

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TIAGO EMANUEL SCHUCK

**ALTERNATIVA DE IMPERMEABILIZAÇÃO INFERIOR DE ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

São Leopoldo
2018

TIAGO EMANUEL SCHUCK

**ALTERNATIVA DE IMPERMEABILIZAÇÃO INFERIOR DE ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Oliveira Caetano

São Leopoldo

2018

Dedico este trabalho aos meus pais Erni Schuck e Lilian
Drews Schuck que sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por chegar até aqui, me dando força e coragem para vencer o dia a dia.

Aos meus pais Erni Schuck e Lilian Drews Schuck, por serem a base sólida em minha vida, fornecendo toda a força, incentivo e carinho, nos momentos difíceis. Sou grato por fazerem parte de minha vida e sempre acreditaram que os meus sonhos poderiam ser alcançados.

A minha namorada Marcela Rocha Tortureli de Sá, que acompanhou de perto e ao mesmo tempo de muito longe meu trabalho, me propiciou momentos de alegrias entre uma pausa e outra, me deu conselhos e dicas de como vencer e superar esta etapa, espero sempre retribuir de alguma forma o companheirismo e o amor recebido.

Ao meu amigo e colega David Lamberto Diehl Camacho, pela parceria, conselhos, também de muitas risadas e piadas nas horas de moldagem dos corpos de prova.

Ao professor Dr. Marcelo Oliveira Caetano, pelo desafio proposto em realizar este trabalho literalmente “alternativo”, foi muito importante para orientação no trabalho com aspectos técnicos, dedicação e paciência sempre buscando o melhorar o trabalho.

A banca avaliadora, professor Dr. Felipe Gobbi Silveira e professora Dr^a. Luciana Paulo Gomes pelas considerações, apontamentos e recomendações visando sempre na melhora deste trabalho. Também agradeço a professora Dr^a. Mirtes Caron Peres Ramires e a Caroline Momoli de Carli Rosenbach, pelos conhecimentos específicos na área de geotecnia e ensaios de laboratório obtidos.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Civil da UNISINOS que me exigiram e me ensinaram os conhecimentos para conseguir até aqui.

Aos amigos, colegas e colaboradores Júlio Daudt, Ingrid Schorr, Maurício Schafer, André Stein, Bruno Susin, Diego Brum, Igor Wiskow, Jeremias Gehn, Leonardo Himmer, Márcio Alievi, que acompanharam o trabalho trazendo contribuições pertinentes.

Aos meus amigos e familiares que acompanharam a minha caminhada até este momento, gratidão eterna a todos.

A CRVR (Companhia Rio Grandense de Valorização de Resíduos) pelo fornecimento do solo local (SL) e do *liner* mineral padrão (LMP).

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

A pesquisa aborda dois relevantes temas da Engenharia Civil: Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Geotecnia Ambiental. A necessidade de proteção ambiental em aterros sanitários, através da instalação de camadas de impermeabilização, remete aos controles geotécnicos destes sistemas de tratamento de resíduos. Esta pesquisa versa sobre esse assunto, buscando um desenvolvimento de *liners* que atendam aos requisitos tecnológicos necessários para estas estruturas. Com isso, o trabalho objetivou desenvolver um *liner* mineral alternativo, buscando um empacotamento adequado entre RCD e o solo presente no local, para fins de impermeabilização da camada inferior de aterro sanitário. A ideia foi a substituição do chamado *liner* mineral (composto por argila de baixa permeabilidade), por um *liner* alternativo com resíduos e solo local. Uma das principais justificativas é a frequente necessidade de importação de argila para *liner* mineral e, portanto, gerando um custo elevado no projeto. A pesquisa foi um estudo de caso na área do aterro sanitário em São Leopoldo/RS e as etapas de laboratório envolveram os ensaios: de caracterização dos materiais, empacotamento e permeabilidade. Os resultados apresentam 03 *liners* alternativos, com as seguintes proporções: a) 60% SL + 40% RCD-C b); 60% SL + 40% RCD-CV; c) 60% SL + 20% RCD-C + 20%RCD-CV. Os testes de permeabilidade permitiram concluir que apenas as energias modificadas atenderam a exigência de um coeficiente de permeabilidade igual a 10^{-7} cm/s. Com isso, apenas com este grau de compactação seria viável tecnicamente a aplicação destes *liners* alternativos como camada de impermeabilização inferior em aterros sanitários.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. RCD. *Liner*. Impermeabilização Inferior. Geotecnia ambiental.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Exemplo de Curva Granulométrica	22
Figura 2 – Curva de compactação de Proctor	23
Figura 3 – Curvas de compactação de solos brasileiros	24
Figura 4 – Empacotamento de partículas em 2D e 3D.....	25
Figura 5 – Aterro sanitário na fase inicial em Minas do Leão/RS	28
Figura 6 – Corte com itens importantes do aterro sanitário.....	32
Figura 7 – Detalhamento das camadas de um aterro sanitário	35
Figura 8 – Exemplo de geossintéticos.....	36
Figura 9 – Esquema de permeâmetro de carga variável.....	38
Figura 10 – Fluxograma resumo da Metodologia	39
Figura 11 – Geologia do local da coleta do solo.....	41
Figura 12 – Processo de beneficiamento dos resíduos.....	42
Figura 13 – Caracterização física solos Portão	52
Figura 14 - Método HRB para classificação de solos.....	55
Figura 15 – Página para preencher os dados dos materiais	56
Figura 16 – Composição dos materiais	56
Figura 17 – Distribuição da curva com 60% solo local e 40% RCD-C	57
Figura 18 - Distribuição granulométrica com 60% solo local e 40 RCD-CV	58
Figura 19 - Distribuição granulométrica com 60% solo local, 20% RCD-C e 20% RCD-CV	58
Figura 20 – Ensaio compactação SL.....	59
Figura 21 - Ensaio compactação LMP	60
Figura 22- Compactação 60% SL+40% RCD-C.....	60
Figura 23 - Compactação 60% SL+ 40% RCD-CV	61
Figura 24 - Compactação 60% SL+20% RCD-CV 20% RCD-C.....	62
Figura 25 – Índice de Vazios (e) x Coeficiente de Permeabilidade (k)	66

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Coleta para o teor de umidade dos materiais	43
Fotografia 2 - Sedimentação das amostras.....	44
Fotografia 3 - Picnômetro por intrusão de gás Hélio	45
Fotografia 4 - Limite de liquidez e plasticidade.....	46
Fotografia 5 - Ensaio de compactação.....	47
Fotografia 6 - Corpo de prova e permeâmetro	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de composição de entulhos de Campinas/SP.....	19
Gráfico 2 - Limite de Liquidez SL	50
Gráfico 3 - Limite de Liquidez LMP	51
Gráfico 4 - Curva granulométrica dos solos	53
Gráfico 5 - Gráfico granulometria resíduos.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Amostra de RCD em Ribeirão Preto/SP	20
Tabela 2 – Elementos presentes no lixiviado	31
Tabela 3 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade	37
Tabela 4 - Índices físicos solos	49
Tabela 5 - Índice físicos resíduos.....	50
Tabela 6 - Composição granulométrica dos solos.....	53
Tabela 7 – Composição dos resíduos.....	54
Tabela 8 – Tabela resumo com parâmetros obtidos na compactação	63
Tabela 9 – Coeficiente de Permeabilidade.....	64
Tabela 10 – Peneiramento Solo Local	75
Tabela 11 – Sedimentação Solo Local.....	75
Tabela 12 – Peneiramento <i>Liner</i> Mineral Padrão	76
Tabela 13 – Sedimentação <i>Liner</i> Mineral Padrão	76
Tabela 14 – Peneiramento resíduo beneficiado RCD-C	77
Tabela 15 – Sedimentação resíduo beneficiado RCD-C.....	77
Tabela 16 – Peneiramento resíduo beneficiado RCD-CV	78
Tabela 17 – Sedimentação resíduo beneficiado RCD-CV	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRVR	Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos
EUA	Estados Unidos da América
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileira de Regulação
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCD-C	Resíduo de Construção e Demolição de Concreto
RCD-CV	Resíduo de Construção e Demolição de Cerâmica Vermelha
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
LMP	Liner Mineral Padrão
SL	Solo Local

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	14
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	14
1.3 PROBLEMA	14
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 JUSTIFICATIVA	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	16
2.1.1 História	17
2.1.2 Classificação Resíduos CONAMA 307 no Brasil	18
2.1.3 Reciclagem de Agregados	18
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO	21
2.2.1 Estabilização Granulométrica	21
2.2.2 Estabilização Mecânica	22
2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	24
2.4 ATERRO SANITÁRIO	27
2.4.1 Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	29
2.4.2 Itens de Projeto de um Aterro Sanitário	30
2.4.3 Potenciais Contaminantes	30
2.5 IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS.....	32
2.5.1 Liners Naturais	33
2.5.2 Liners Minerais	33
2.5.3 Liners Compactados	34
2.5.4 Liners Sintéticos	35
2.5.5 Permeabilidade	36
3 METODOLOGIA	39
3.1 EMPRESA ESTUDO DE CASO: COLETA DOS MATERIAIS E GEOLOGIA DO LOCAL	40
3.2 BENEFICIAMENTO DOS RCD	41
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	42

3.2.1 Ensaio de Caracterização	42
3.2.2 Análise Granulométrica	43
3.2.3 Picnometria por Gás Hélio	44
3.2.4 Limites de Atterberg	45
3.3 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS	46
3.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	47
3.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS	48
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	49
4.2 EMPACOTAMENTO UTILIZANDO EMMA MIX ANALYZER	55
4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	59
4.4 PERMEABILIDADE	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.1 SUGESTÃO TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE A – SEDIMENTAÇÃO	75
APENDICE B –COMPACTAÇÃO	79
APENDICE C – PERMEABILIDADE	87

1 INTRODUÇÃO

Um impacto ambiental que vem se apresentando cada vez mais importante envolve a poluição e descarte inadequado de resíduos. A partir disso o setor da construção civil é destaque por ser um dos principais geradores de resíduos e também pelo descarte incorreto desses materiais. Percebe-se iniciativas do setor que vem tomando força e criando alternativas para melhorar e diminuir a quantia de resíduos de construção civil.

Segundo Zordan (1997) embora haja uma melhora nos processos construtivos e minimização de resíduos em obras, reduzindo custos e quantidade de material desperdiçado, a geração de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) é inerente a atividade. Para isso diminuir, devem ser encontradas soluções para esses resíduos, de formas práticas como por exemplo nas indústrias de beneficiamento, avançando então a questão ambiental, e introduzir algo novo no mercado, com grande potencial de uso, transformando o que antes era considerado descarte em matéria prima.

Um estudo apontado por Vasudevan (2015), entrevistou cidadãos para minimizar o desperdício e para melhorar a gestão de resíduos de construção e demolição na Malásia. A pesquisa apontou que 73% dos entrevistados dizem que os resíduos mal aproveitados impactam nas gerações futuras. Apenas 27% acham que não impactam, para isso é estudado a ideia de um plano de gerenciamento de resíduos no país, minimizando o uso de aterros.

Na Holanda cerca de 85% dos resíduos de construção e demolição já são usados para construção de rodovias, misturas com o asfalto e agregados de maior dimensão, são implementados principalmente em fins estruturais como base e sub-base. (HENDRIKS; JANSSEN, 2001).

Na pesquisa realizada pelo Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) em 2015 sobre a destinação dos resíduos sólidos no Brasil, comparando as regiões foi constatado que as melhores situações são encontradas na região Sul e Sudeste, destaque apontado para Santa Catarina que 76% dos seus municípios utilizam de aterros sanitários, não tendo registrado lixão entre os 226 municípios que responderam de um total de 295. Já para o Sudeste vale ressaltar o Espírito Santo que de 71 municípios participantes, 56 municípios informaram, com isso 72%, que enviam os resíduos para aterros.

1.1 TEMA

Essa pesquisa tem como tema o gerenciamento integrado de resíduos sólidos e a geotecnia ambiental. Integra o eixo ambiental do Curso de Engenharia Civil da Unisinos e disciplinas como Mecânica dos Solos e Resíduos Sólidos. Especificamente, estuda-se a impermeabilização da camada inferior de aterro sanitário utilizando um composto de solo local e resíduos de construção e demolição.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O trabalho tem como delimitações os resíduos de construção e demolição, ou seja, diversos tipos de materiais e granulometrias, estudos laboratoriais de seu empacotamento via software e índices físicos.

Não apresenta nenhuma análise de ensaios de compressão simples e cisalhamento direto para verificar a resistência da camada, para sua utilização como *liner* proposto.

Embora um tema essencial para viabilidade técnica de produtos com resíduos sólidos incorporados, esta pesquisa não apresenta nenhuma análise ou discussão relacionada a classificação, conforme NBR 10.004, do *liner* proposto, assim como não há resultados relativos a ensaios de lixiviação e solubilização. (ABNT, 2004).

1.3 PROBLEMA

Existem duas questões problema e hipóteses desta pesquisa: 1) questão de custos relacionado a importação de *liner* mineral (argila de jazida) e aquisição de *liner* sintético (geomembranas) para impermeabilização inferior de aterros sanitários; 2) geração, tratamento e destinação final de RCD.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma alternativa para *liner* mineral utilizados em impermeabilizações inferiores de aterros sanitários, misturando proporções de solo local e RCD.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão apresentados a seguir:

- a) determinar o melhor empacotamento dos RCD com o solo local de forma a garantir devida impermeabilização;
- b) caracterizar o *liner* alternativo: índice de vazios, limite de liquidez, limite de plasticidade peso específico natural, peso específico aparente seco, peso específico real dos grãos, porosidade, teor de umidade;
- c) determinar se o *liner* mineral alternativo atende o coeficiente de permeabilidade $k=10^{-7}$ cm/s.

