C_u indicar uma boa dispersão de tamanhos, o C_c fora do intervalo ideal implica que o material é mal graduado segundo os critérios mencionados. No caso da amostra RD, tem-se uma amostra mal graduada com C_c menor que 1.

A análise granulométrica da mistura contendo 85% de resíduo de demolição e 15% de solo indicou a seguinte distribuição: 4,77% de argila, 9,84% de silte e 50,74% de areia, composta por 13,44% de areia grossa, 30,35% de areia média e 6,95% de areia fina, além de 34,65% de pedregulho, conforme demonstrado na Tabela 3.

A amostra composta por 85% de Resíduo de Demolição (RD) apresentou valores significativos de coeficientes granulométricos, que são indicadores fundamentais para a classificação e avaliação do comportamento geotécnico de solos e materiais granulares. Os valores de diâmetro efetivo (D_{10}), diâmetro correspondente a 30% de retenção (D_{30}) e diâmetro correspondente a 60% de retenção (D_{60}) foram 0,03 mm, 0,23 mm e 1,0 mm, respectivamente. Com esses dados, o coeficiente de uniformidade (C_u), é igual a 33,33, e o coeficiente de curvatura (C_c), é igual a 1,76. Esses valores indicam que a distribuição granulométrica da amostra RD possui uma ampla variação de tamanhos de partículas, o que sugere boas condições para compactação e estabilidade estrutural.

De acordo com a literatura técnica, uma amostra é considerada bem graduada quando apresenta um coeficiente de uniformidade (C_u) maior que 4 para materiais arenosos ou maior que 6 para materiais pedregulhosos, e um coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 e 3. Os valores obtidos para a amostra RD atendem a esses critérios, o que a classifica como um material bem graduado. Essa característica é vantajosa para aplicações geotécnicas, como camadas de cobertura em aterros sanitários, pois garante uma boa distribuição de partículas, favorecendo a compactação e reduzindo a permeabilidade. Além disso, a boa graduação contribui para a estabilidade do material em condições de serviço, tornando-o adequado para a finalidade proposta no estudo.

Figura 33: Curva granulométrica, mistura 85% RD/15% Solo.

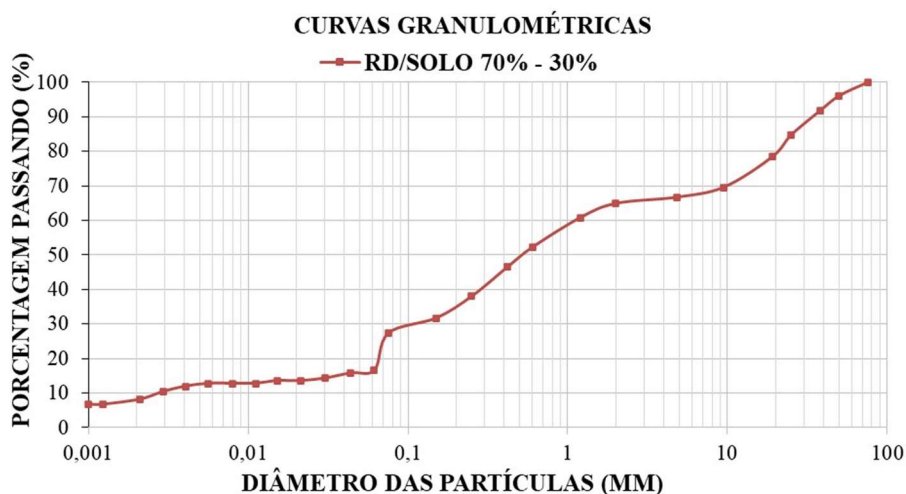


Fonte: Autor (2024)

Para a mistura contendo 70% de resíduo de demolição e 30% de solo, observou-se a seguinte composição: 8,14% de argila, 8,38% de silte e 48,33% de areia, sendo 12,69% de areia grossa, 20,51% de areia média e 15,13% de areia fina, com 35,15% de pedregulho, conforme apresentado na Tabela 3.

A análise granulométrica da amostra 70-30, revelou os seguintes dados geotécnicos: $D_{10}=0,002$ mm, $D_{30}=0,120$ mm, e $D_{60}=1,100$ mm. Esses valores indicam uma ampla distribuição de partículas de diferentes tamanhos, o que é evidenciado pelo coeficiente de uniformidade ($C_u= 550$), significativamente superior ao valor mínimo exigido pela literatura técnica para materiais bem graduados. Esse parâmetro reflete a existência de partículas de tamanhos variados, o que favorece boas condições de compactação e resistência mecânica. Por outro lado, o coeficiente de curvatura ($C_c=6,55$) excede o intervalo típico considerado ideal (entre 1 e 3), indicando que a proporção de partículas intermediárias na amostra pode ser maior do que o esperado para materiais com uma curva granulométrica convencional, sendo considerado mal graduado.

Figura 34: Curva granulométrica, mistura 70% RD / 30% Solo.



Fonte: Autor (2024)

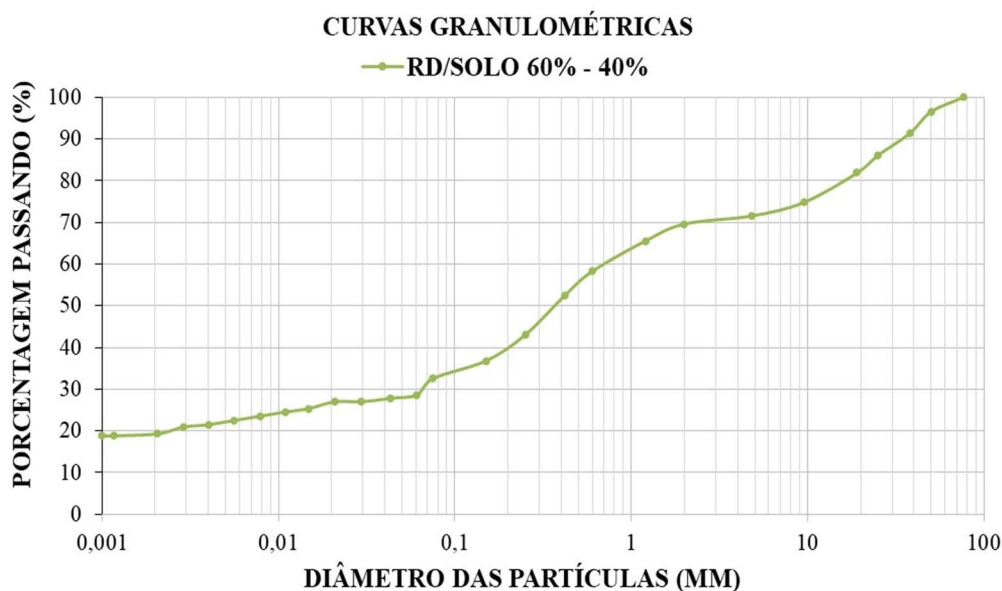
Por fim, a análise granulométrica da mistura composta por 60% de resíduo de demolição e 40% de solo mostrou uma composição de 19,27% de argila, 9,35% de silte e 41,03% de areia, sendo 11,37% de areia grossa, 21,47% de areia média e 8,19% de areia fina, além de 30,35% de pedregulho, conforme detalhado na Tabela 3.

A análise granulométrica da mistura composta por 60% de resíduo de demolição e 40% de solo do Mutange revelou que mais de 70% de sua composição é formada por partículas de granulometria mais graúda, sendo 41,03% de areia e 30,35% de pedregulho. A fração arenosa está distribuída entre 11,37% de areia grossa, 21,47% de areia média e 8,19% de areia fina, demonstrando uma predominância de partículas de tamanho intermediário a grosseiro. Esse resultado é relevante, pois indica que, mesmo com a presença significativa de solo do Mutange na composição, o material mantém uma característica predominantemente granular, o que favorece propriedades como resistência mecânica e estabilidade estrutural em aplicações geotécnicas.

A presença expressiva de areia e pedregulho na mistura sugere que a incorporação do solo do Mutange não alterou significativamente a estrutura granular do material, permitindo que ele preserve suas características de compactidade e permeabilidade. Além disso, a fração fina da amostra, composta por 19,27% de argila e 9,35% de silte, representa menos de um terço da composição total, o que indica uma baixa plasticidade e menor tendência à retenção de água

em comparação a materiais predominantemente argilosos. Essas características tornam o material potencialmente adequado para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, uma vez que a predominância de fração granular pode favorecer a estabilidade superficial, reduzir riscos de erosão e permitir um melhor controle do fluxo de água na camada final do aterro.

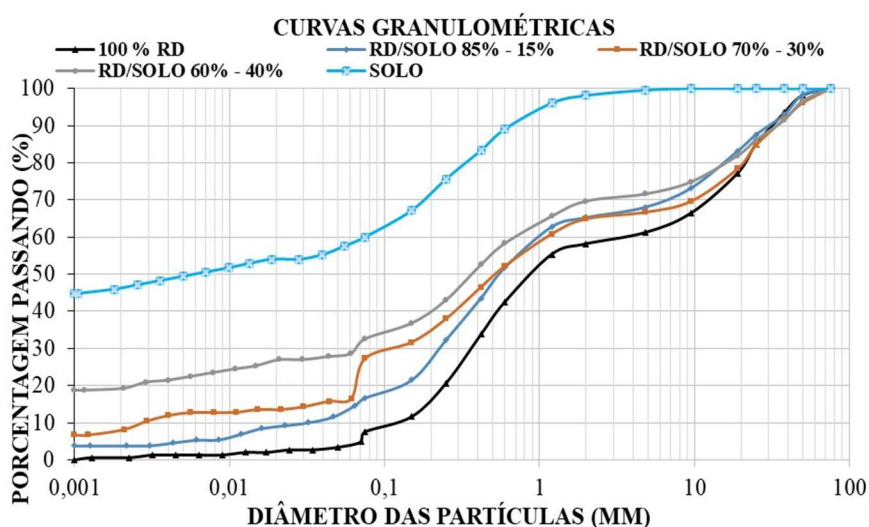
Figura 35: Curva granulométrica, mistura 60% RD / 40% Solo.



Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados apresentados, pode-se afirmar que a amostra 60-40 é mal graduada, em conformidade com a Figura 35. Nesse sentido, destaca-se que existe uma predominância de materiais grosseiros como areias e pedregulhos.

Figura 36: Curva comparativa de distribuição granulométrica



Fonte: Autor (2024)

Tabela 3: Percentagem de argila, silte, areia e pedregulho nas amostras.

Amostra	Argila%	Silte%	Areia%	Pedregulho%
RD	0,62%	7,56%	50,62%	41,82%
SOLO	45,97%	11,52%	40,65%	1,86%
85% RD / 15 % Solo	4,77%	9,84%	50,74%	34,65%
70% RD / 30% Solo	8,14%	8,38%	48,33%	35,15%
60% RD / 40% Solo	19,27%	9,35%	41,03%	30,35%

Fonte: Autor (2024)

5.1.2 Ensaio de densidade real dos grãos

Os resultados da análise de Densidade Real dos Grãos (RD) para as diferentes misturas de resíduo de demolição (RD) e solo são apresentados a seguir:

O resíduo de demolição (RD) apresentou uma densidade real dos grãos de $2,689 \text{ g/cm}^3$. Esse valor indica uma alta compactação e uma composição mineralógica que favorece a resistência mecânica. A densidade relativamente elevada é característica desse tipo de material, que é predominantemente composto por fragmentos de concreto e outros agregados,

conferindo-lhe propriedades adequadas para aplicações em engenharia civil, incluindo seu potencial utilização em camadas de cobertura em aterros sanitários.

O solo analisado revelou uma densidade real dos grãos de $2,623 \text{ g/cm}^3$. Este valor é compatível com as propriedades típicas de solos argilosos, que frequentemente apresentam menor densidade devido à sua composição. A menor densidade em comparação ao resíduo de demolição sugere uma estrutura menos compacta, refletindo a presença significativa de partículas finas, como argila. Essa característica pode impactar a capacidade de suporte e a permeabilidade do material, fatores cruciais para sua aplicação em sistemas de cobertura.

A mistura composta por 85% de resíduo de demolição e 15% de solo apresentou uma densidade real dos grãos de $2,690 \text{ g/cm}^3$. Este resultado indica que a adição de solo à mistura não alterou significativamente a densidade em relação ao RD puro, mantendo-se na ordem de grandeza. A predominância do resíduo de demolição sugere que as características desse material ainda são dominantes, o que pode contribuir para uma boa compactação e resistência, tornando essa mistura adequada para aplicações que exigem estabilidade.

Para a mistura contendo 70% de resíduo de demolição e 30% de solo, a densidade real dos grãos foi de $2,687 \text{ g/cm}^3$. Este valor demonstra uma leve redução em relação à mistura anterior, indicando que a maior proporção de solo começa a influenciar as propriedades físicas do material. Apesar disso, a densidade ainda sugere um comportamento favorável em termos de compactação e resistência, refletindo a capacidade do material de ser utilizado em situações que demandam suporte estrutural.

A densidade real dos grãos para a mistura de 60% de resíduo de demolição e 40% de solo foi de $2,646 \text{ g/cm}^3$. Este valor é o mais baixo entre as amostras analisadas, evidenciando o impacto significativo da adição de solo à mistura. A maior fração de material arenoso sugere uma redução na compactação geral, o que pode resultar em uma diminuição na resistência mecânica. Embora essa mistura ainda possa ser considerada para aplicações em camadas de cobertura, sua menor densidade real requer uma avaliação cuidadosa das propriedades de permeabilidade e comportamento mecânico para garantir a eficácia em contextos de engenharia.

Tabela 4: Densidade real dos grãos, quadro comparativo

RD	SOLO	(85-15)	(70-30)	(60-40)
2,689	2,623	2,690	2,687	2,646

Fonte: Autor (2024)

A densidade real dos materiais influencia diretamente o desempenho da camada de cobertura de aterros sanitários, afetando compactação, permeabilidade, controle de gases e retenção de umidade. Os materiais mais próximos de solos argilosos ($\rho_s = 2,6\text{--}2,8 \text{ g/cm}^3$) são frequentemente preferidos devido à baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de umidade.

5.1.3 Ensaio de Limites de Consistência

Os ensaios para determinar os índices de plasticidade (IP) dos materiais, com diferentes composições de solo e resíduo de demolição, apresentaram os seguintes resultados:

Para o material constituído por 100% de resíduo de demolição, o material não apresentou limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), sendo considerado não plástico.

No caso do solo puro (100% solo), o limite de liquidez (LL) de 34,8% e o de plasticidade (LP) 26,7%, resultando no índice de plasticidade (IP) obtido foi de 8,10.

Na mistura contendo 85% de resíduo de demolição e 15% de solo, assim como no 100% RD o material não apresentou limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), sendo considerado não plástico.

Para a composição com 70% de resíduo de demolição e 30% de solo, o limite de liquidez (LL) foi de 29,8% e o de plasticidade (LP) 22,4%, resultando no índice de plasticidade (IP) 7,4.

Na mistura com 60% de resíduo de demolição e 40% de solo, o limite de liquidez foi de 24,9% e o de plasticidade foi de 15,9%, resultando no índice de plasticidade (IP) de 9,0.

As amostras onde foi possível ser determinado o IP, segundo Caputo, podem ser classificadas como medianamente plásticas (possuindo índice $7 < IP < 15$).

Apesar do solo analisado ser argiloso, o IP obtido não apresentou grande variação em relação as demais amostras analisadas. Em função do solo não apresentar uma alta plasticidade devido as suas características granulométricas.

Tabela 5:Índice de plasticidade.

	RD	SOLO	(85 -15)	(70-30)	(60-40)
IP	NA	8,10	NA	7,40	9,00
LL	NA	34,80	NA	29,80	24,90
LP	NA	26,70	NA	22,40	15,90

Fonte: Autor (2024)

5.2 Ensaio de Compactação

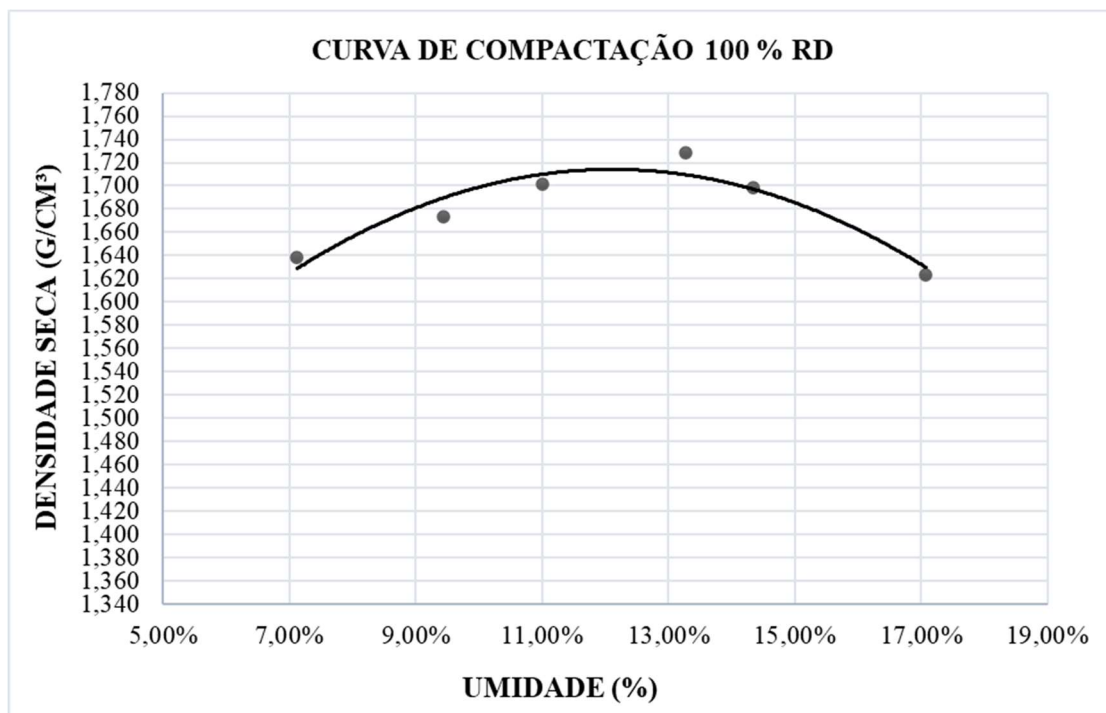
Em uma célula de aterro, a redução do índice de vazios e o aumento da densidade do solo que compõe essa camada são essenciais para melhorar diversas propriedades do solo, como resistência e permeabilidade. Essa melhoria é alcançada por meio da compactação do solo na camada.

Com isso, foram realizados os ensaios de compactação, utilizando a energia do tipo Proctor Normal em corpos de prova compostos por solo puro, bem como em misturas de solo com diferentes porcentagens de resíduo de demolição (RD) e solo: 85%-15%, 70%-30% e 60%-40%, além de 100% de RD.

Os parâmetros avaliados (peso específico seco máximo e umidade ótima) estão apresentados na Tabela 06.

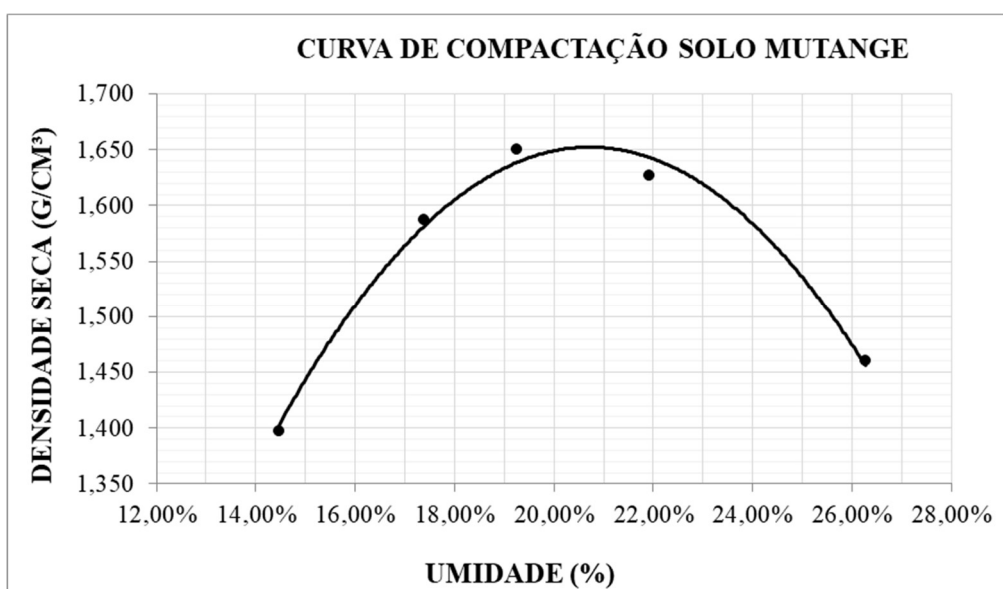
As figuras 37 a 42 apresentadas a seguir, mostram as curvas de compactação traçadas com os valores obtidos nestes ensaios, para densidade seca e teor de umidade.

Figura 37: Curva de Compactação RD.



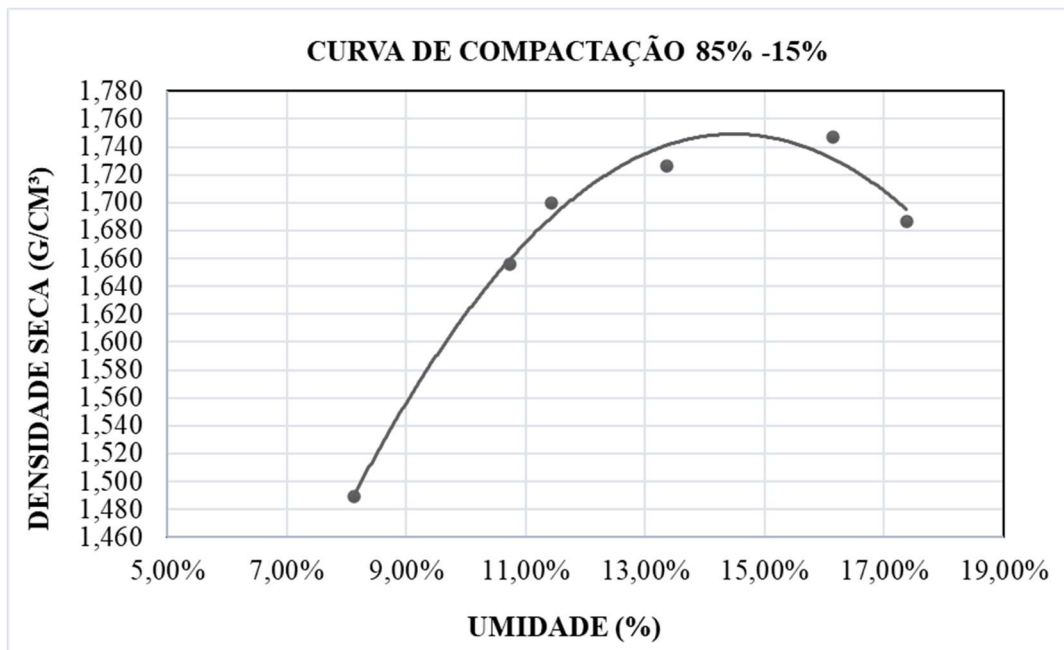
Fonte: Autor (2024)

Figura 38: Curvas de compactação solo



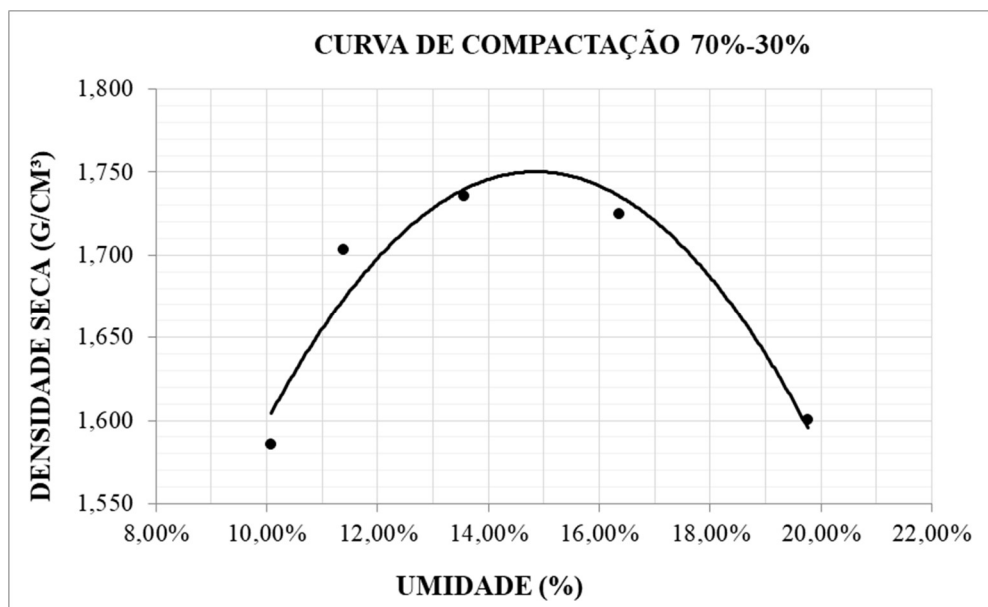
Fonte: Autor (2024)

39: Curva de compactação Mistura 85%- 15%



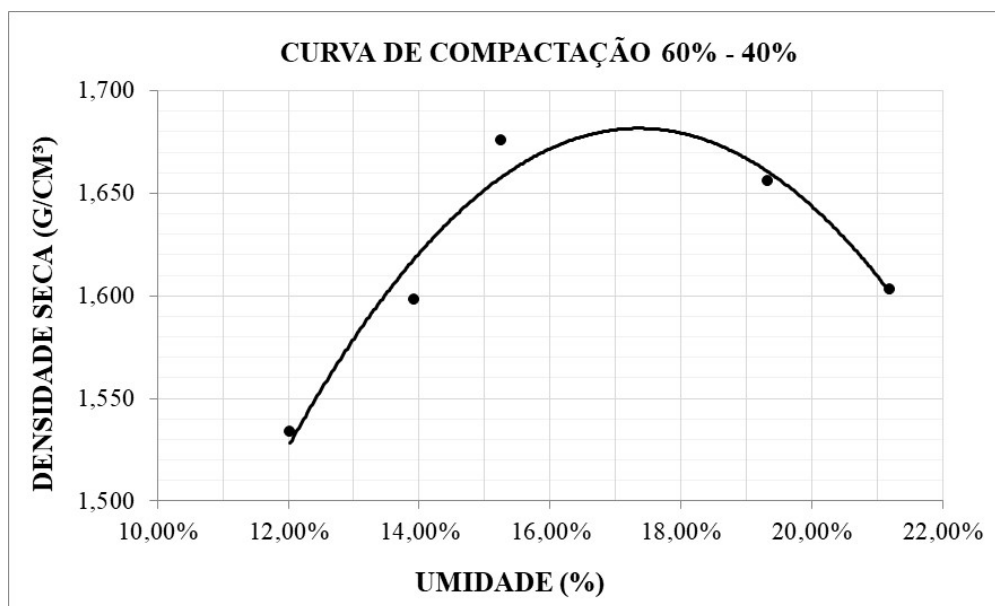
Fonte: Autor (2024)

Figura 40:Curva de Compactação 70%-30%



Fonte: Autor (2024)