1.5 JUSTIFICATIVA

O aterro sanitário usualmente necessita em sua camada inferior para impermeabilização de uma grande quantia de argila, gerando elevados custos para seu dimensionamento. Nos últimos 20 anos vem sendo realizados inúmeras pesquisas relacionadas com RCD, em diversas áreas da engenharia civil, voltados para não desperdiçar esse material e de alguma forma criar uma outra forma de reaproveitar. Um exemplo em crescente escala, é o agregado reciclado de concreto, que vem sendo substituído ao invés de usar agregado graúdo da jazida, que produz custos mais elevados.

Para o caso de aterros o *liner* mineral é muito utilizado para revestimento de fundo, porém possui um custo muito elevado, causado pela distância da jazida e por ser uma matéria prima de boa qualidade, no que diz respeito a minerais e permeabilidade principalmente. Apesar disso a alternativa a ser estudada usando RCD é bastante porosa, constituída basicamente por uma granulometria de areia, e para isso será preciso incrementar finos para ocupar os vazios dos corpos de prova a serem executados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho inicia-se com algumas definições de RCD, seguido de um breve histórico, da classificação de acordo com a Resolução Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, abordará sobre a reciclagem de agregados, processo de moagem e beneficiamento. Após, será comentando sobre estabilização de solo, tipos de estabilização, sobre o empacotamento de partículas. Além disso será descrito como é a estrutura de um aterro sanitário, bem como a camada que será estudada como alternativa, por fim será descrito sobre permeabilidade e a sua importância para este trabalho.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O resíduo de construção civil e demolição é definido segundo CONAMA (2002) como o elemento que apresenta forma sólida, com características variáveis em questões dos seus elementos, e que possuem formatos e dimensões totalmente irregulares. Um dos grandes problemas atualmente é a deposição incorreta desses resíduos, gerando assim aspectos ruins para a cidade, como criação de animais e mal cheiro.

A Resolução nº 307, define esses resíduos como materiais resultantes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes de preparação e da escavação de terrenos: a) como tijolos; b) blocos cerâmicos; c) concreto em geral; d) solos; e) rochas; f) metais; g) resinas; h) colas; i) tintas; j) madeiras; e k) entre outros. (CONAMA, 2002).

Para Angulo (2000), o RCD é proveniente de atividades relacionados a construção, seja novas construções, reformas, demolições, que tenham atividades de obras de arte, solos ou resíduos de vegetação que tenham no terreno, é considerada a vegetação, pois a contaminação é inerente, como dito acima. Já a definição de entulho, é considerada ampla, sendo preferível a utilização do termo RCD, uma vez que destina diretamente à ideia da natureza dos resíduos, vindos da construção civil.

Conforme Lovato (2007) os RCD podem ser compostos por diversos materiais, tais como solos de diversos tipos, rochas naturais, concreto, argamassas de assentamento e revestimento, diversos tipos de cerâmicas, aço, plástico, vidro,

madeira, restos de vegetais. A mistura desses inúmeros resíduos depende do local e da origem onde foi retirada, e no momento que a amostra foi recolhida.

De acordo com Sonawane et al. (2013), a porcentagem de resíduos de construção civil e demolição no mundo corresponde a 40% de concreto, 30% de cerâmicas, 10% de madeira, 10% de outras misturas, 5% de plásticos. O setor da construção civil é um dos que mais cresceu nos últimos tempos, com um aumento de 4800 bilhões de dólares no ano de 2013, ou seja; 1,5 vezes em 5 anos. Dentre os que mais consomem agregados para compor o concreto são os chineses com 25%, europeus com 12%, americanos com 10% e os indianos logo atrás com uma porcentagem significativa.

Com base nestes conceitos, embora a legislação nomeie RCC (Resíduos de Construção Civil), esta pesquisa utilizará RCD (Resíduo de Construção e Demolição). Justifica-se este termo por ser este adotado na maioria das pesquisas da área.

2.1.1 História

Conforme Pinto (1999) a preocupação de reciclar resíduos de construção civil ganhou força a partir de 1990, quando holandeses, dinamarqueses, belgas e franceses começaram a atuar nesse quesito. A partir desse posicionamento foram criadas e melhoradas as instalações para o beneficiamento desses resíduos, nos anos 2000, os alemães aumentaram as instalações de reciclagem, os franceses criaram uma meta em minimizar em até 50% dos RCD, os suíços optaram por quintuplicar o volume de RCD, e assim reduzir o volume em aterros, holandeses e dinamarqueses reciclavam 60% dos resíduos, e ainda abastecendo 10% do mercado de agregados. De modo contrário, os japoneses viram crescer a quantidade de RCD em meados de 1980 e quase triplicar a quantidade anos depois, os americanos informaram que sua porcentagem de reciclagem era de 20 a 30% e que pretendiam aumentar conforme os anos.

Em Portugal a gestão de RCD começou em 2008, com a publicação do Decreto-Lei nº46/2008, que tem como objetivo diminuir os depósitos ilegais de RCD, e visam diminuir os impactos ambientais e até mesmo turísticos. Comparando com a Alemanha que desde de 1992 possuía uma regulamentação específica, o país está consideravelmente atrasado, e conseqüentemente diminui o seu desempenho ambiental. (TORGAL; SAID, 2010). No Brasil os primeiros pesquisadores a estudarem

o RCD foram Cincotto (1983), Levy (1997), Pinto (1986) e Silveira (1993) utilizando o processo de reciclagem de restos de construção. Segundo Pinto (1999) há indícios que em 1980 já havia equipamentos de pequeno porte para moagem de agregados reciclados, chamadas de *masseiras-moinhos*. A partir de 1991 que ocorreu um grande aumento nas instalações de beneficiamento destes agregados, além de algumas melhorias como o plano de gestão de RCD, a aquisição de equipamentos importados, e a preocupação com impactos ambientais.

2.1.2 Classificação Resíduos CONAMA 307 no Brasil

Em julho de 2002 foi criada a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), pelo conselho regional do meio ambiente. Essa resolução tem como objetivo estabelecer diretrizes, procedimentos, critérios para a gestão como um todo dos resíduos de construção e demolição. Conforme o Art. 3º da Resolução nº 307 estabelece as classificações dos resíduos de construção da seguinte forma:

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

De construção, demolição, reforma e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.) argamassa e concreto;

De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B – são resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso; (redação dada pela Resolução nº469/15).

III – Classe C – são resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação; (redação dada pela Resolução nº 431/11).

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, redação dada pela Resolução nº 348/04 (CONAMA, 2002).

2.1.3 Reciclagem de Agregados

De acordo com Leite (2001) a reciclagem de agregados é a melhor alternativa para diminuir o impacto no meio ambiente, em termos de matéria prima. A partir dos anos 2000 houve um aumento no número de reciclagem de modo geral, envolvendo diversas questões, como políticas e ambientais. Sendo assim há a tendência de existir

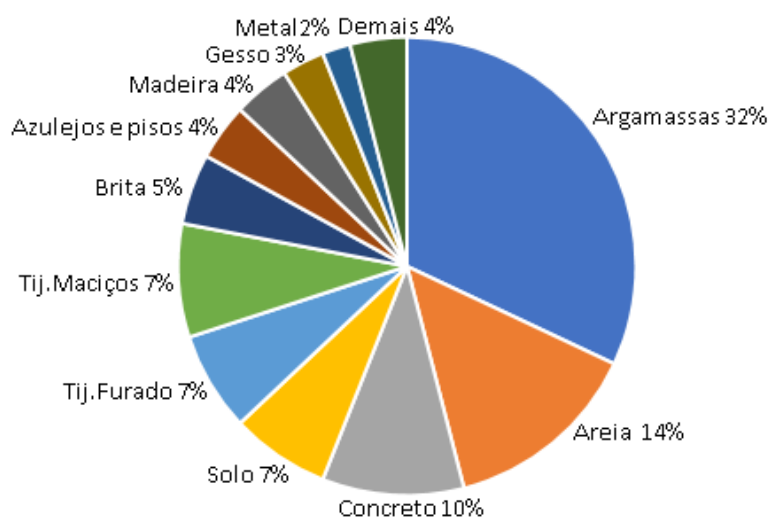
um melhor gerenciamento desses resíduos nas cidades e assim aumentar a vida útil de aterros, reduzindo o número de descartes incorretos, melhorando o bem-estar ambiental e social da população.

Conforme Lima (1999) os equipamentos utilizados para reciclagem de resíduos de construção e demolição são procedentes da área de mineração, e com isso adaptados para viabilizar sua utilização. As recicladoras podem ter diversos portes e dificuldades, dependendo do lugar, oferta, e demanda de resíduos por agregados reciclado. No Brasil as recicladoras são montadas de forma simplificada: alimentador, britador transportador de correia, e eletroímã. O reciclado tem como principais características, classificação, composição, teor de impurezas, granulometria, e formas dos grãos. Ainda o mesmo autor cita os equipamentos para britagem mais utilizados nos resíduos, como britadores de impacto, britadores de mandíbulas e moinhos de martelos.

Destaca-se agregados reciclados provenientes de resíduos compostos, o qual Levy (2001) cita como sendo agregados adquiridos de materiais de mineração, demolição de obras, estruturas de concreto, paredes de vedação e alvenaria estrutural, blocos de concreto ou cerâmico e tijolos maciços.

O Gráfico 1 ilustra a distribuição da composição de entulhos de RCD no município de Campinas/SP, no estudo realizado por Silveira (1993), nela podemos observar que a distribuição é composta por cerca de 32% de argamassa. O Gráfico 1 apresenta os dados da composição de entulho na cidade de Ribeirão Preto.

Gráfico 1 - Gráfico de composição de entulhos de Campinas/SP



Fonte: Silveira (1993, p. 92).

Comparando os resultados obtidos por Silveira (1993) de coleta de resíduos com um estudo feito por Zordan (1997), observa-se que apresenta concordância entre os valores e as porcentagens em massa de cada um dos resíduos, principalmente referente a argamassa, que é o elemento mais encontrado em ambas as pesquisas, como pode ser observado na Tabela 1 – Amostra de RCD em Ribeirão Preto/SP.

Tabela 1 – Amostra de RCD em Ribeirão Preto/SP

Material Presente	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	Média (%)
Argamassa	36,8	35,7	37,9	39,4	37,4
Cerâmica	14,6	25,9	23,8	18,9	20,8
Cerâmica polida	1,2	2,6	4	1,9	2,5
Concreto	19,8	21,6	21,5	21,7	21,1
Pedras	27,4	13,4	12,4	17,6	17,7
Outros	0,2	0,8	0,4	0,5	0,5
TOTAL	100	100	100	100	100

Fonte: Adaptada Zordan (1997, p. 89).

Segundo Martin-Morales et al. (2010) os RCD podem ser utilizados como agregados reciclados, mas quando tratados podem apresentar maior qualidade. Normalmente o agregado natural é mais caro do que o agregado reciclado, portanto é inevitável o seu impacto na parte econômica. Existem critérios e misturas de distribuição granulométrica que podem fazer o agregado reciclado ter um bom aproveitamento, como por exemplo de critério pode se comparar com as normas de agregados naturais.

Para John e Vahan (2000) o beneficiamento de agregados é realizado em uma ou mais fases com a separação dos agregados. Existem dois tipos de divisão mais utilizadas a manual e a magnética, mas existem outras divisões como por exemplo, a de densidade de diferentes fases, essa outra divisão permite separar os agregados cerâmicos de concreto e rocha das frações porosas. Uma etapa não incluída no beneficiamento é a formação de pilhas de agregados de agregados, na forma de diminuir a variabilidade natural do material, no decorrer do processo de beneficiamento.

Em Belo Horizonte a partir de 1995, começou a ser implementado uma gestão na melhora da coleta e no descarte de RCD, criando usinas para recepção dos resíduos e posteriormente fazer o seu beneficiamento e com isso começar a ser

reaproveitado, diminuindo o número de resíduos que iam para os aterros. (PINTO,1999).

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

Segundo Vargas (1977), a estabilização de solos é definida por um processo que se executa no solo para obter uma resistência superior a cargas e desgaste, por meio de processos de compactação, correção de granulometria, adições de cimento ou cal, de forma que ocorra cimentação ou aglutinação das partículas. A estabilização de solos é classificada em estabilização física, química e mecânica. Servem para melhorar ou alterar as propriedades do solo natural.

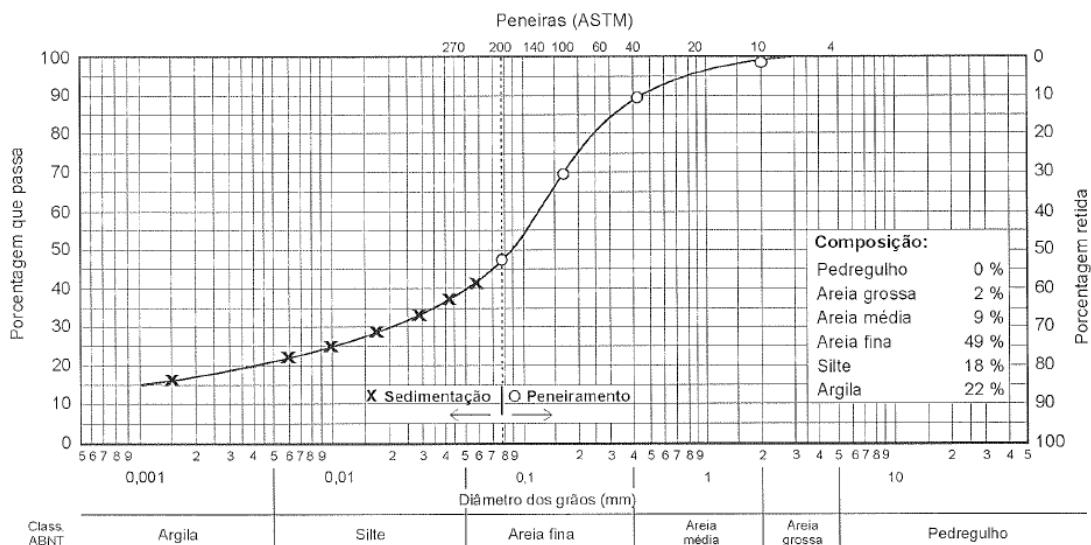
Para Villibor (1982) a estabilização pode ser entendida como a alteração de qualquer tipo da propriedade do solo, desde que o mesmo apresente uma melhora no comportamento do ponto de vista de Engenharia. Neste contexto há um tratamento artificial feito pelo homem, sendo uma adição ou energia a ser aplicada no solo. O mesmo autor cita melhoras nas propriedades geotécnicas do solo, como aumento de resistência ao carregamento, redução de compressibilidade, redução de sensibilidade à ação de variações externas principalmente umidade, aumento ou diminuição da permeabilidade e garantir a permanência de cargas durante um longo tempo.

2.2.1 Estabilização Granulométrica

De acordo com Vargas (1977) a estabilização granulométrica é muito utilizada para a pavimentação, onde a curva granulométrica e a plasticidade devem ser corrigidas adicionando ou retirando certas frações de constituintes, a fim de se enquadrarem nos limites especificados por norma, para que se tenha a forma da curva de Talbot, e a plasticidade seja reduzida aos limites especificados.

A estabilização granulométrica consiste na mistura de solos em quantidade adequadas, afim de se obter um resultado que atenda as especificações necessárias para ser aplicado. Para o solo ser adequado ao uso como elemento de pavimentação rodoviária, deve conter diferentes granulometrias, e uma parcela de fração argilosa (VILLIBOR,1982). A Figura 1 representa uma curva de um solo típico brasileiro, onde mostra a porcentagem de cada composição.

Figura 1 – Exemplo de Curva Granulométrica



Fonte: Pinto (2006, p. 21).

2.3.2 Estabilização Mecânica

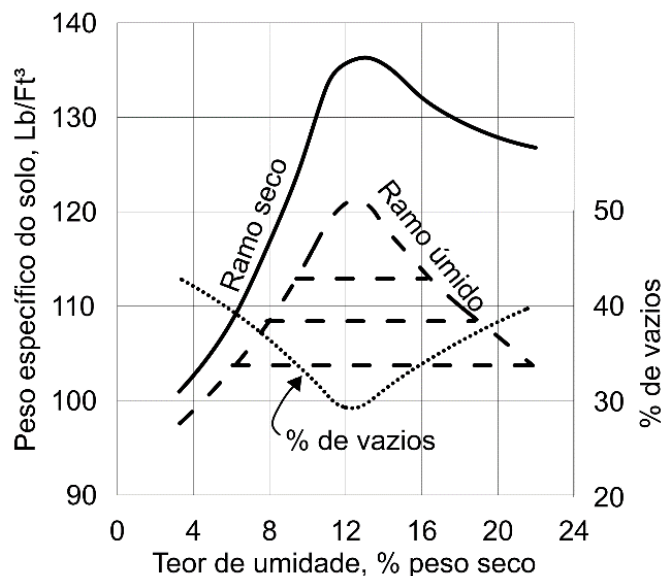
Ralph Proctor foi o criador do ensaio de compactação, em um de seus ensaios realizados em uma barragem em Los Angeles em 1933 para melhorar o controle tecnológico em barragens e aterros, e assim obter uma maior resistência do solo.

Segundo Proctor (1933) as partículas de argila não preenchem totalmente os vazios existentes no solo de forma natural, sendo característica do solo o índice de vazios, dependendo dos valores é necessário a realização de compactação, ou seja, uma energia aplicada de modo que as partículas menores preencham os espaços deixados pelas partículas maiores, conseqüentemente diminuindo os vazios. Um dos fatores importantes nesse ensaio é a plasticidade do solo, determinando a resistência a fricção em suas partículas de forma a conseguirem ou não ficar saturadas, mudando assim o seu teor de umidade para o teor de umidade ótimo e o peso específico máximo.

Para a comprovação do conceito, Proctor (1933) executou um ensaio que se baseou em misturas com baixa umidade e misturas com alta umidade com variação da energia de compactação, e seu peso específico. A

Figura 2 abaixo exemplifica o resultado do ensaio de compactação realizado na barragem, onde demonstra a relação de peso específico aparente máximo, teor de umidade da mistura e o percentual de vazios identificado.

Figura 2 – Curva de compactação de Proctor



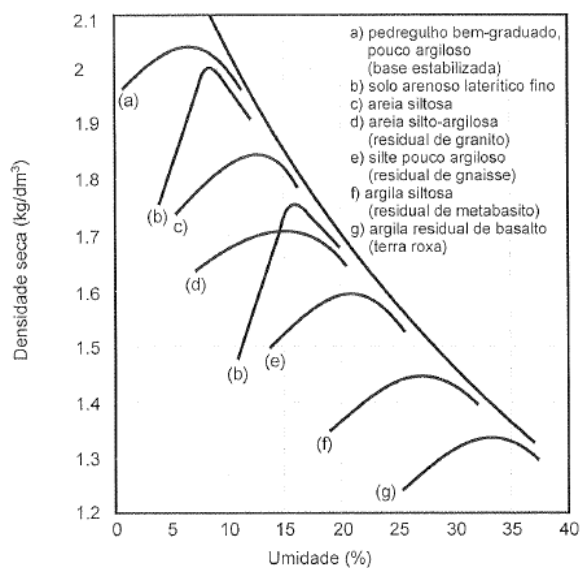
Fonte: Adaptada de Proctor (1933, p. 245).

Segundo Nogueira (2005) a estabilização mecânica realizada pelo ensaio de compactação diminui o volume de vazios, tornando-o com maior densidade, e com isso há um aumento de resistência ao cisalhamento, menor permeabilidade, e compressibilidade. Para isso em laboratório o ensaio tem a finalidade de determinar a função da variação da massa específica seca com o teor de umidade, e com uma energia escolhida por um processo dinâmico.

A Figura 3 demonstra alguns valores de curvas de compactação de solos brasileiros, com as respectivas umidades ótimas e peso específicos característicos. Percebe-se que um solo mais arenoso possui um teor de umidade ótimo baixo e uma densidade seca bastante alta conforme letra (a), já para um solo mais argiloso o teor de umidade ótimo é maior e a densidade seca é menor letra (g).

Um dos motivos encontrados para ocorrer isso se deve a argila possuir partículas menores, as quais retêm mais água, e um índice de vazios menor, já a areia/pedregulho não retém tanta água, pois possui partículas maiores e um índice de vazios maior (PINTO,2010).

Figura 3 – Curvas de compactação de solos brasileiros



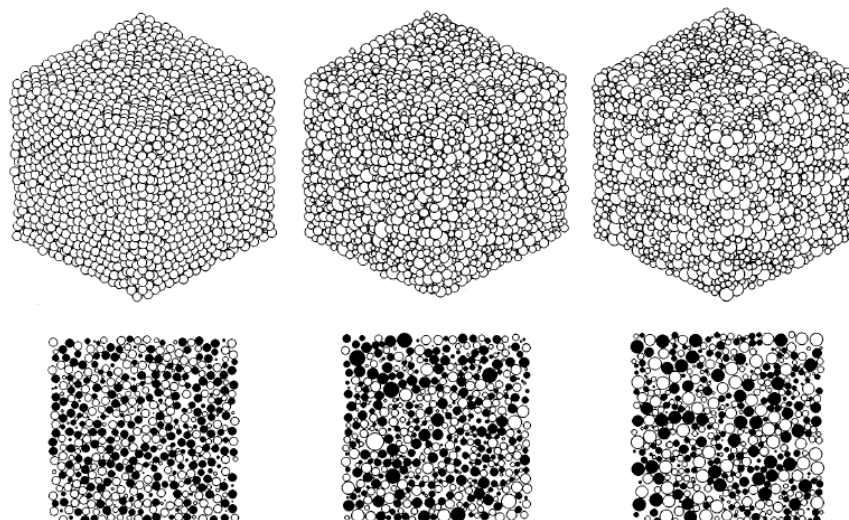
Fonte: Pinto (2010, p. 80).

Para realizar o ensaio Massad (2016) recomenda alguns cuidados na hora de moldar, tais como: excesso de solo no colarinho última camada, espessura das camadas que deve ser uniforme para sempre ter a mesma densidade, também a questão de reuso e secagem prévia de solo, extração do corpo de prova, bem como a homogeneização da amostra.

2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Os primeiros pesquisadores a estudarem sobre o assunto foi Féret em 1892, Fuller em 1907, Andreassen & Andersen em 1930 e Furnas em 1931. Inclusive Furnas (1931) explica no seu artigo que o estudo de empacotamento de partículas em concreto é desenvolvido de forma cautelosa, envolvendo equações complexas para determinar o menor índice de vazios e a influência nos tamanhos dos grãos em uma determinada amostra, o qual precisa de várias deduções e teorias anteriores. A Figura 4 apresenta formas de partículas estudadas por autores que usaram a modelagem descrita acima.

Figura 4 – Empacotamento de partículas em 2D e 3D



Fonte: He et al. (1999, p. 7100).

De acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), referente a definições de solos o índice de vazios é um parâmetro importante que pode ser determinado a partir do volume de vazios e o volume de sólidos de um material que se conheça as propriedades. Outro parâmetro relevante é a porosidade sendo obtida entre o volume de vazios e o volume total de um material, e que necessariamente deve ser colocada na forma de porcentagem.

Segundo Ortega et al. (1997) o empacotamento denso de partículas entende-se na formação de estruturas de partículas maiores contendo espaços entre elas os quais são ocupados por partículas menores. Com isso o empacotamento possui alguns fatores que alteram nas suas propriedades, entre elas: o formato, tamanho e rugosidade superficial da partícula.

A seguir são apresentados dois modelos clássicos de estudo de empacotamento de partícula e conseqüentemente mais usados nesse tipo de situação. O modelo de Andreassen e Andersen (1930) e modelo de Furnas (1931).

Andreassen e Andersen em 1930, apresenta um modelo que foi desenvolvido uma equação que considera os grãos de forma contínua em sua consideração. Deste modo, considera também partículas infinitamente pequenas, e que não está de acordo com a realidade. A equação 1 apresenta este modelo.

$$\text{CPFT (\%)} = 100 * \left[\frac{D}{D_L} \right]^q \quad (1)$$

Onde:

CPFT = porcentagem volumétrica de partículas com o diâmetro D;

D= tamanho da partícula;

D_L = diâmetro da maior partícula;

q = coeficiente de distribuição;

Já no modelo de Furnas (1931) apresenta a seguinte equação de forma experimental a fim de se obter o tamanho das partículas, e tem como princípio análises de forma individual. A Equação 2 apresenta o modelo.

$$\text{CPFT (\%)} = 100 * \left[\frac{D^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right] \quad (2)$$

Onde:

CPFT = porcentagem volumétrica de partículas com o diâmetro D;

D_L = diâmetro da maior partícula;

D_s = diâmetro da menor partícula;

D= tamanho da partícula;

r = razão entre o volume de partícula entre duas malhas de peneiras consecutivas;

q = módulo ou coeficiente de distribuição.

Para melhorar a equação, Zheng et al. (1990) derivaram do Modelo de Furnas de empacotamento, e nomeado por ele como uma equação melhorada na distribuição de tamanho de partículas. Considerando as proporções de grãos menores e maiores, de acordo com a parcela de material grosso, médio ou fino que se quer analisar.

Os autores Funk e Dinger (1994) afim de resolverem o impasse gerado nas deduções e modelos matemáticos de Andreassen, melhoraram a equação e elaboraram a distribuição granulométrica chamando assim de “Andreassen Modificado” afim de incorporar o tamanho de menores partículas na situação em que se pretende estudar tornando assim o valor encontrado mais próximo do real. A Equação 3 demonstra a proposta dos autores relativos a essa questão.

$$\text{CPFT (\%)} = 100 * \left[\frac{d^q - d_m^q}{D^q - d_m^q} \right] \quad (3)$$

Onde:

CPFT = porcentagem acumulativa de partículas finas menores que “d” em volume;

d = tamanho da partícula;

d_m = menor tamanho da partícula da distribuição;

D = maior tamanho de partícula da distribuição;

q = coeficiente de distribuição.

Esse modelo desenvolvido chamado de “Andreassen modificado”, é o mais próximo que os pesquisadores definem do empacotamento ideal. Inclusive muito usado em programas computacionais que fazem a modelagem numérica de acordo com o que se quer obter em relação a dosagem de concretos de alta resistência. (FUNK E DINGER,1994)

Ainda segundo Funk e Dinger (1994) um dos parâmetros importantes, “q” deve ser menor ou igual a 0,37. Esse valor indica um coeficiente de distribuição das partículas, pode ser variável para cada material, ainda o mesmo cita que para argamassa o valor ideal é inferior a 0,25, para concreto autocompactante 0,28, para mistura refratária 0,21 a 0,25 dependendo da adição de água a ser colocado na mistura.