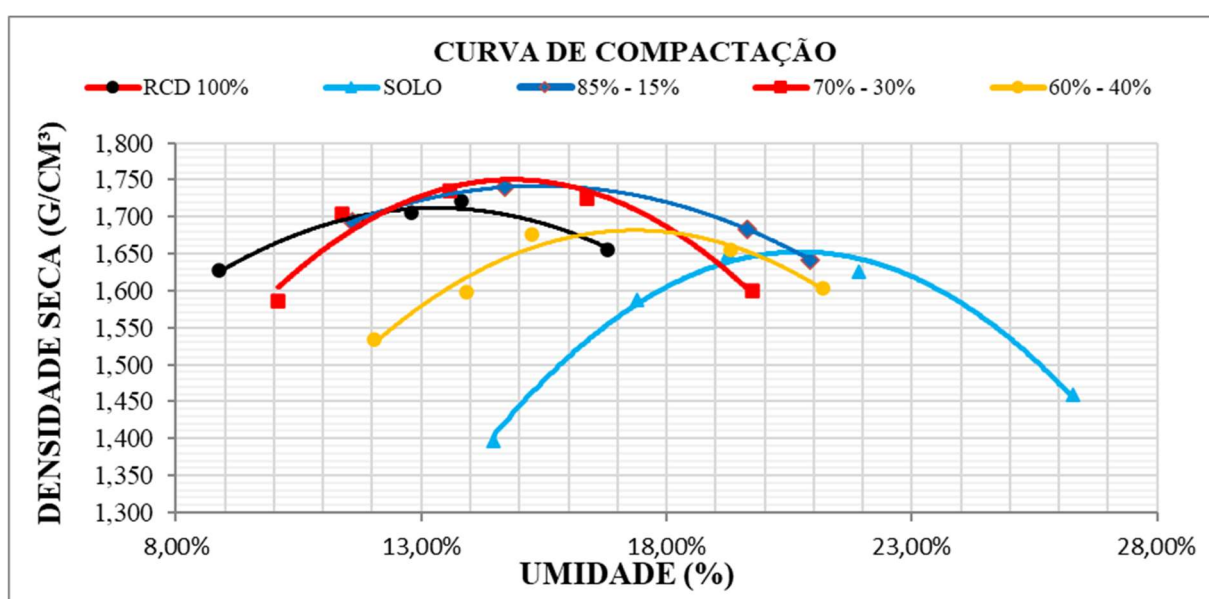
Figura 41: Curva de Compactação 60%-40%



Fonte: Autor (2024)

A seguir, a figura 42, apresenta as curvas de compactação do solo puro e do solo misturado com diferentes proporções de RD, permitindo uma análise comparativa das propriedades de compactação dessas misturas.

Figura 42: Curva Compactação Comparativa.



Fonte: Autor (2024)

Tabela 6: Umidade ótima e densidade máxima.

	RD	SOLO	(85 -15)	(70-30)	(60-40)
Umidade ótima (%)	13,31	20,72	15,42	14,85	17,35
Dens. Máxima (g/cm³)	1,71	1,65	1,74	1,75	1,68

Fonte: Autor (2024)

A curva de compactação do solo revela que o peso específico seco máximo obtido foi de 1,65 kN/m³, o que está abaixo do esperado para solos argilosos, que normalmente apresentam valores de densidade seca máxima entre 14 e 15 kN/m³. A umidade ótima se estabeleceu em torno de 20,72%, o que também é inferior à faixa típica para solos argilosos, que varia entre 25% e 30%. Esses resultados sugerem que o solo testado apresenta características específicas que influenciam sua resposta à compactação.

A adição de resíduo de demolição (RD) ao solo provoca alterações significativas nas características da curva de compactação. A inclusão de RD aumenta a proporção de material arenoso na amostra e, conseqüentemente, a granulometria da mistura em comparação com o solo argiloso puro. Este aumento na granulometria resulta em pesos específicos máximos mais elevados e em uma diminuição das umidades ótimas, um fenômeno que pode ser acentuado por reações de hidratação do material cimentício ainda reativo presente no RD.

Ao analisar a mistura com 85% de RD e 15% de solo, observa-se que o peso específico seco máximo teve um leve aumento, atingindo 1,74 kN/m³, enquanto a umidade ótima apresentou uma diminuição, estabelecendo-se em cerca de 15,42%. Essa pequena variação na adição de RD manteve o peso específico seco máximo quase inalterado em relação ao solo puro.

Com o aumento do teor de RD para 70% na mistura com 30% de solo, a curva de compactação novamente mudou. O peso específico máximo continuou praticamente constante, enquanto a umidade ótima diminuiu para 14,85%. Em uma mistura de 40% de solo e 60% de RD, a umidade ótima foi de 17,35%, e o peso específico seco máximo apresentou uma leve redução, alcançando aproximadamente 1,68 kN/m³.

Vale ressaltar que a porcentagem de areia presente no RD, composta por grãos de diâmetro maior do que os do solo argiloso, tende a aumentar os valores de peso específico máximo e a reduzir os índices de umidade ótima. Observa-se também que, à medida que a proporção de RD na mistura com o solo aumenta, as curvas de compactação adquirem um

formato mais achatado. Esse comportamento indica uma menor sensibilidade da variação do peso específico seco máximo em relação à umidade, reflexo da predominância de características de solos arenosos na mistura resultante.

5.3 Ensaio de Permeabilidade

A análise do resíduo de demolição (RD) revelou que o coeficiente de permeabilidade (k) apresenta uma ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s. Este valor é considerado significativo, dado que o agregado reciclado é predominantemente composto por frações de areia. A amostra foi compactada em sua umidade ótima, o que reforça a ordem de grandeza mencionada, indicando uma elevada permeabilidade, característica típica de materiais que exibem comportamento semelhante ao de solos arenosos.

Em relação à análise do solo, observou-se que o coeficiente de permeabilidade (k) apresenta uma ordem de grandeza de 10^{-6} cm/s. Esse valor está em consonância com as características do solo da região, que possui aproximadamente 46% de argila, conforme detalhado na distribuição granulométrica apresentada na tabela 3. A amostra também foi compactada em sua umidade ótima, resultando em um material classificado como de baixa permeabilidade, em razão de sua composição conter uma proporção significativa de material arenoso.

No que diz respeito à análise da mistura composta por 85% de RD e 15% de solo, o coeficiente de permeabilidade (k) também apresentou uma ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s. Este resultado indica que, mesmo com a adição de solo à amostra, que visava aumentar sua permeabilidade, a mistura continuou a exibir características típicas do resíduo, apresentando aproximadamente 85% de material arenoso, conforme a distribuição granulométrica da tabela 4. A amostra foi compactada em sua umidade ótima, sendo classificada como de alta permeabilidade.

No caso da mistura contendo 70% de RD e 30% de solo, o coeficiente de permeabilidade (k) também se manteve na ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s. Embora a adição do solo na amostra tenha sido duplicada em relação à mistura anterior, resultando em um desempenho superior, essa alteração não foi suficiente para modificar a ordem de grandeza do material, que continuou apresentando aproximadamente 83% de material arenoso, conforme a distribuição granulométrica da tabela 3. A amostra foi compactada em sua umidade ótima e é considerada de alta permeabilidade.

Por fim, na análise da mistura composta por 60% de RD e 40% de solo, observou-se que o coeficiente de permeabilidade (k) apresenta uma ordem de grandeza de 10^{-6} cm/s. Este valor é compatível com o tipo de solo da região, que possui cerca de 20% de argila, conforme evidenciado na distribuição granulométrica da tabela 3. A amostra, compactada em sua umidade ótima, foi classificada como de baixa permeabilidade, devido à presença significativa de material arenoso em sua composição.

Tabela 7: Resultados do ensaio de Permeabilidade

RD	SOLO	(85 -15)	(70-30)	(60-40)
4,25E-05	1,61E-06	2,90E-05	1,36E-05	2,68E-06

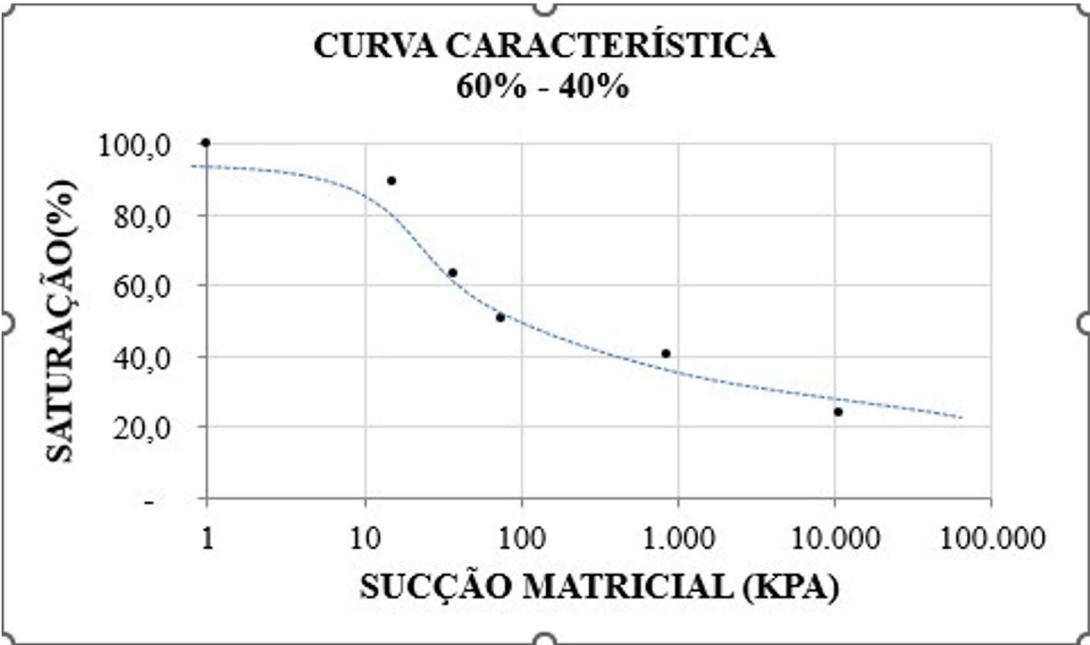
Fonte: Autor (2024)