2.4 ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário é um método seguro para a disposição final de resíduos sólidos urbanos. No Brasil é obrigatório por lei que todo o resíduo sólido seja adequadamente tratado, reutilizado e em último estágio ser colocado em áreas adequadas. Nos tópicos a seguir serão mostrados alguns dados de geração de resíduos no Brasil e no Rio Grande do Sul, alguns critérios básicos para projeto de um aterro sanitário, impermeabilização de base e coeficiente de permeabilidade. A Figura 5 mostra a construção de um aterro sanitário.

Figura 5 – Aterro sanitário na fase inicial em Minas do Leão/RS



Fonte: Konarzewski (2003, p. 33).

A norma NBR 8419 define aterro sanitário na seguinte maneira:

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

O aterro de resíduos sólidos urbanos consiste em uma construção de engenharia na qual são contados as perdas de massa que serão causadas pela decomposição e esforços mecânicos que podem ser na forma física, biológica e química, criando então recalques que reduzem a altura dos resíduos, e podem se prolongar durante muito tempo (JUCA, 2003).

Segundo Boscov (2008) o aterro de resíduos tem que ser uma deposição adequada, determinando componentes e práticas operacionais, que envolvem monitoramento na parte geotécnica, sistemas de drenagem, tratamento de líquidos e gases, divisão de células, cobertura, compactação dos resíduos, e sistema de impermeabilização, por isso esse termo se deve a todos esses parâmetros que inclui o lugar, a massa de resíduos, as estruturas e todo o sistema de operação, monitoramento e implantação.

2.4.1 Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Segundo Zanta e Ferreira (2003) os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são aqueles que são produzidos pelas diversas atividades da sociedade de um determinado município, tendo em vista várias origens, como comercial, residencial, estabelecimentos de saúde, indústrias de limpeza, construção e agrícolas. Usualmente esses resíduos são direcionados para a disposição em aterros sob comprometimento do poder municipal.

É importante uma redução nos resíduos seja na fonte ou na melhora da destinação final da tomada de decisão. Para isso é necessário conhecer as políticas, legais e financeiras, sociais e ambientais. Deve, portanto, ser levados alguns aspectos tecnológicos e operacionais ao programa de redução na fonte que implica uma diminuição de fatores econômicos. Para essa melhora inclui o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, que engloba desde a não geração até a disposição final (ZANTA; FERREIRA,2003).

Um diagnóstico realizado pela SNIS (2015) verificou alguns aspectos de diversas regiões do Brasil dos órgãos gestores municipais e levantou dados e informações importantes sobre manejo dos resíduos sólidos urbanos. O diagnóstico contou com 3.520 municípios correspondendo a 63,2% do total do país, em termos de população urbana 82,8%,143 milhões de habitantes urbanos.

Ainda na mesma pesquisa relata que o Brasil coleta em torno de 62,5 milhões de toneladas de resíduos domiciliares e públicos por ano, ou seja, 171,3 mil toneladas por dia, indicando um valor de 0,95 kg/hab./dia.

Em relação a destinação final de resíduos sólidos no Brasil, SNIS (2015) descreve que dos 62,5 milhões de toneladas coletados em 2015, 60,9% foram dispostos em aterro sanitários; 11,5% em aterros controlados; 10,1% em lixões e 2,3% encaminhados para unidades de triagem de compostagem. O restante de 15,4%, não há informação para municípios de até 30 mil habitantes.

2.4.2 Itens de Projeto de um Aterro Sanitário

Conforme Almeida (2015) aterros sanitários para resíduos sólidos são construções que precisam ter cuidado, diminuindo os impactos ambientais gerados na implantação quando colocados para a população. Para isso deve-se ter um estudo detalhado do local e das propriedades geotécnicas, atendo requisitos exigidos pela norma.

Segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), os itens de projeto indicados para a construção de um aterro sanitário são: memorial descritivo, memorial técnico, cronograma de execução, estimativa de custos, desenhos e plantas, eventuais anexos do aterro, todos elementos de forma detalhada. Também precisa constar informações sobre os resíduos a serem colocados no aterro sanitário, contendo as seguintes condições: origem, qualidade e quantidade diária e mensal, frequência e horário de recebimento, características dos equipamentos de transporte e massa específica dos resíduos.

O projeto de um aterro tem como princípio, não deixar o resíduo ter contato direto com o solo natural, e conseqüentemente a exposição por mais tempo com a atmosfera, seus elementos estruturais são projetados para evitar que as emissões não adequadas sejam direcionadas para o meio ambiente. (BOSCOV, 2008).

Também é necessário atender um sistema de drenagem superficial e remoção do lixiviado, este mesmo deve ser tratado para não contaminar o lençol freático. Além desse sistema, deve haver uma impermeabilização inferior e superior do aterro resguardando o solo, além de um sistema de drenagem de gases gerado, como por exemplo o metano (NBR 8419,1992).

2.4.3 Potenciais Contaminantes

Um dos contaminantes mais gerados a partir dos resíduos sólidos urbanos é o lixiviado o qual precisa ser drenado e não pode haver contato com o solo e lençol freático de forma alguma. Outro contaminante é o gás de aterro que deve ser tratado antes de lançado na atmosfera.

Especificamente em relação a lixiviados, Castilhos Junior et al. (2003), conceitua como oriundo de um processo de degradação de compostos orgânicos e inorgânicos, sendo este composto essencialmente pela mistura de mecanismo

biológicos e físico-químicos causados pelos resíduos sólidos, catalisados pelo fator de água, que é composto pela umidade inicial e pelas águas de precipitação.

Os contaminantes podem migrar pela parte impermeável, isso inclui os solutos inorgânicos e orgânicos em solução e fluidos orgânicos, esses contaminantes podem se impregnar nos sólidos e depois com a água se tornarem lixiviados, esses fluidos são tratados no estudo do mecanismo de transportes trazidas por Freeze e Cherry (1979). É esperado que os mais densos se depositem no fundo e se misturem com a água, enquanto os fluidos mais leves tendem a permanecer na parte superior do regime de fluxo (FOLKES, 1982).

As características do lixiviado são variáveis de aterro para aterro. A Tabela 2 a seguir mostra os principais elementos presentes em lixiviados do país, bem como os indicadores FVMP, e faixa máxima de cada elemento.

Tabela 2 – Elementos presentes no lixiviado

Variável	Faixa Máxima	Faixa mais provável	FVMP
pH	5,7 – 8,6	7,2 – 8,6	78%
Alcalinidade total (mg/L de CaCO ₃)	750 – 11400	750 – 7100	69%
Dureza (mg/L de CaCO ₃)	95 – 3100	95 – 2100	81%
Condutividade (µS/cm)	2950 – 25000	2950 – 17660	77%
DBO (mg/L)	<20 – 30000	<20 – 8600	75%
DQO (mg/L)	190 – 80000	190 – 22300	83%
Óleos e graxas (mg/L)	10 – 480	10 – 170	63%
Fenóis (mg/L de CH ₆ H ₅ OH)	0,9 – 9,9	0,9 – 4,0	58%
Nitrogênio Total (mg/L)	80 – 3100	Não há	-
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	0,4 – 3000	0,4 – 1800	72%
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	5 – 1200	400 – 1200	80%
Nitrito (mg/L)	0 – 50	0 – 15	69%
Nitrato (mg/L)	0 – 11	0 – 3,5	69%
Fósforo Total (mg/L)	0,1 – 40	0,1 – 15	63%
Sulfeto (mg/L)	0 – 35	0 – 10	78%
Sulfato (mg/L)	0 – 5400	0 – 1800	77%
Cloreto (mg/L)	500 – 5200	500 – 3000	72%
Sólidos totais (mg/L)	3200 – 21900	3200 – 14400	79%
Sólidos totais voláteis (mg/L)	630 – 20000	630 – 5000	60%
Sólidos totais fixos (mg/L)	2100 – 14500	2100 – 8300	74%
Sólidos suspensos totais (mg/L)	5 – 2800	5 – 700	68%

Sólidos suspensos voláteis (mg/L)	5 – 530	5 – 200	62%
Ferro (mg/L)	0,001 – 260	0,01 – 65	67%
Manganês (mg/L)	0,04 – 2,6	0,04 – 2,0	79%
Cobre (mg/L)	0,005 – 0,6	0,05 – 0,15	61%
Níquel (mg/L)	0,03 – 1,1	0,03 – 0,5	71%
Cromo (mg/L)	0,003 – 0,8	0,003 – 0,5	89%
Cádmio (mg/L)	0 – 0,26	0 – 0,065	67%
Chumbo (mg/L)	0,01 – 2,8	0,01 – 0,5	64%
Zinco (mg/L)	0,01 – 8,0	0,01 – 1,5	70%

Fonte: Souto e Povinelli (2006, p. 13).

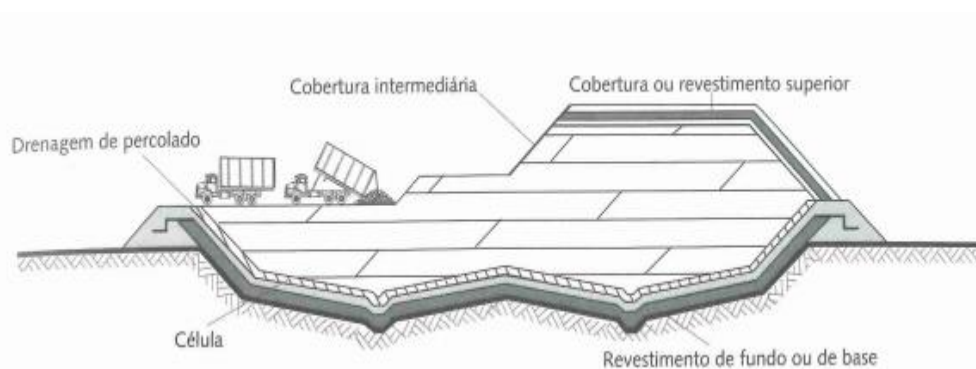
Sendo FVMP- Faixa de valores mais prováveis

Sobre o tema tratamento de lixiviados, possui inúmeras pesquisas no Brasil. Um estudo realizado por Caetano (2009) e Gomes et al. (2016), mostrou uma redução significativa de nitrogênio amoniacal presente no lixiviado utilizando tratamento por *air stripping*. A utilização de um reator de chicanas, com tempo de detenção de 12 dias, mostrou remoções variando de 6% a 73%.

2.5 IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS

Segundo Prim et al. (2003), a impermeabilização da base e das laterais, tem como função proteger de contaminação o lençol freático pelo lixiviados, assim como a percolação de gases de aterro, em meio aos vazios do solo. Os materiais mais utilizados para impermeabilização são: argila de boa qualidade e compactada, geomembranas e betume. A Figura 6, ilustra as diferentes camadas de impermeabilização existentes em um aterro sanitário.

Figura 6 – Corte com itens importantes do aterro sanitário



Fonte: Boscov (2008, p.100).

Ainda conforme Prim et al. (2003), os sistemas de impermeabilização devem ser executados a fim de garantir, durabilidade, estanqueidade, resistência a intempéries, resistência mecânica, e compatibilidade com resíduos. A impermeabilização lateral e do fundo deve ter algumas características que devem ser levadas em conta tais como: espessura da camada, granulometria do solo, baixa permeabilidade, índice de vazios reduzido, permeabilidade, capacidade de carga, lençol freático com 2 metros distante do fundo e não possuir fraturas ou falhas no local.

Uma boa impermeabilização de base deve exigir testes laboratoriais de compactação usando normas e métodos apropriados. Aliado a isso, a compactação de campo deve ser o mais próximo possível dos testes laboratoriais. Existe uma dificuldade de encontrar um controle de compactação no campo, no que diz respeito ao o número de passadas do rolo, pois muitas vezes precisam ser realizados várias vezes. (DANIEL; BANSON,1990).

2.5.1 *Liners* Naturais

Os liners naturais são formados pelo terreno natural, resultante da própria escavação nos locais dos aterros sanitários, deve possuir baixa permeabilidade (menor ou igual a 10^{-7} cm/s) afim de que os resíduos possam ser dispostos naquele local e não deve possuir fissuras (LUKIANCHUKI, 2007).

2.5.2 *Liners* Minerais

Conforme Dourado (2003), os liners são barreiras hidráulicas para fins de proteger ambientalmente a natureza e qualquer tipo de construção, de qualquer substância que possa trazer risco de contaminação ao solo e ao lençol freático, normalmente são usados liners minerais, como matéria prima usa se material argiloso de boa qualidade.

Segundo Gomes e Martins (2003) os revestimentos minerais ou liners são denominados os solos do próprio local do aterro sanitário, devem possuir uma parcela considerável de argila para conseguir executar a camada do revestimento de acordo com as especificações técnicas.

Ainda Gomes e Martins (2003) cita que o tipo de liner mais usado é o revestimento de solo compactado, o sugerido para essa camada é um solo classificado como CL (solo argiloso de baixa plasticidade), CH (solo argiloso de alta plasticidade) ou SC (solo areno-argiloso). Para garantir a execução exigida, é preciso ter algumas técnicas de controle de qualidade, entre elas:

- a) garantia de materiais apropriados para utilização na construção do revestimento;
- b) garantia que os materiais são dispostos e compactados de acordo;
- c) garantia que a camada é adequadamente protegida de possíveis problemas.

Para Daniel (1993), o *liner mineral* utilizado na impermeabilização de aterro sanitário, deve ter porcentagem de finos na peneira 200 entre 20% a 30%. Quanto a porcentagem de pedregulhos na peneira 4 deve ser $\leq 30\%$, para o índice de plasticidade recomenda-se entre 7% e 10%.

A composição de um sistema de impermeabilização de um aterro sanitário, normalmente é uma combinação entre uma camada de argila (*liner mineral*) e uma membrana chamada de *liner sintético* (BOSCOV, 2008). O autor relata ainda que, a camada de solo argiloso compactado é muito utilizada para aterros sanitários.

2.5.3 Liners Compactados

Na condição que a argila disponível no local não atinge o valor de coeficiente hidráulico necessário importa-se argila, para que esta ao ser compactada se torne uma barreira hidráulica na retenção de líquidos. No campo o procedimento de compactação pode ser realizado com o rolo de compactação tipo pé de carneiro dentre outros. (DAY; DANIEL, 1985).

A argila tem como uma das suas características a retração, que faz parte dos defeitos hidráulicos, ao ser adicionado muita água, após um período que a argila se encontrava seca ocasiona fissuras, tornando o *liner* menos resistente. Para isso não ocorrer no campo devem ser realizados ensaios de verificação de compactação, e

ensaios de permeabilidade in situ e em laboratório (DAY e DANIEL,1985). A Figura 7 apresenta um detalhamento das camadas de aterro.

Figura 7 – Detalhamento das camadas de um aterro sanitário



Fonte: Boscov (2008, p.125).

A construção da camada de revestimento deve ser a seguinte ordem, primeiramente o resíduo, depois a camada de separação e filtração, seguida da camada de drenagem feita por dutos para eliminar gases, a camada de proteção geotêxtil e geomembrana, a camada de argila impermeável, e por fim o subsolo (BOSCOV,2008)

2.5.4 Liners Sintéticos

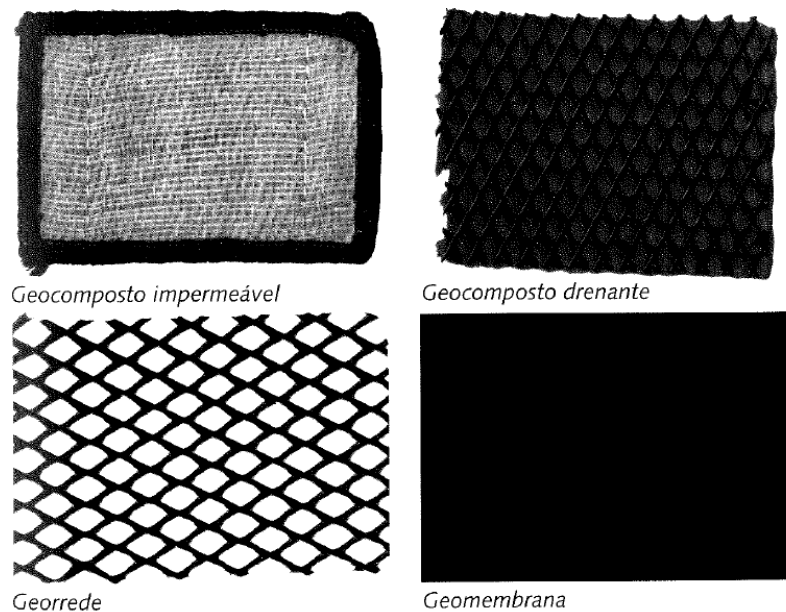
Segundo Gomes e Martins (2003) são considerados liners sintéticos as geomembranas, ou seja, membranas sintéticas, que possuem diferentes espessuras e materiais, e que possuem a função de proteger contra o lixiviado. São mais utilizados em aterro sanitários de grande porte devido ao seu grande custo e são sobrepostas a camada de solo compactado. A geomembrana mais utilizada para aterro sanitário é do tipo PEAD (polietileno de alta densidade), pois apresenta uma resistência boa a ataques químicos a custos razoáveis, mas exigem um detalhe maior nas soldas.

Assim como no revestimento mineral, para o projeto com liner sintético deve ser considerado alguns itens importantes:

- a) seleção do material da geomembrana;
- b) preparação do subleito;
- c) transporte, armazenamento e colocação da geomembrana;
- d) qualidade das emendas.

A norma de geossintéticos NBR 12533 (ABNT, 2003) determina os materiais que podem ser usados, bem como a espessura da membrana e como é feito o processo de emendas. Os geossintéticos mais usados para aterros são geotêxteis (GT), geomembranas (GM), geocompostos argilosos para barreira impermeável (GCL) e geocompostos para drenagem (GCD) (BOSCOV,2008). A Figura 8 demonstra alguns tipos de geossintéticos.

Figura 8 – Exemplo de geossintéticos



Fonte: Boscov (2008, p.123).

2.5.5 Permeabilidade

Em meados de 1850, Darcy em um ensaio experimental, identificou fatores importantes em um ensaio de permeabilidade, dentre eles a carga dissipada de percolação (h), a distância por onde a carga se dissipa (L) e o gradiente hidráulico (i) (PINTO, 2006). Abaixo é apresentada a equação 4 da Lei de Darcy, utilizando a relação desses conceitos.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (4)$$

Onde:

Q= vazão (cm³/s)

k= coeficiente de condutividade (m/s)

i= h/L = gradiente hidráulico

A= área do corpo de prova (cm²)

Já para ensaios que envolvem argilas e siltes o qual necessitam permeabilidade com valores muito baixos as medidas devem ser precisas e assim são realizados em permeâmetro de carga variável. A quantidade de água percolada é medida indiretamente por observações sobre a taxa de queda do nível de água que percola na bureta em um determinado tempo. (TAYLOR,1948). A Equação 5 simplificada mostrada por Taylor é a seguinte:

$$k = 2,3 * \frac{a*L}{A*t1} \log 10 \frac{h0}{h1} \quad (5)$$

Segundo a NBR 6502 (ABNT,1995) a permeabilidade pode ser de definida como a propriedade que um determinado material tem de passar uma quantia maior ou menor de água através de seus vazios. Conforme Pinto (2006), existem alguns valores típicos de coeficiente de permeabilidade de solos baseado em ensaios realizados anteriormente. São apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

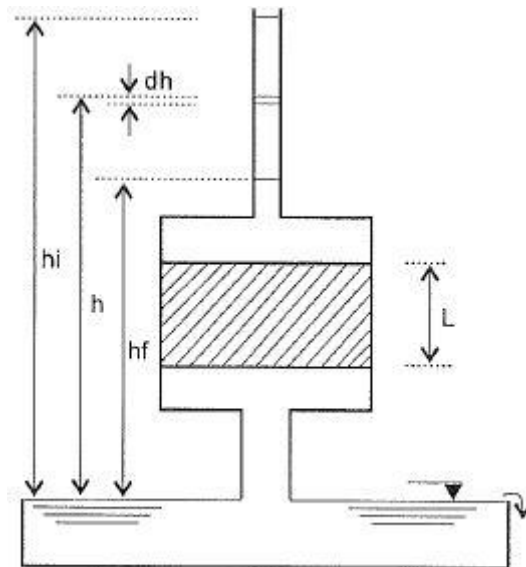
Solo	Coeficiente de permeabilidade (k) m/s
Argilas	<10 ⁻⁹
Siltes	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁹
Areias argilosas	10 ⁻⁷
Areias finas	10 ⁻⁵
Areias médias	10 ⁻⁴
Areias grossas	10 ⁻³

Fonte: Pinto (2006, p.117).

Conforme Gomes e Martins (2003), as camadas de fundo do aterro devem possuir um coeficiente de permeabilidade (k) inferior a 10^{-7} cm/s, para que garantam não ter vazamento do lixiviado para o lençol freático, no entanto é difícil obter uma camada natural que atenda essa permeabilidade. A Figura 9 representa um permeâmetro de carga variável.

Por se tratar de um ensaio que envolve parte de estanqueidade, deve se tomar alguns cuidados que podem gerar fonte de erros, tais como canais ou fluxo de caminhos preferências na lama bentonítica, saturação incompleta dos corpos de prova, bem como erros de medição. (MASSAD, 2016).

Figura 9 – Esquema de permeâmetro de carga variável



Fonte: Pinto (2006, p.104).

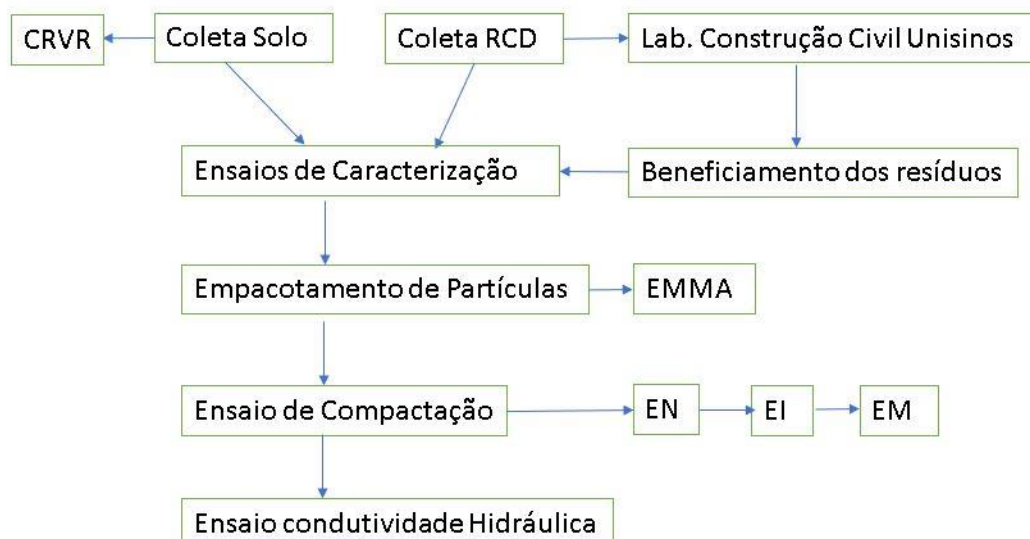
3 METODOLOGIA

O estudo está dividido em quatro (04) etapas: origem das amostras de solo e RCD, caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, estudo de empacotamento de partículas, ensaios em bancada.

Os ensaios de bancada serviram para testar as propriedades físicas da camada alternativa de impermeabilização inferior, utilizando composto formado por solo local (nesta pesquisa denominado como “Solo Local - SL”), RCD-CV (resíduo de cerâmica vermelha) e RCD-C (resíduos de concreto e argamassas), um dos motivos da divisão dos resíduos é verificar a absorção da água nos ensaios de compactação e permeabilidade. A validação do *liner* alternativo proposto foi executada comparando as propriedades físicas e hidráulicas do solo comumente utilizado para este fim pela empresa estudo de caso. Nesta pesquisa este solo argiloso é denominado “*Liner* Mineral Padrão – LMP”.

A Figura 10 mostra um fluxograma do procedimento experimental adotado para a pesquisa.

Figura 10 – Fluxograma resumo da Metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: EN (energia normal), EI (energia intermediária), EM (energia modificada), EMMA, CRVR (Aterro Sanitário da empresa CRVR em São Leopoldo/RS).

3.1 EMPRESA ESTUDO DE CASO: COLETA DOS MATERIAIS E GEOLOGIA DO LOCAL

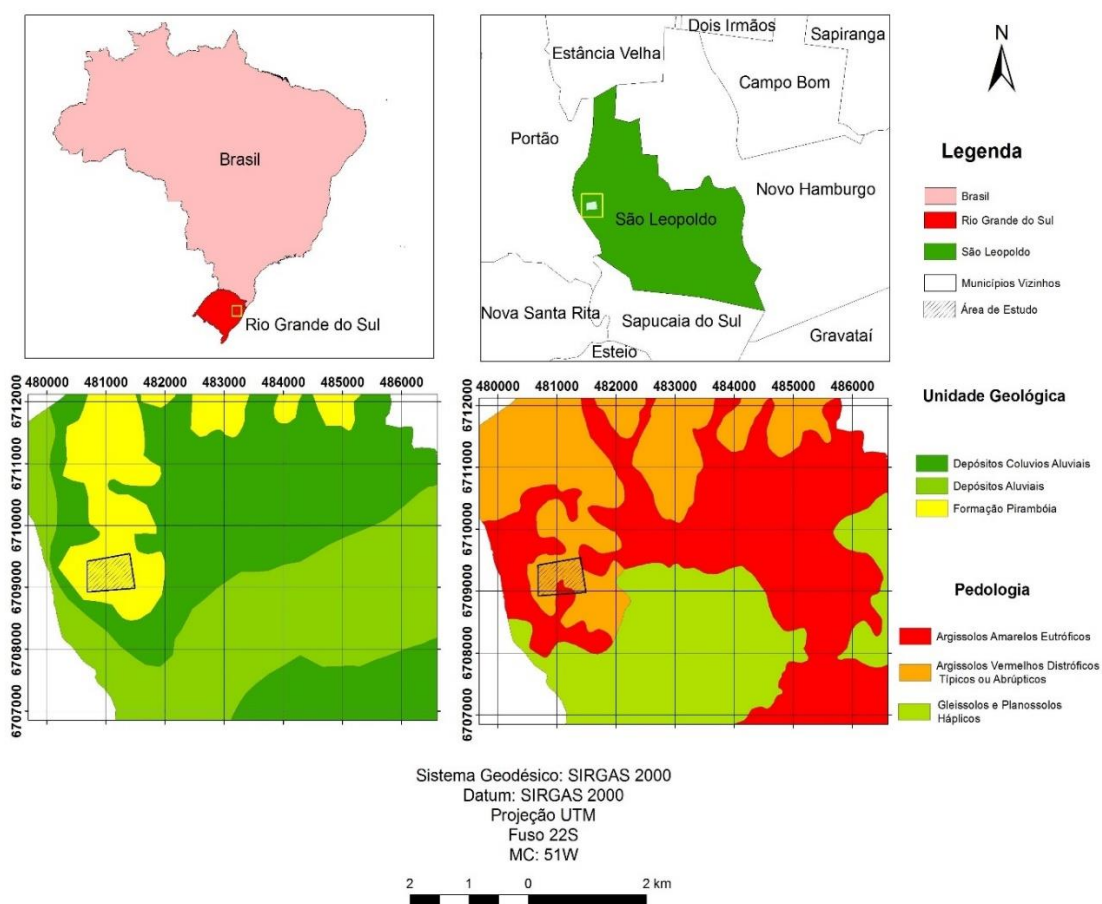
Os RCD's foram coletados no laboratório de construção civil da UNISINOS localizado em São Leopoldo/RS, no dia 16/10/2017. Estes resíduos são oriundos de paredes de alvenarias de aproximadamente 1 m² (corpos de prova utilizados para estudos na graduação em Engenharia Civil e Arquitetura). Estas paredes foram desmanchadas e separadas em bloco cerâmico e em bloco de concreto, para posterior beneficiamento e utilização na pesquisa.