A EPA (2005) estabelece critérios para aterros sanitários no documento "40 CFR Part 258 - Criteria for Municipal Solid Waste Landfills", conhecido como Subtitle D do Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). Este regulamento recomenda que camadas de cobertura final tenham uma permeabilidade máxima de 10^{-7} cm/s, ou no mínimo de 1×10^{-5} cm/s, especialmente em regiões onde materiais locais mais permeáveis são utilizados, desde que essa equivalência seja justificada por projetos específicos. No Brasil, o Conama aborda o tema em diferentes resoluções, sendo a Resolução Conama nº 404/2008 a mais relevante no contexto de critérios técnicos para aterros sanitários. Esta resolução determina que a camada de cobertura deve ser projetada para minimizar a infiltração de água e controlar a percolação, utilizando materiais de baixa permeabilidade como solos argilosos. Embora a resolução não mencione diretamente o intervalo entre 10^{-7} cm/s, e 1×10^{-5} cm/s, este é amplamente aceito e seguido com base em normas internacionais, como as da EPA.

5.4 Curva Característica

Os resultados da análise da curva de retenção de sucção, obtida por meio da técnica do papel filtro, revelam importantes características sobre o comportamento do solo estudado. Conforme descrito por Feuerhamel (2007), a curva de retenção é fundamental para compreender a capacidade de armazenamento de água em solos não saturados sob diferentes níveis de sucção.

Figura 43:Gráfico de curva característica.



Fonte: Autor (2024)

A análise dos dados coletados, apresentados na tabela 8, demonstra como os pontos médios de umidade do papel filtrante variam em relação à saturação projetada e à saturação medida, em função da sucção aplicada.

Tabela 8: Resultados do ensaio de Curva Característica

Ponto	Umidade do Papel Filtrante (%)	Saturação Projetada (%)	Saturação Medida (%)	Sucção (kPa)
1	13,10	15,0	24,1	10.597
2	30,80	30,0	40,5	840
3	48,10	45,0	50,4	76
4	64,35	60,0	63,6	37
5	92,20	75,0	89,3	15
6	100,00	100,0	100,0	1

Fonte: Autor (2024)

A partir da tabela, observa-se que o primeiro ponto, com uma umidade do papel filtrante de 13,10%, apresentou uma saturação projetada de 15,0% e uma saturação medida de 24,1%, em uma sucção de 10.597 kPa. Essa variação sugere um início significativo do processo de dessaturação dos macro poros do solo.

No segundo ponto, a umidade média aumentou para 30,80%, com saturação projetada de 30,0% e saturação medida de 40,5%, acompanhada de uma sucção de 840 kPa, indicando um comportamento mais estável em relação à retenção de água. À medida que avançamos para o terceiro ponto, com 48,10% de umidade, a saturação projetada 45% e a saturação medida 50,4% se aproximam, demonstrando a influência da sucção de 76 kPa.

Nos pontos subsequentes, a umidade do papel filtrante aumentou para 64,35% e 92,20%, com saturações projetadas de 60,0% e 75,0%, respectivamente. As saturações medidas se mostraram adequadas, com 63,6% e 89,3%, e as sucções caíram para 37 kPa e 15 kPa. Finalmente, no sexto ponto, com 100% de umidade, tanto a saturação projetada quanto a medida alcançaram 100%, indicando a total saturação do solo em uma sucção mínima de 1 kPa.

A curva de retenção obtida apresenta um comportamento bimodal, refletindo uma macroestrutura e microestrutura bem definidas, e sugere uma complexidade nas interações hídricas presentes, conforme descrito por Feuerhamel (2007).

Ainda no contexto da curva característica da amostra 60% RD – 40% Solo do Mutange, percebe-se a relação entre a sucção matricial e a saturação do material. Observa-se que, em baixas tensões de sucção (≤ 10 kPa), a mistura encontra-se próxima da saturação, com valores acima de 80%, indicando que o material possui uma boa capacidade inicial de retenção de água. Isso sugere que a presença do solo argiloso da Encosta do Mutange influencia significativamente o comportamento do material nas condições de umidade elevada, retardando a drenagem imediata da água infiltrada.

À medida que a sucção matricial aumenta para valores entre 10 e 1.000 kPa, ocorre uma transição acentuada na saturação do material, passando de aproximadamente 80% para valores próximos a 40%. Esse comportamento indica que, nesse intervalo de sucção, o material começa a perder água de maneira mais significativa, com a porção granular do resíduo de demolição (RD) contribuindo para uma drenagem mais eficiente. Esse perfil de dessecação sugere que o material possui uma perda gradual de umidade, o que é favorável para a aplicação em camadas

de cobertura de aterros sanitários, pois evita a secagem brusca que pode levar à fissuração e erosão superficial.

Em altas tensões de sucção (> 1.000 kPa), a curva apresenta um comportamento mais estável, com a saturação reduzindo de forma mais suave e atingindo valores inferiores a 20%. Esse comportamento indica que, mesmo em condições de sucção elevada, o material ainda mantém um resíduo de umidade, possivelmente retido nas frações mais finas da matriz argilosa. Isso é um fator positivo para a aplicação como camada de cobertura em aterros sanitários, pois garante que o material não se torne excessivamente seco e suscetível à erosão superficial.

5.5 Ensaio de Erodibilidade

5.5.1 Ensaio de dispersão rápida

Este ensaio permite a análise da desagregação do material testado. Inicialmente, observou-se que a amostra 60% - 40%, composta por um pequeno torrão resultante de uma compactação, apresentou desagregação. Após 25 minutos do início do ensaio, a amostra apresentava desagregação grau 3 e permaneceu estável até o final do ensaio que durou 1 hora. Sendo classificada como não dispersiva.

Quadro 5: Avaliação qualitativa do ensaio de dispersão rápida.

Mistura 60% RD + 40% Solo	Início do ensaio	Final do ensaio	Classificação
	Desagrega e não dispersa	Desagrega e não dispersa	Não dispersivo

Fonte: Autor (2024)

5.5.2 Ensaio de desagregação

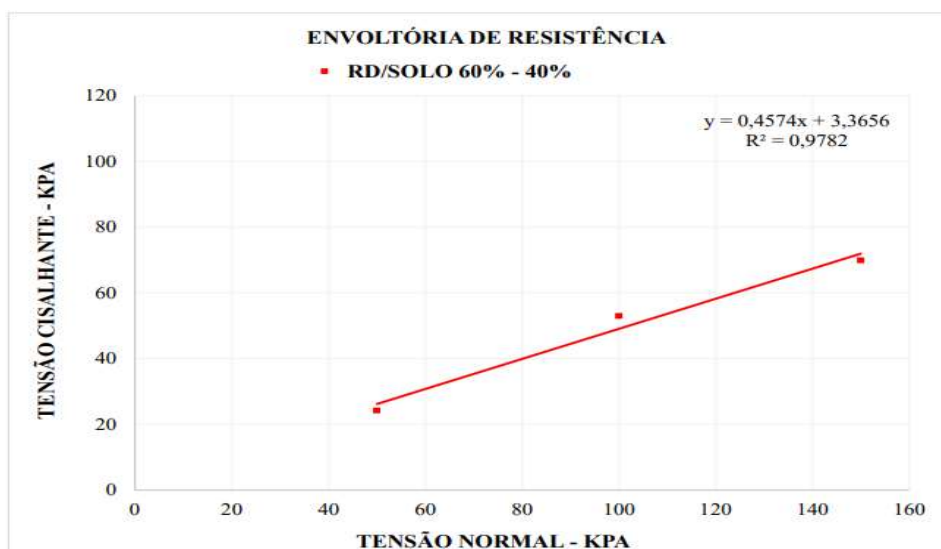
Durante o ensaio, observou-se que a amostra moldada a partir da mistura 60% RD + 40% Solo, apresentou no primeiro estágio uma média absorção de água, mas sem alterações perceptíveis na estrutura. No segundo estágio, ao elevar o nível de água para 1/3 da altura da amostra, notou-se que as quatro extremidades inferiores sofreram desagregação, sem formação

de "nuvem" coloidal. No terceiro estágio, com o aumento do nível de água para 2/3 da altura da amostra, a desagregação por abatimento observada no estágio anterior intensificou-se, mantendo-se a "nuvem" coloidal. No quarto estágio, ao elevar o nível de água até o topo da amostra, verificou-se que as paredes das extremidades desagregaram logo no início. No dia seguinte, 24 horas após o início do ensaio, a amostra apresentou desagregação total decorrente de abatimento causado pela hidratação e desaeração ocorridas na fase de inundação. Nesse mecanismo, o processo de saturação neutraliza as forças de sucção, gerando pressões que desestruturam e desagregam o material.

5.6 Ensaio de Cisalhamento Direto

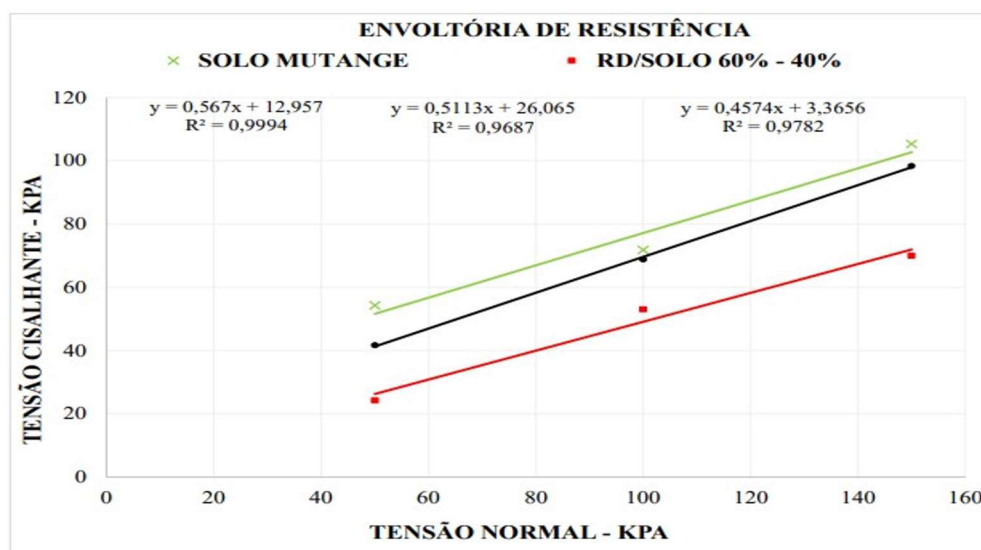
Os ensaios foram realizados em uma prensa mecânica, conforme ilustrado na Figura 23, equipada com uma célula de carga e LVDTs (transdutores de deslocamento linear) verticais e horizontais. Para garantir um teste eficiente, adotou-se uma velocidade de 0,33 mm/min, o que resultou em uma deformação aproximada de 20% até a estabilização da leitura de resistência, permitindo um ensaio rápido em termos das tensões totais atuantes. Os carregamentos aplicados foram de 0,5 kgf/cm², 1,0 kgf/cm², 1,5 kgf/cm² e 2,0 kgf/cm², todos em condições de umidade saturada, com o objetivo de determinar os parâmetros de cisalhamento do solo, especificamente o ângulo de atrito (ϕ) e o intercepto de coesão (c).

Figura 44: Envoltória de Resistência 60/40



Fonte: Autor (2024)

Figura 45:Envoltória de Resistência solo, RD e mistura 60/40



Fonte: Autor (2024)

De acordo com os dados apresentados na Figura 45, a amostra da mistura 60%-40%, sob condição inundada e compactação normal, apresentou uma coesão de 3,3 kPa. O ângulo de atrito, medido em 24,56 graus, indica uma semelhança com os ângulos de atrito típicos de solos arenosos. Os resultados dos ensaios estão ilustrados nas Figuras 44 e 45, que apresentam as curvas de tensão versus deformação para as amostras em estado inundado. A partir dessas curvas, foi possível traçar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, que permite a análise do comportamento de cisalhamento do solo.

A coesão observada e o ângulo de atrito compatível com valores de areias granulares sugerem que a mistura 60%-40% possuem características que podem ser vantajosas para a estabilidade das coberturas de aterros sanitários. A literatura indica que solos com essas propriedades são menos suscetíveis à liquefação e ao deslizamento, especialmente em condições saturadas. Além disso, esses parâmetros são fundamentais para garantir a segurança estrutural das coberturas, contribuindo para a prevenção de falhas em aterros.

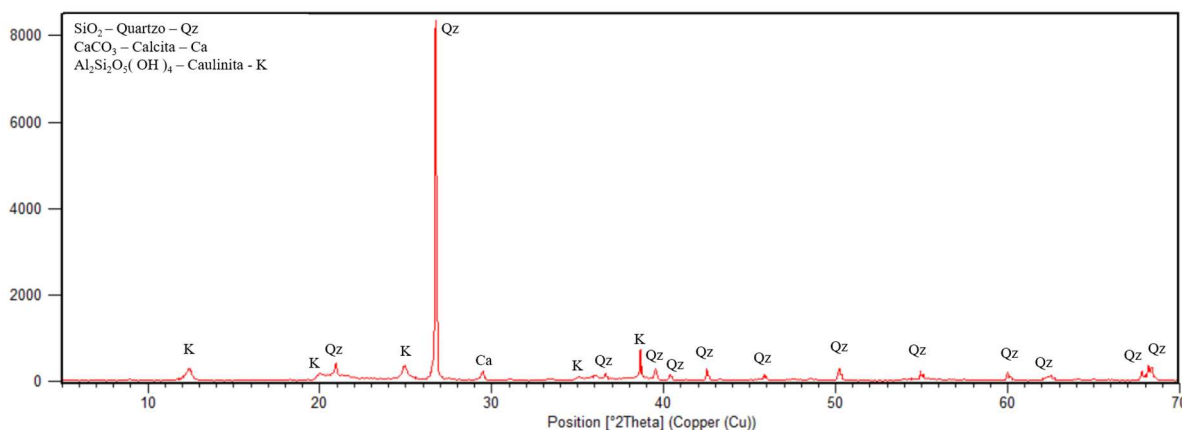
5.7 Caracterização Química

A caracterização dos materiais foi realizada por meio de dois ensaios principais: Difração de Raios-X (XRD) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDX). A seguir, são apresentados os detalhes dos equipamentos e parâmetros utilizados nas análises:

5.7.1 Difração de Raio X (XRD)

A análise de difração de raios-X foi conduzida utilizando o difratômetro XRD 6000 da Shimadzu. As medições foram realizadas com uma tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. Os dados de difração foram coletados em um intervalo de 5° a 70° , com uma resolução angular de $0,02^\circ$ por passo e uma velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$. As fendas de divergência e de espalhamento empregadas tinham ângulos de 1° e 0,30 mm, respectivamente, e a radiação utilizada foi a Cu $K\alpha$.

Figura 46: Gráfico do ensaio de difração de raio x



Fonte: Autor (2024)

5.7.2 Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raios X (EDX)

A análise elementar foi realizada por meio de espectroscopia de dispersão de energia (EDX), utilizando o equipamento EDX-800hs da Shimadzu. O material foi analisado sob um filme de polipropileno, permitindo a identificação e quantificação dos elementos presentes na amostra.

O principal componente encontrado na amostra foi o dióxido de silício (SiO_2), com uma concentração de 49,7%. Este mineral está amplamente presente em quase todas as rochas e solos. Em seguida, destaca-se o óxido de alumínio (Al_2O_3), com 32,33%, um mineral de grande relevância industrial, especialmente na fabricação de cerâmicas. Outros elementos foram identificados em concentrações menores, como o óxido de ferro (Fe_2O_3) com 7,81%, o óxido de cálcio (CaO) com 6,27%, e o dióxido de titânio (TiO_2) com 1,51%. Também foram encontrados o óxido de magnésio (Mg O) com 0,89%, o óxido de potássio (K_2O) com 0,71%, o óxido sulfúrico (SO_3) com 0,33%, o cloro (Cl) com 0,14%, o dióxido de zircônio (ZrO_2) com 0,13%, o óxido de manganês (MnO) com 0,03%, e o óxido de estrôncio (SrO), conforme a Tabela 8 apresenta.

Tabela 8:Resultado dos elementos EDX.

Análise	Resultado %	Std. Dev.	Proc. – Calc.	Line	Int. cps/uA
SiO_2	49.783	0,109	Quan - FP	SiKa	6.6056
Al_2O_3	32.333	0.119	Quan - FP	AlKa	2.4003
Fe_2O_3	7.818	0.022	Quan - FP	FeKa	20.2459
CaO	6.271	0.021	Quan - FP	CaKa	2.9562
TiO_2	1.512	0.015	Quan - FP	TiKa	2.7757
MgO	0.890	0.061	Quan - FP	MgKa	0.0286
K_2O	0.718	0.010	Quan - FP	K Ka	0.0893
SO_3	0.334	0.009	Quan - FP	S Ka	0.0982
Cl	0.148	0.013	Quan - FP	ClKa	0.0048
ZrO_2	0.132	0.001	Quan - FP	ZrKa	4.2626
MnO	0.033	0.003	Quan - FP	MnKa	0.0616
SrO	0.030	0.001	Quan - FP	SrKa	0.9370
CO_2	0.000	0.000	Quan - FP	C Ka	0.0738

Fonte: Autor (2024)

5.8 Classificação Ambiental

5.8.1 Ensaio de Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos na **NBR 10005:2004**. Os resultados obtidos indicaram que nenhum dos elementos analisados ultrapassou os valores de referência definidos pela norma, conforme mostra a tabela 9, o que caracteriza o material como **não perigoso**.

A avaliação da lixiviação é fundamental para verificar o potencial de liberação de substâncias contaminantes no meio ambiente, especialmente em materiais destinados à cobertura final de aterros sanitários. A ausência de concentrações elevadas de metais pesados ou outros compostos potencialmente nocivos demonstra que o resíduo de demolição (RD) utilizado, tanto isoladamente quanto em mistura com o solo, não apresenta riscos ambientais significativos.