A coleta dos solos foi realizada no Aterro Sanitário da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR) localizado na cidade de São Leopoldo/RS, no dia 27/07/2017. Foi coletado uma quantidade de 40 kg de solo local (SL) e 40 kg de Liner Mineral Padrão (LMP). As amostras foram levadas para o laboratório de mecânica dos solos da UNISINOS, onde os ensaios e análises foram desenvolvidos.

De acordo com o mapa geológico da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM, 2006), a geologia do local se caracteriza pela nomenclatura P3T1p, do grupo passa dois e sua formação é piramboia, ou seja, arenito médio a fino, geometria lenticular bem desenvolvida, ambiente continental, eólico com intercalações fluviais.

Conforme o software SIRGAS 2000 a geologia do local é composta pela Formação Pirambóia predominante, são compostos nos arredores por Depósitos de Colúvios Aluviais e Depósito de Aluviais. No que diz respeito a pedologia do solo é composta principalmente por Argilossolos Vermelhos Distróficos Típicos ou Abrúpticos e Argilossolos Amarelos Eutróficos. A Figura 11 apresenta a geologia do local.

Figura 11 – Geologia do local da coleta do solo



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 BENEFICIAMENTO DOS RCD

O Beneficiamento dos RCD foi realizado primeiramente no laboratório de construção civil da Unisinos no moinho de mandíbulas, para geração de um resíduo com granulometria mais grosseira. Posteriormente foi levado para o laboratório de materiais de construção da Unisinos e colocado no moinho de facas, objetivando reduzir sua granulometria. Por fim foi colocado no moinho de rolo, tonando o RCD praticamente uma areia fina a média (todo material passante na peneira 4,8mm). A última etapa foi a divisão física do material em RCD-CV (oriundo de cerâmica vermelha) e RCD-C (oriundo de concreto). A Figura 12 a seguir mostra os procedimentos descritos anteriormente.

Figura 12 – Processo de beneficiamento dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização foram importantes para identificar e conhecer as propriedades básicas do solo e o RCD. Vale salientar que foram caracterizados apenas os resíduos passados no moinho de rolos passante peneira 4,8mm. A seguir o detalhamento dos ensaios executados e metodologias utilizadas.

3.2.1 Ensaios de Caracterização

A caracterização física dos solos foi constituída na determinação dos seguintes aspectos físicos: teor de umidade in situ (ω), peso específico natural (γ_n), peso específico seco (γ_d), peso específico real dos grãos (γ_s), índice de vazios (e), porosidade (η), grau de saturação (s), limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP).

A determinação do teor de umidade (ω) dos solos foi realizada através de secagem em estufa e a preparação das amostras de solo para os ensaios de análise granulométrica, LP e LL, foram regidas pela NBR 6457 (ABNT, 2016a). O Índice de Plasticidade é a diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, o qual

define a zona em que o terreno se acha no estado plástico, de modo que quanto maior o IP, mais plástico será o solo. As amostras estão representadas na Fotografia 1.

Fotografia 1 - Coleta para o teor de umidade dos materiais



Fonte: Registrada pelo autor.

3.2.2 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado conforme as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 2016e), que foi usada como base para realizar os procedimentos. Inicialmente foi colocada para secagem ao ar, após esse processo foi coletado uma amostra de umidade e separado 1kg de material de acordo com a norma para então realizar o quarteamento da amostra. Esse ensaio é dividido em duas etapas, peneiramento e sedimentação. O peneiramento utiliza as peneiras de maior abertura para determinar os grãos de maior dimensão e a sedimentação utiliza-se o densímetro para medir grãos menores que a peneira 0,075mm.

Para o ensaio de peneiramento foram utilizadas as peneiras de dimensões nominais: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm, 0,075 mm, e não houve parcela de solo considerada maior do que 2,0 mm. Quanto ao ensaio de sedimentação este é realizado com solo passante na peneira 2,0 mm, e pesado 70 g de material para ser colocado junto com um defloculante. Nesse trabalho foi utilizado o hexametáfosfato de sódio. Esse ensaio é importante para fazer a classificação dos solos. Pela necessidade reconhecida previamente de se obter um material com partículas em frações menores do que as frações dos resíduos, foram caracterizados

apenas os resíduos passantes na peneira de número 16 (1,2 mm). Ou seja, acima dessa peneira não foi considerado as frações, pois nessa etapa já haviam sido beneficiadas. A Fotografia 2 demonstra o ensaio de sedimentação.

Fotografia 2 - Sedimentação das amostras



Fonte: Registrada pelo autor.

3.2.3 Picnometria por Gás Hélio

Os ensaios para determinar o peso específico real dos grãos foram realizados pelo método de picnometria por gás Hélio, em substituição da NBR 6458 (ABNT, 2016b). O motivo da substituição do método inclui que a norma estava em revisão e recentemente encontrava-se cancelada.

A aplicação dessa técnica com picnômetro funciona da seguinte maneira: acrescenta-se pressão com o gás hélio na amostra, o gás hélio é utilizado por ser um material inerte, além disso penetra facilmente nos poros, devido ao seu tamanho molecular reduzido, e com isso é possível determinar com mais precisão o volume de sólidos naquele determinado lugar (MOURA E FIGUEIREDO, 2002).

Estes ensaios foram realizados no laboratório de caracterização e valorização de materiais da Unisinos (LCVmat) com o equipamento micromeritics AccuPyc II 1340. As amostras foram secas em estufa a 100°C. A Fotografia 3 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.

Fotografia 3 - Picnômetro por intrusão de gás Hélio



Fonte: Registrada pelo autor.

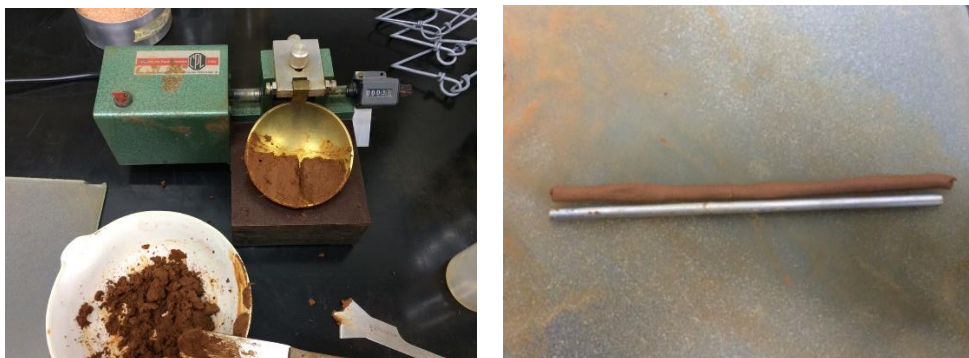
3.2.4 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg são divididos em Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade. Os limites foram determinados somente para os solos, para isso foram separados 100 g para o Limite de Liquidez e 100 g para o Limite de Plasticidade, passando na peneira 0,42 mm.

O Limite de Liquidez segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c) é atingido quando o solo sofre 25 golpes. Para isso são determinados vários intervalos de golpes para então atingir o limite encontrado através do aparelho de Casagrande.

O Limite de Plasticidade NBR 7180 (ABNT, 2016d) é preparado conforme descrição a seguir, com o objetivo de moldar 5 corpos de prova de solo com 5 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, em uma placa de vidro ranhurada, o solo fatura apresentando rachaduras ao perder umidade e alcançar o limite de plasticidade. Fotografia 4 demonstra o ensaio sendo realizado.

Fotografia 4 - Limite de liquidez e plasticidade



Fonte: Registradas pelo autor.

3.3 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS

O estudo do empacotamento das partículas foi realizado com a utilização do software EMMA Mix Analyzer. Software usualmente empregado para empacotamento de concreto de alta resistência. Afim de obter o menor índice de vazios, para assim ter uma resistência a compressão alta para o concreto, o software trabalha como princípio para sua análise com o método de Andreasen modificado e Andreassen, apresentados no referencial teórico. Analisando as pesquisas na área, optou-se, neste trabalho, por adotar o método de Andreasen Modificado. Neste, é possível trabalhar com as partículas próximas de sua forma real, possibilitando a análise de mais grãos.

A partir das frações e granulometrias encontradas na etapa de caracterização das amostras, inseriu-se os resultados no programa e definiu-se as curvas granulométricas ideais (teóricas), de acordo com as frações fornecidas ao programa. Contudo, para comprovação da eficiência das curvas e empacotamentos teóricos, fez-se os ensaios físicos nos *liners* alternativos desenvolvidos. Foram testadas as seguintes combinações para *liners*:

- a) 100% SL;
- b) 100% LMP;
- c) 60% SL + 40% RCD-CV;
- d) 60% SL+ 40% RCD-C;
- e) 60% SL + 20% RCD-CV + 20% RCD-C.

3.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com NBR 7182 (ABNT, 2016f). Foram ensaiados o solo local (SL), o *liner* mineral padrão (LMP), bem como os *liners* alternativos em conformidade com a mistura dos resíduos com o solo e melhores ensaios de empacotamento encontrados no ensaio de compacidade e no software EMMA.

Para avaliação dos *liners*, testou-se para os ensaios de compactação, energia normal, intermediária e modificada. Estes testes são justificados devido a exigência de um teor elevado de permeabilidade para aterros sanitários ($k = 10^{-7}$ cm/s).

Os corpos de prova foram moldados com o reuso de solo, para encontrar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo. Para as diferentes energias foi utilizado o mesmo cilindro de Proctor, variando apenas o número de golpes. Para energia normal foram 3 camadas de 26 golpes com o soquete de 2,5 kg; para a energia intermediária foi moldado com 3 camadas de 21 golpes com o soquete de 4,5 kg; para a energia modificada foram 5 camadas de 27 golpes com soquete de 4,5 kg. A Fotografia 5 apresenta um corpo de prova sendo moldado.

Fotografia 5 - Ensaio de compactação



Fonte: Registrada pelo autor.

Após a compactação de cada ponto foi retirada uma cápsula para coletar o teor de umidade do corpo de prova possibilitando a montagem da curva de compactação.

3.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS

Para determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos foi utilizado a NBR 14545 (ABNT, 2000) que apresenta os procedimentos de ensaio, o método utilizado de ensaio foi o B. Foram moldados 15 corpos de prova, variando a energia de compactação e o teor de RCD dos mesmos (60% de solo local e 40% de RCD-C; 60% de solo local e 40% de RCD-CV; 60% de solo local, 20% de RCD-C, 20% de RCD-CV), essas proporções foram obtidas por meio do software EMMA.

Para compactar os corpos de prova, foram reduzidas as medidas iniciais do cilindro Proctor (12cm), para o cilindro Marshall (8cm), e utilizado o mesmo soquete de ensaio Marshall. Com isso foi transformado a energia do ensaio de compactação para energia do ensaio Marshall, a conversão de energia consta no apêndice B. A conversão é necessária visto que a base de aplicação do soquete Proctor é diferente do soquete Marshall. Esta adaptação do método (redução do tamanho do corpo de prova), tem o motivo de diminuir o tempo para a percolação da água no corpo de prova para saturação. A Fotografia 6 a seguir ilustra o corpo de prova com as reduções.

Fotografia 6 - Corpo de prova e permeâmetro



Fonte: Registradas pelo autor.

O permeâmetro foi executado conforme os requisitos da NBR 14545 (ABNT, 2000). A partir disso, para execução dos ensaios, foi realizado o seguinte procedimento experimental: Mediu-se a diferença de altura de água inicial h_0 e final h_f a cada 10 minutos (600s), até o valor se manter constante (não variar entre +/- 0,4cm), foi realizado de 5 a 6 medições por corpo de prova, no mínimo.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são apresentados e discutidos da seguinte maneira: Caracterização física dos materiais estudados, Ensaio de Empacotamento, Ensaio de Compactação, Ensaio de Permeabilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os resultados de caracterização dos materiais estudados referente a umidade, peso e peso específico, índice de vazios, porosidade e grau de saturação; estão apresentados na Tabela 4 e Tabela 5

Tabela 4 - Índices físicos solos

		SL	LMP
Umidade	%	15,74	18,75
Peso Específico Natural (γ_n)	kN/m ³	17,13	16,1
Peso Específico Aparente Seco (γ_d)	kN/m ³	14,8	13,56
Peso Específico Real dos Grãos (γ_s)	kN/m ³	26,36	26,2
Índices de Vazios (e)	-	0,78	0,93
Porosidade (η)	%	43,85	48,26
Grau de Saturação (S)	%	48,35	48,73
Peso Específico Saturado (γ_{sat})	kN/m ³	17,13	16,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados encontrados nos índices físicos, o solo local possui um índice de vazios menor em relação ao *liner* mineral padrão e conseqüentemente uma porosidade menor. Esses parâmetros são importantes para a impermeabilização do aterro sanitário.