Além disso, a conformidade com a NBR 10005:2004 reforça a viabilidade do uso desse material na camada de cobertura, assegurando que sua aplicação não comprometa a qualidade do solo e das águas subterrâneas ao longo do tempo.

Tabela 9: Concentração de metais no RCC – Ensaio de lixiviação

PARÂMETROS	RESULTADOS		UND	ABNT NBR 10004 - ANEXO F
	RCD I (7580)	RCD II (7581)		
Arsênio Total (As)	<0,00500	<0,00500	mg/L	Máx. 1,0
Bário (Ba)	0,5853	<0,53150	mg/L	Máx. 70,0
Cádmio (Cd)	<0,00100	<0,00100	mg/L	Máx. 0,5
Chumbo (Pb)	0,0141	0,0556	mg/L	Máx. 1,0
Fluoreto Total (F-)	0,72	0,68	mg/L	Máx. 150
Mercúrio (Hg)	<0,0002	<0,0002	mg/L	Máx. 0,1
pH - Potencial Hidrogeniônico (após Lixiviação)	5,43	4,74	U pH	s/Especificação
Prata (Ag)	<0,00500	<0,00500	mg/L	Máx. 5,0
Selênio (Se)	<0,00500	<0,00500	mg/L	Máx. 1,0

Fonte: Autor (2024)

5.8.2 Ensaio de solubilização

O ensaio de solubilização realizado em amostras de resíduos de demolição apresentou em sua grande maioria, resultados compatíveis com os valores de referência apresentados pela **NBR 10004/2004**, com exceção do elemento alumínio, que ultrapassou o limite estabelecido pela norma. Portanto, sendo **classificado como material não inerte**.

Tabela 10: Concentração de metais na mistura 60%-40% – Ensaio de solubilização

PARÂMETROS	RESULTADOS		UND	ABNT NBR 10004 - ANEXO G
	RCD I	RCD II		
Alumínio	1,1629	0,2389	mg/L	Máx. 0,2
Arsênio	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,01
Bário	0,0168	0,0189	mg/L	Máx. 0,7
Cádmio	<0,0010	<0,0010	mg/L	Máx. 0,005
Chumbo	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,01
Cloreto	13,00	7,00	mg/L	Máx. 250
Cobre	0,0119	<0,0050	mg/L	Máx. 2,0
Cromo Total	0,0468	<0,0050	mg/L	Máx. 0,05
Fenóis Totais	<0,00100	<0,00100	mg/L	Máx. 0,01
Ferro	<0,1173	0,0691	mg/L	Máx. 0,3
Fluoreto	<0,100	<0,100	mg/L	Máx. 1,5
Manganês	0,0061	<0,0050	mg/L	Máx. 0,1
Mercúrio	<0,00020	<0,00020	mg/L	Máx. 0,001
Nitrato (Expresso em N)	2,73	4,00	mg/L	Máx. 10,0
pH - Potencial Hidrogeniônico (após Solubilização)	10,10	9,43	U pH	s/Especificação
Prata	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,05
Selênio	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,01
Sódio	6,560	6,970	mg/L	Máx. 200
Sulfato (Expresso em SO ₄)	69,20	118,85	mg/L	Máx. 250
Surfactantes	0,22	0,13	mg/L	Máx. 0,5
Zinco	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 5,0

Fonte: Autor (2024)

6. CONCLUSÃO

Este estudo investigou a viabilidade técnica e ambiental do uso de resíduos de demolição misturados com solo como material alternativo para camadas de cobertura final de aterros sanitários, com foco na cidade de Maceió-AL. A partir das análises realizadas, conclui-se que o material composto por 60% de resíduo de demolição (RD) e 40% de solo apresentou desempenho técnico satisfatório em termos de resistência ao cisalhamento, baixa erodibilidade e condutividade hidráulica adequada, atendendo aos parâmetros exigidos para aplicação em sistemas de cobertura final. Além disso, os ensaios ambientais de lixiviação e solubilização indicaram que o material é classificado como não perigoso e não inerte, confirmando sua compatibilidade ambiental para essa finalidade.

A caracterização física e mecânica evidenciou que a mistura proposta possui propriedades típicas de solos granulares, incluindo densidade máxima de $1,68 \text{ g/cm}^3$, umidade ótima de 17,35% e ângulo de atrito interno de $24,56^\circ$, mesmo em condições de saturação. Tais características são essenciais para garantir a estabilidade e a funcionalidade das camadas de cobertura, especialmente em aterros localizados em regiões tropicais, como Maceió, onde a precipitação intensa exige materiais com alta resistência à erosão. Os valores do coeficiente de permeabilidade (k), que se encontram na ordem de 10^{-6} cm/s , são classificados, de acordo com Quissini (2009), como de baixa permeabilidade, atendendo, portanto, aos requisitos normativos. O ângulo de atrito, obtido por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento em condição inundada, foi de $24,56^\circ$, o que reforça a caracterização do material como solo granular.

O uso do resíduo de demolição também se alinha às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), promovendo a sustentabilidade ambiental ao reduzir a exploração de agregados naturais e ampliar a vida útil dos aterros sanitários. Além disso, a reutilização desses resíduos contribui para a mitigação de impactos ambientais associados à disposição inadequada e ao descarte em locais impróprios, como encostas e corpos d'água.

Apesar dos resultados positivos, é importante destacar que a implementação prática deste material em larga escala requer etapas adicionais, como avaliação do comportamento em longo prazo e adaptação às regulamentações locais. Também se recomenda a realização de

projetos piloto para validar os resultados obtidos em condições reais de operação, especialmente no contexto do clima e do solo da região de Maceió.

A ausência de regulamentação específica para aplicação de resíduos de demolição em camadas de cobertura de aterros sanitários traz implicações relevantes. Primeiro, ela dificulta a padronização de critérios técnicos para o uso de RD em aterros sanitários, como limites de permeabilidade, resistência mecânica e requisitos de segurança ambiental. Segundo essa lacuna pode desestimular a adoção de práticas inovadoras, uma vez que os operadores de aterros e os engenheiros responsáveis enfrentam incertezas regulatórias que podem aumentar os riscos de implementação. Por fim, essa falta de regulamentação contribui para o subaproveitamento do potencial sustentável dos RCD, perpetuando a dependência de materiais naturais e aumentando a pressão sobre os recursos ambientais.

Diante desse cenário, é essencial que o Brasil desenvolva normas técnicas específicas que abordem o uso de RCD em camadas de cobertura de aterros sanitários. Essas normas poderiam incluir critérios detalhados para a caracterização física, química e mecânica dos materiais, requisitos para sua aplicação em diferentes tipos de cobertura e diretrizes para monitoramento e manutenção.

Por fim, o presente estudo oferece uma alternativa viável e sustentável para a gestão de resíduos de demolição, contribuindo para a redução de impactos ambientais e promovendo a economia circular. Este trabalho reforça a importância de pesquisas que integrem aspectos técnicos, econômicos e ambientais, e recomenda-se que estudos futuros explorem novas combinações de materiais e ampliem as análises para outros tipos de resíduos e aplicações.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, confirma-se a viabilidade da utilização de resíduos de demolição como alternativa para a cobertura final de aterros sanitários, reduzindo a demanda por solo natural e promovendo um destino mais sustentável para os resíduos da construção civil. No entanto, considerando a importância da otimização dos materiais e o potencial de aplicação em diferentes cenários, sugere-se a realização de investigações complementares, conforme descrito a seguir:

1. **Avaliação do comportamento de misturas com diferentes tipos de solo,** privilegiando aqueles com maior teor de argila. Essa análise permitiria reduzir a necessidade de solo natural na composição das camadas de cobertura, garantindo ao mesmo tempo características geotécnicas adequadas, como baixa permeabilidade e resistência à erosão.
2. **Investigação do efeito de distintos níveis de britagem nos resíduos de demolição (RD),** com o objetivo de compreender como diferentes granulometrias afetam as propriedades geotécnicas e ambientais das misturas solo-RD. Tal abordagem possibilitaria otimizar as misturas quanto à compactação, resistência ao cisalhamento e permeabilidade, além de avaliar o impacto da variação granulométrica na erodibilidade do material.
3. **Implantação de uma célula experimental em escala real, contendo diferentes proporções de resíduos de demolição e solo,** visando monitorar o comportamento do sistema de cobertura final sob condições ambientais reais. O acompanhamento ao longo do tempo permitiria uma análise mais precisa da estabilidade da camada, sua durabilidade, além dos efeitos de agentes naturais, como precipitação e variações de temperatura, sobre sua permeabilidade e resistência mecânica.

Dessa forma, os estudos futuros contribuirão para o aprofundamento das pesquisas na aplicação dos resíduos da construção civil como cobertura de aterros sanitários, fornecendo dados essenciais para a consolidação desse material como uma alternativa técnica e ambientalmente viável, reduzindo a exploração de solo natural e promovendo uma gestão mais eficiente dos resíduos de demolição.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004 - Resíduos sólidos: classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:2004 - Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

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

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

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

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16099:2012. Solos – Identificação de argilominerais por difração de raios X.** Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025:2012 – Solo – Ensaio de cisalhamento direto – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

AFFONSO, F. J. A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (rcd) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos.** Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro em Ciências em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.** Disponível em: <https://www.abrelpe.org.br>. Acesso em: 30 nov. 2024.

BARROS, M. C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Mestrado em ciência em engenharia civil, Rio de Janeiro, p. 96, 2005.

BURMISTER, D. M. **Principles and Techniques of Soil Identification. Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Meeting of the Highway Research Board**, [s. l.], n. c, p. 402–433, 1949. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/29/29-029.pdf>.

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

BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, p. 312, 2001.

CABRAL, A. E. B.; LIMA, A. S. **Caracterização e classificação dos resíduos da construção civil da cidade de Fortaleza (CE) – Vol. 18, n.2**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, p 169-176, 2013.

SANTOS, R. M. M. & CAMAPUM DE CARVALHO, J., 1998, **Ensaio de Erodibilidade em Voçorocas do Município de Goiânia**. Proc. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, V. 1, pp. 581-588, Brasília.

CARNEIRO, A. P. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom** – Salvador, EDUFBA; Caixa Econômica Federal, p. 312, 2001.

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

CONAMA, Resolução nº 357, de 18 de março de 2011. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Brasília: MMA/CONAMA. 2011.

CONSELHO NACIONAL DE JUSTIÇA (CNJ). **Caso Pinheiro: A maior tragédia que o Brasil já evitou**. Disponível em: <https://www.cnj.jus.br/caso-pinheiro-a-maior-tragedia-que-o-brasil-ja-evitou/>. Acesso em 25 ago. 2023.

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

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

CRTI - Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Parque Tecnológico Samambaia, Campus Samambaia – UFG. **Difração de raio x**. Disponível em: <https://crti.ufg.br/p/35788-difracao-de-raios-x-drx>. Acesso em 06/08/2024.

DIAGONAL. **Documento Técnico Complementar ao Diagnóstico fazer PAS - Parte II: Caderno de Mapas Temáticos**. 2022. Disponível em: <https://diagonalsocial-my.sharepoint.com/personal/maisdialogos_diagonal_social/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpessoal%2Fmaisdiálogos%5Fdiagonal%5Fsocial%2FDocumentos%2FDocumentos%2FDocumento%20T%C3%A9cnico%20Complementar%20%E2%80%93%20Parte%20II%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fmaisdialogos%5Fdiagonal%5Fsocial%2FDocuments%2FDocumentos&ga=1>. Acesso em: 05 março 2025.

FERNANDES, Daniel Pinto. **Metodologia para estabilização química do agregado siderúrgico para aplicação como lastro ferroviário**. 2016. 218 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

FERNANDES, G. **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados à Geossintético**. Tese de doutorado. UNB, Brasília, 2005.

FERREIRA, G. E.; FONSECA JUNIOR, C. A. F. **Mercado de Agregados no Brasil**. In: **MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**. [S. l.: s. n.], 2009. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2043>.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da Formação Serra Geral**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2007.

GOMES, FABIOLA DE SOUZA. **Estudo da Erodibilidade e parâmetros geotécnicos de um solo em processo erosivo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Mestrado em Engenharia Civil, 2001.

GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Gráfica Editora, p 140, 2008.

HB AMBIENTAL. **O que fazer com resíduos de obras**. 2020. Disponível em: <https://www.hbambiental.com.br/o-que-fazer-com-residuos-de-obras>. Acesso em: 07 setembro. 2024.

HOLMGREN, G. G. S. & FLANAGAN, C. P. 1977. “**Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test –Dispersive clays, related pipping and erosion in geotechnical projects**”. ASTM, Special Technical Publication 623: 218 – 239. IN SANTOS & CAMAPUM DE CARVALHO, 1998.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: JOHN, V. M. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Elsevier, 2011. p. 1-20.

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

LAMBE, T. W. and WHITMAN, R. V. (1979), **Soil Mechanics**, John Willey & Sons, New York.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Civil, Rio Grande do Sul, p. 270, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 147, 1997.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry**. In: *CIB Symposium in Construction and Environment: Theory into Practice*, São Paulo, 2000.

LIMA, Luana de Castro. **Solução Pacífica de Conflito: Uma análise sobre o Caso Pinheiro**. Disponível em: <https://www.ajufe.org.br/images/2022/UP_-_artigo_científico.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2023.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, p. 274, 2011.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 307, de 05 de junho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>. Acesso em: 10 jul. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 448, de 18 de janeiro de 2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução n.º 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. 2012.

Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei Federal 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** 2010. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

MASUERO, Ângela Borges. *Estabilização das escórias de aciaria eléctrica com vistas à sua utilização como substituição ao cimento*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

NORONHA, L. GASPARINI, M. C. **Reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos da construção civil**. – Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC), Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.

NUNES, Michael. **Difração de Raios X**. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), s.d. Disponível em: <<https://docente.ifsc.edu.br/michael.nunes/MaterialDidatico/Processos%20Qu%C3%ADmicos/Qu%C3%ADmica%20Inorg%C3%A2nica/drx.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2024.

OLIVEIRA, R. F.; BRAGA, R. M. Q. L. **Sistema de cobertura final de um aterro sanitário para a rmb de Belém-Pa com emprego de resíduos da construção civil**. Universidade Federal do Pará – Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 6. 573. 10.19177, 2017.

PESTANA, R. M. M. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição aplicados em estradas de baixo tráfego**. Dissertação (Mestrado) Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, p. 153, 2008.

PIMENTEL, V.E., 2006. “Landfill Covers with Geosynthetics”. **Simposio Internacional de Tecnologia de Tratamento de Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro, Brasil, 24-27 Abril 2006.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos, São Paulo, p. 140, 1986.

PINTO, C.S., **Curso Básico de Mecânica dos Solos** – São Paulo: Oficina de Texto, 2000.

PINTO, C.S., **Curso Básico de Mecânica dos solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2006.

PORTO, M, E, H, C.; SILVA S, V. **Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas populares**. In: *XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável*, Rio de Janeiro, 2008.

QUISSINI, C. S. **Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos**. Dissertação (Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

RAMOS, B. de F. Indicadores de qualidade dos Resíduos da Construção Civil do Município de Vitória-ES. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p. 190, 2007.

RESIDUOALL. **Resíduos sólidos da construção civil, o que fazer?** Disponível em: <<http://residuoall.com.br/2017/05/17/residuos-solidos-da-construcao-civil-o-que-fazer>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

RIOS, Daiane do Carmo. **Aplicação de dois modelos de balanço hídrico para estudo de camada de cobertura de Aterro Sanitário utilizando solo e Resíduo da Construção Civil (RCC).** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana. 138 p. Feira de Santana, 2016.

ROSE, J. L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais.** Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS G. G. D. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o Caso da Incineração e da Disposição em Aterro.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, p. 193, 2011.

SCHEUTZ, C. KJELDSSEN, P. BOGNER, J. De VISSCHER, A. GEBERT, J. HILGER, H. A. HUBER-HUMER, M. SPOKAS, K. **Microbial methane oxidation process and technologies for mitigation of landfill gas emissions Vol. 27.** *Waste Management Research*, p. 409-433, 2009.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. **Recycling of masonry rubble.** In: *HANSEN, T. C. Recycling of demolished concrete and masonry.* London: Chapman & Hall, 1992. Part two, p. 161-255 (RILEM T. C. Report 6).

SILVA JUNIOR, M. A. B. **Avaliação da potencialidade dos RCD's visando sua aplicação em cobertura final de aterros.** Monografia (Graduação) Universidade de Pernambuco – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, Pernambuco, 2010.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, A. K. B.; SANTOS, C. P.; MACEDO, T. F. **Análise financeira entre os sistemas de cobertura final do tipo convencional e alternativo para aterros sanitários.** Universidade Federal de Pernambuco – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pernambuco, 2018.

SILVEIRA, R. M. B.; CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Execução de Camada de Cobertura Final de Aterros Sanitários de Grande Porte - Estudo de Caso do Aterro Sanitário 120 de Belo Horizonte.** In: VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos. Anais... Belo Horizonte/MG, 2011.

SIMÕES, G. F., LOBATO, L. C. da S.; MARTINS, H. L.; CATAPRETA, C. A. A. **Aplicação de um modelo tridimensional de avaliação de balanço hídrico em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande – MS. Anais... Campo Grande/MS, 2005.

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

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Laboratório de Cristalografia e Caracterização Estrutural (DRX e FTIR)**. Disponível em: <<https://www.fct.unesp.br/#!/departamentos/fisica-quimica-e-biologia/laboratorios/lab--de--cristalografia--e--caracterizacao-estrutural-drx--e--ftir/>>. Acesso em: 30 nov. 2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Microscopia electronica de varredura – MEV**. Disponível em : <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/fisica-e-quimica/prestacao-de-servicos/mev/apresentacao/>. Acesso em 06/08/2024.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency (US EPA). **Guidelines for Water Reuse**. Washington, D.C.: EPA, 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/water-reuse-guidelines-2012.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

VÁSQUEZ, E.; BARRA, M. **Recycling of aggregates in the construction industry**. In: **CIB Symposium in Construction and Environment: Theory into Practice**. In: , 2000, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: [s. n.], 2000. p. 8.

ZORDAN, S. E. **Entulho da Indústria da Construção Civil**, 2001. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm>. Acesso em: 15 Jul. 2023.

ZORNBERG, M.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A., **Analysis and Design of evapotranspirative Cover for hazardous Waste Landfill**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 427-438, 2003.