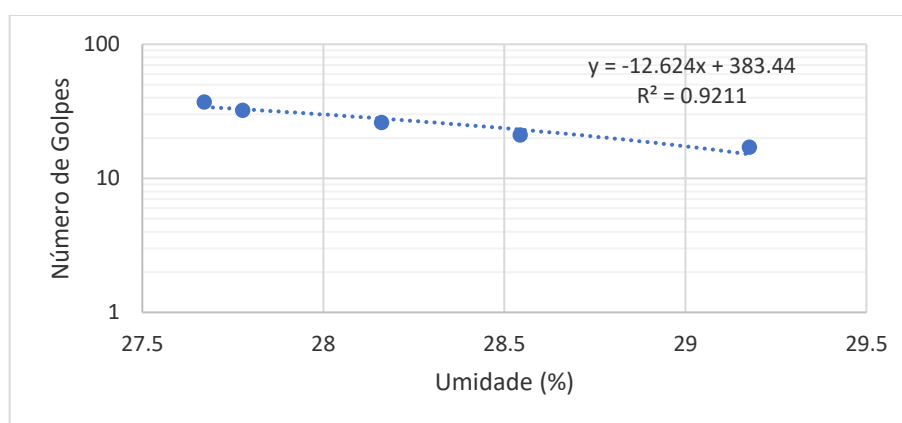
Tabela 5 - Índice físicos resíduos

		RCD-C	RCD-CV
Umidade	%	1,45	1,13
Peso Específico (γ_n)	kN/m ³	13,30	11,60
Peso Específico Aparente Seco (γ_d)	kN/m ³	13,11	11,47
Peso Específico Real dos Grãos (γ_s)	kN/m ³	26,65	26,51
Índices de Vazios (e)	-	0,98	1,27
Porosidade (η)	%	49,49	55,95

Fonte: Elaborada pelo autor.

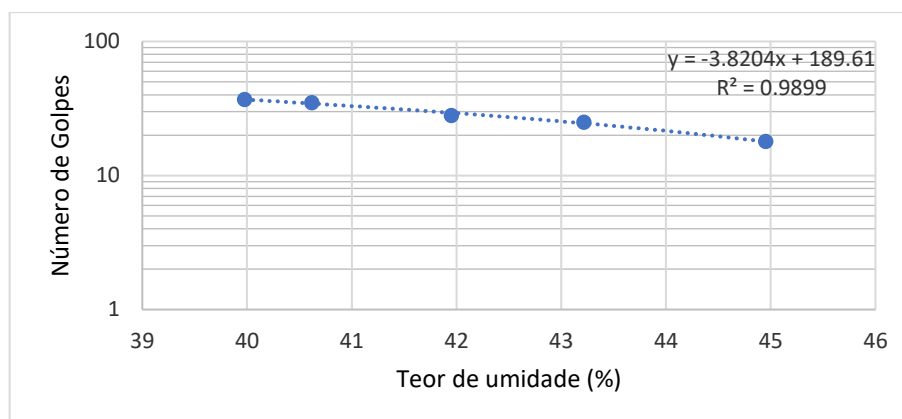
Analisando os resíduos pode-se afirmar que o RCD-C é o que menos possui vazios e conseqüentemente menor porosidade entre os resíduos analisados. Isso se deve por ter composições mais finas que preenche os espaços vazios tornando menos poroso. Em relação aos limites de Atterberg, o Gráfico 2 e o Gráfico 3 apresentam os resultados dos limites de liquidez dos solos estudados.

Gráfico 2 - Limite de Liquidez SL



Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 3 - Limite de Liquidez LMP



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da equação obtida pelo Software Excel, pode-se determinar o limite de liquidez correspondente a 28% para o solo local e 43% para o *liner* mineral padrão.

Para o limite de plasticidade em número inteiro arredondado foi obtido o valor para o solo local de 20% e de 28% para o *liner* mineral padrão.

O índice de plasticidade (IP) é a diferença entre o LL e LP sendo o cálculo $IP = LL - LP$. O valor calculado para o SL é de 8%, ou seja, considerado um material medianamente plástico, já para o LMP é de 15%, considerado um material altamente plástico. Da mesma forma, para os RCD testados, não foi possível a execução dos limites de Atterberg, sendo considerado estes materiais não plásticos (NP).

De acordo com Caputo (2017) o índice de plasticidade pode ser classificado da seguinte forma:

Fracamente plásticos - $1 < IP < 7$

Medianamente plásticos - $7 < IP < 15$

Altamente plásticos - $IP > 15$

Logo pode-se concluir que o solo local é medianamente plástico e o *liner* mineral padrão é altamente plástico. No trabalho de Gomes e Martins (2003) foram caracterizados e escolhidos 3 tipos de solos para *liner* mineral, os valores são bem parecidos com os encontrados neste trabalho dentre eles limite de liquidez, limite de plasticidade, peso específico real dos grãos e umidade ótima. A Figura 13 mostra os parâmetros encontrados naquela situação.

Figura 13 – Caracterização física solos Portão

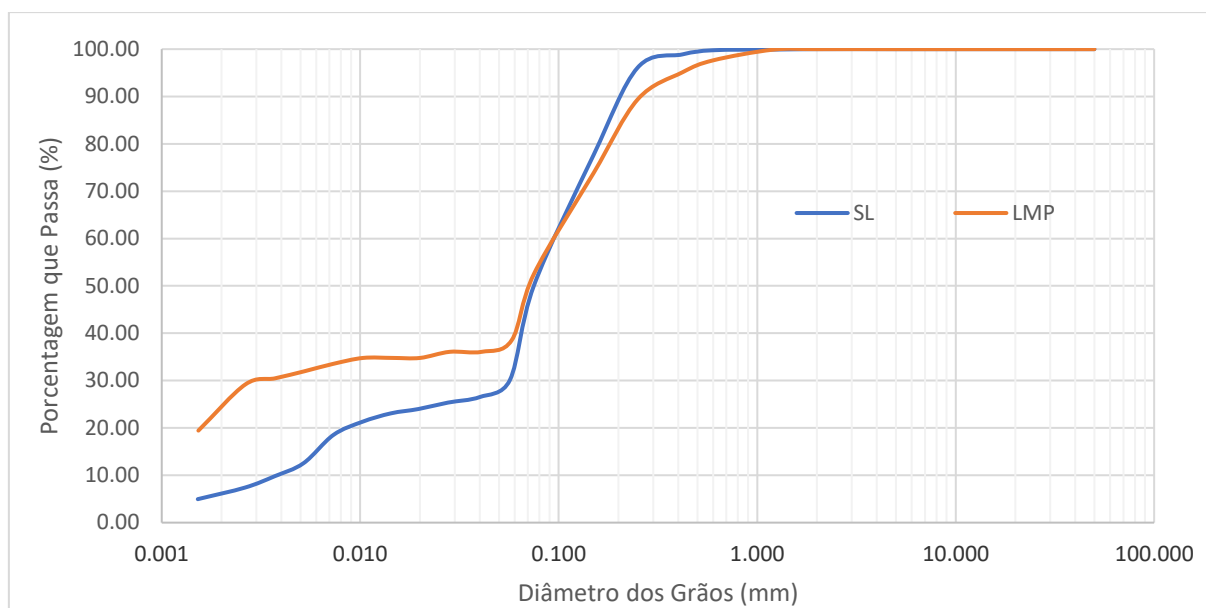
Parâmetro	Método	Solo I	Solo II	Solo III
Limite Liquidez	NBR 6459/84	28-35	50	27-31
Limite Plasticidade	NBR 7180/84	17-22	41	24-26
Índice Plasticidade	NBR 7180/84	9-13	9	3-5
% argila	NBR 7181/84	22	30	15
% silte	NBR 7181/84	48	33	12
% areia	NBR 7181/84	30	37	73
Classificação Unificada	SUCS	CL	OH-OL	SM
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	NBR 6508/84	2,69	2,65	2,67
Densidade seca máxima de compactação	NBR 7182/86	1,7	1,5	2,4
Umidade ótima ($w_{\text{ótima}}$)	NBR 7182/86	18	16	13
Condutividade hidráulica k (cm/s ; $w_{\text{compactação}} = w_{\text{ótima}} + 2\%$)	ASTM D5084	5×10^{-8}	5×10^{-8}	$1,5 \times 10^{-6}$

Fonte: COSTA (2006, p. 45).

Por fim, na Tabela 6 e Tabela 7 são apresentadas as frações de areia, silte e argila para cada material testado. Estas foram obtidas a partir das curvas granulométricas que estão no Gráfico 4 e Gráfico 5. As curvas granulométricas foram confeccionadas a partir do ensaio de sedimentação e granulometria.

Estes resultados foram utilizados como dados de entrada para o software, resultando na determinação dos melhores empacotamentos, conforme apresentado na sequência desta pesquisa. Conforme detalhado na metodologia, o ensaio foi adaptado no que diz respeito a peso específico real dos grãos, o qual foi usado o método de picnometria por intrusão de gás Hélio e não o método da NBR. Os valores dos ensaios podem ser consultados no apêndice A.

Gráfico 4 - Curva granulométrica dos solos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 - Composição granulométrica dos solos

Composição Granulométrica	SL	LMP
Pedregulho (%)	0	0
Areia Grossa (%)	0,23	2,37
Areia Média (%)	22,1	23,78
Areia Fina (%)	47,59	35,37
Silte (%)	22,69	9,29
Argila (%)	7,4	29,2

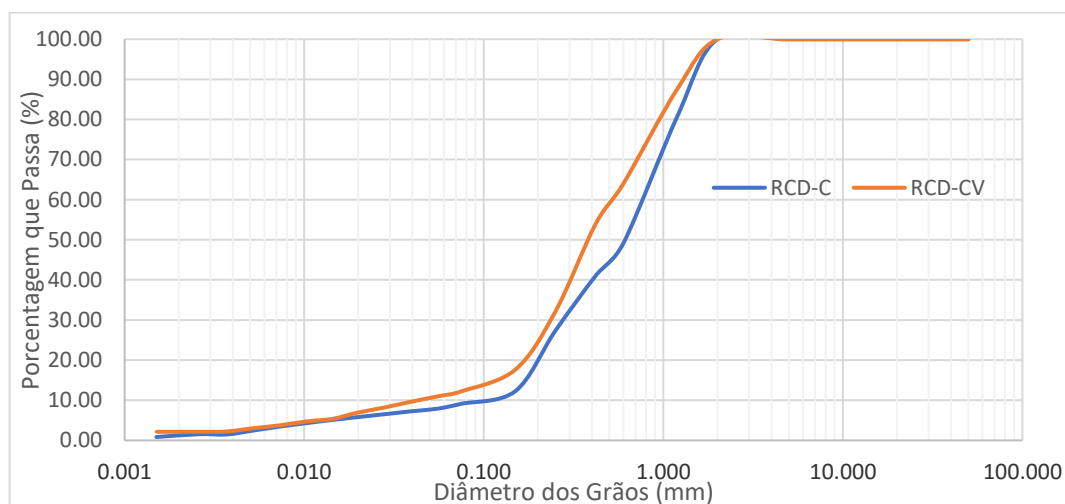
Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme mostra a curva de granulometria e a composição, o solo local apresentou uma fração considerável de silte, porém a quantidade de argila não foi expressiva, ficando abaixo de 10%. Isso pode ocasionar um problema relacionado com a impermeabilização do aterro, uma vez que a fração argila é a mais importante, porque possui partículas finas e lamelares que conseguem melhor preencher os espaços vazios entre os grãos, sendo muito comumente utilizadas para barreiras impermeáveis.

O *liner* mineral padrão o qual é utilizado no aterro, apresentou quase 30% de argila, o que representa que a fração de argila do *liner* mineral padrão é quase 3 vezes maior que a do solo local. Percebeu-se, com isso, a necessidade, para o estudo do *liner* alternativo, a incorporação de uma composição de RCD afim de aumentar a o

teor de finos. A análise granulométrica dos RCD's estão apresentados na Tabela 7 a seguir.

Gráfico 5 - Gráfico granulometria resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Composição dos resíduos

Composição Granulométrica	RCD-C	RCD-CV
Pedregulho (%)	0	0
Areia Grossa (%)	50,81	35,97
Areia Média (%)	36,9	46,4
Areia Fina (%)	4,35	6,58
Silte (%)	6,39	8,9
Argila (%)	1,54	2,15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Diante das composições granulométricas de cada solo e resíduo, este pode ser classificado através do método HRB, de acordo Figura 14. Por simplificação e o tipo de moagem os resíduos foram adotados como material arenoso, sendo assim é possível ser classificado também neste método. O solo SL foi classificado com a sigla A-5 (3) corresponde ao solo siltoso de alta compressibilidade e o LMP com sigla A-7-6 (5), sendo denominado como argila de alta compressibilidade e alta plasticidade.

Considerando os resíduos como “solos” podem ser classificados como RCD-CV areia fina A-3 (0), e RCD-C como solos granulares sem finos A-1-b (0).

Figura 14 - Método HRB para classificação de solos

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006, p.56).

4.2 EMPACOTAMENTO UTILIZANDO EMMA MIX ANALYZER

Para confeccionar a curva granulométrica ideal de acordo com os estudos propostos, foram utilizados como dados de entrada no software parâmetros importantes como porosidade e peso específico real dos grãos. Para isso foi lançado as 3 granulometrias no software (SL, RCD-C e RCD-CV).

Foi preciso cadastrar manualmente cada material, bem como a curva granulométrica. Com estes dados, o software gera a as curvas granulométricas associando os diferentes teores dos materiais. A Figura 15 apresenta a parte de lançamento da curva granulométrica. Já a Figura 16 demonstra a quantidade utilizada.

Figura 15 – Página para preencher os dados dos materiais

Material: Solo Siltoso

Details for material

Material Name: Solo Siltoso

Description: [Empty]

Origin: [Empty]

Price: [Empty] Per Metric Ton (MT)

Part. Density: 2.64

Part. Porosity: 43.85 %

CO2/kg: [Empty] gram/kg

KJ/kg: [Empty]

d50: 76.45

Last Modified: 26/01/2018 15:34:26

Distribution Data

Size (micron)	Percentage Pass
64000.00	100.00
32000.00	100.00
26000.00	100.00
22000.00	100.00
16000.00	100.00
12000.00	100.00
8000.00	100.00
4000.00	100.00
2000.00	100.00
1000.00	99.86
704.00	99.79
592.00	99.73
497.80	99.27
418.60	98.87
352.00	97.77
296.00	96.85
248.90	95.90
209.30	88.60
176.00	82.46
148.00	76.93

Close

You can import material distribution data via the clipboard. Press the button 'Import Materials' for more info.

Fonte: Registrada pelo autor.

Figura 16 – Composição dos materiais

Materials In Composition

Material Name	Density	Quantity	Vol %	Price	Version	CO2/kg	KJ/kg
RCD-C	2.67	400.00	39.73			0.00	0.00
Solo Siltoso	2.64	600.00	60.27			0.00	0.00
RCD-V	2.65	0.00	0.00			0.00	0.00

Calculation Model

Selected Model: Modified Andreassen

Parameters:

q-Value	0.37
Max. Particle Size	2000
Min. Particle Size	0.25

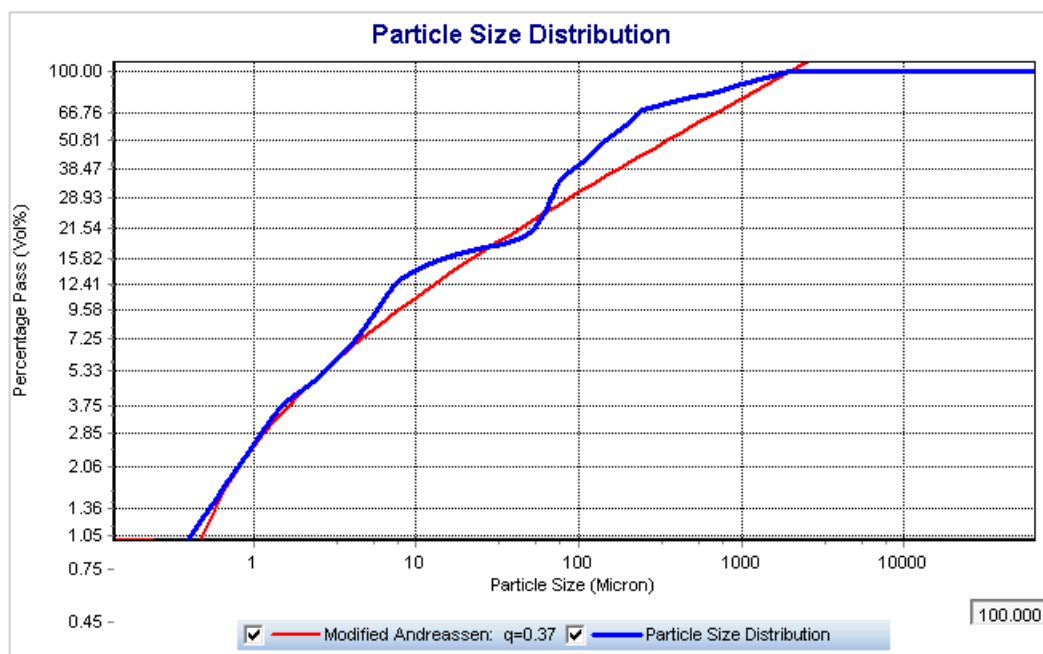
Fonte: Registrada pelo autor.

Após essa primeira etapa foi inserido diversas porcentagens dos materiais afim de se obter a melhor composição granulométrica de acordo com a curva padrão do software. Com isso foram definidos alguns teores para a continuidade dos testes de compactação e permeabilidade dos *liners* alternativos. A seguir os teores obtidos após análise no software:

- a) 60% SL + 40% RCD-CV;
- b) 60% SL+ 40% RCD-C;
- c) 60% SL + 20% RCD-CV + 20% RCD-C.

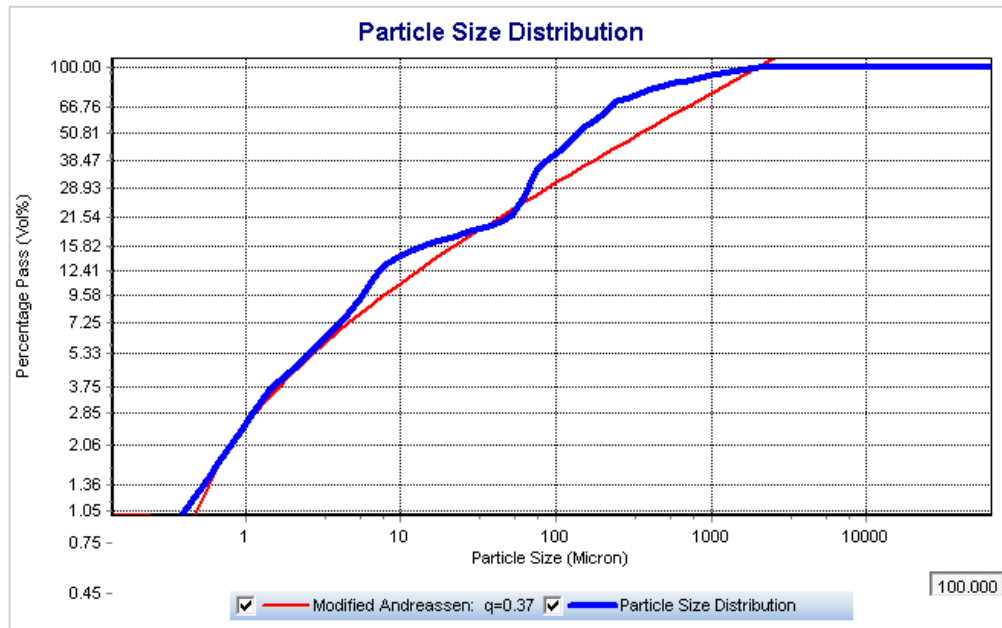
Em seguida foi gerado a curva no software para verificar o melhor desempenho. Adotou-se um fator para geração dos dados. O fator “q” utilizado foi 0,37, que é recomendado nas bibliográficas de Dinger e Funk (1995). O manual do software sugere valores de coeficiente de distribuição maior que 0,30; vale destacar que se alterar o valor do parâmetro “q” pode mudar o formato da curva. Já, de acordo com CHRIST (2014) dependendo do material empregado são usados coeficientes de variação q maiores ou iguais a 0,20, o objetivo era obter um concreto de alto desempenho de pós reativos, neste caso optou por um q de 0,20, pela questão de almejar como resultado uma mistura que deva apresentar uma melhor trabalhabilidade no concreto. A Figura 17 demonstra o valor da curva com a porcentagem de solo local e RCD-C. A Figura 18 apresenta os resultados para SL + RCD-CV. E, a Figura 19 apresenta os resultados para SL + RCD-C + RCD-CV.

Figura 17 – Distribuição da curva com 60% solo local e 40% RCD-C



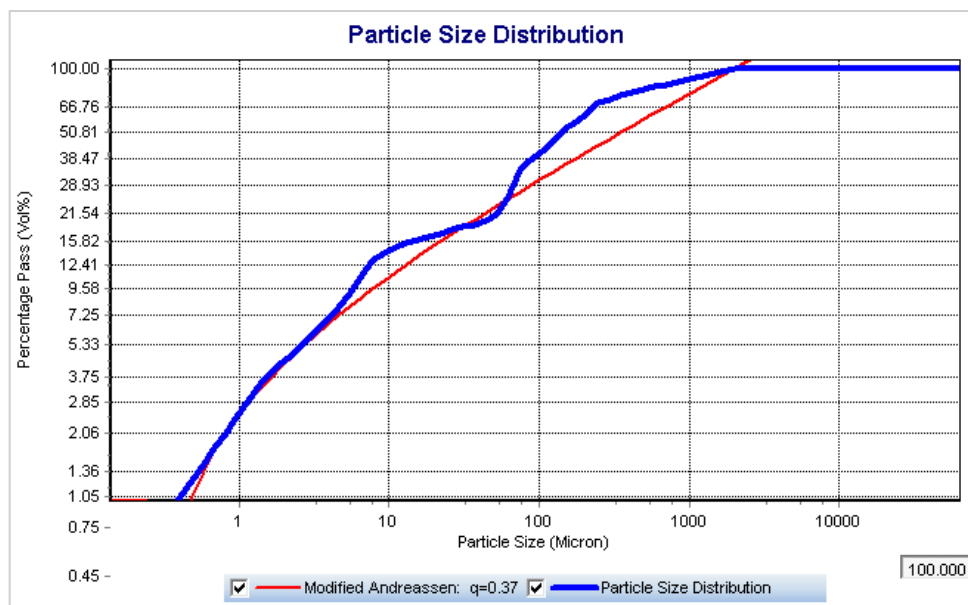
Fonte: Registrada pelo autor.

Figura 18 - Distribuição granulométrica com 60% solo local e 40 RCD-CV



Fonte: Registrada pelo autor.

Figura 19 - Distribuição granulométrica com 60% solo local, 20% RCD-C e 20% RCD-CV



Fonte: Registrada pelo autor.

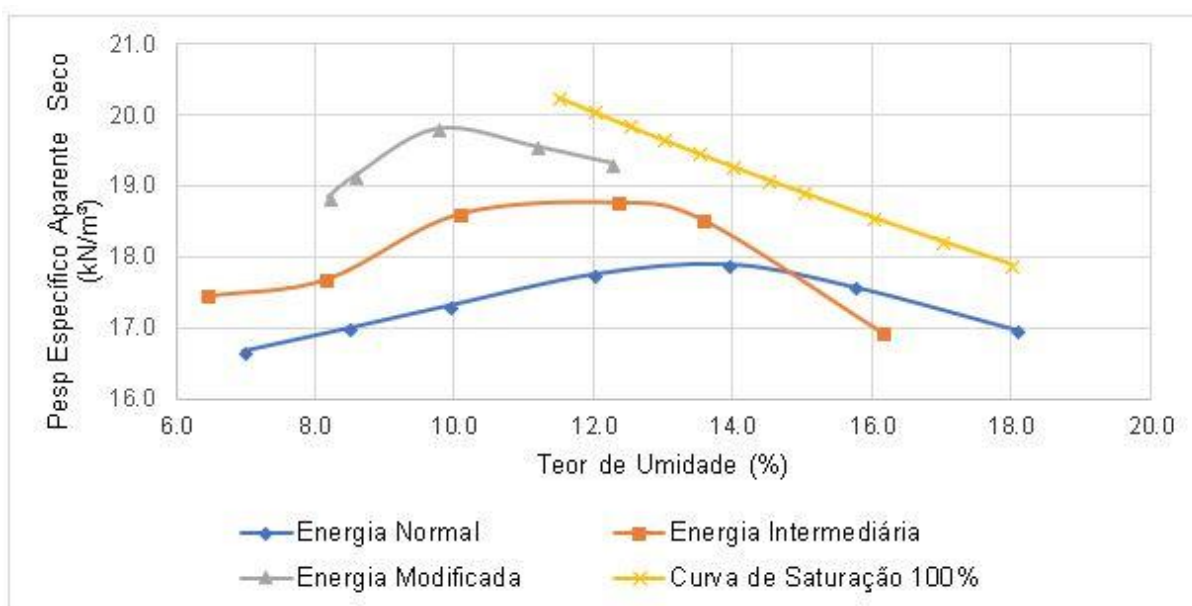
A curva em vermelho refere-se a curva proposta pelo software representando a teoria de Andreassen modificado, que considera uma simulação melhor da realidade, tornando mais eficiente que o método Andreassen. Já a curva em azul representa a parte da composição dos 3 materiais colocados no programa.

Percebe-se que a composição dos materiais não é exatamente igual a linha ideal, porém entende-se que a fração mais fina seria a mais importante, ou seja, aquela abaixo de 10 μm . E, nessa condição as curvas ficam quase coincidentes, tornando o resultado satisfatório. Assim, para as composições testadas e consideradas satisfatórias, fez-se os testes de compactação e permeabilidade dos potenciais *liners* alternativos.

4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os resultados de todos os ensaios de compactação estão apresentados nas figuras a seguir. Para determinar os pontos de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, foram obtidos os valores máximos de cada curva gerados pelo Software Excel, os valores do ensaio podem ser encontrados no apêndice B. A Figura 20 demonstra a curva do SL.

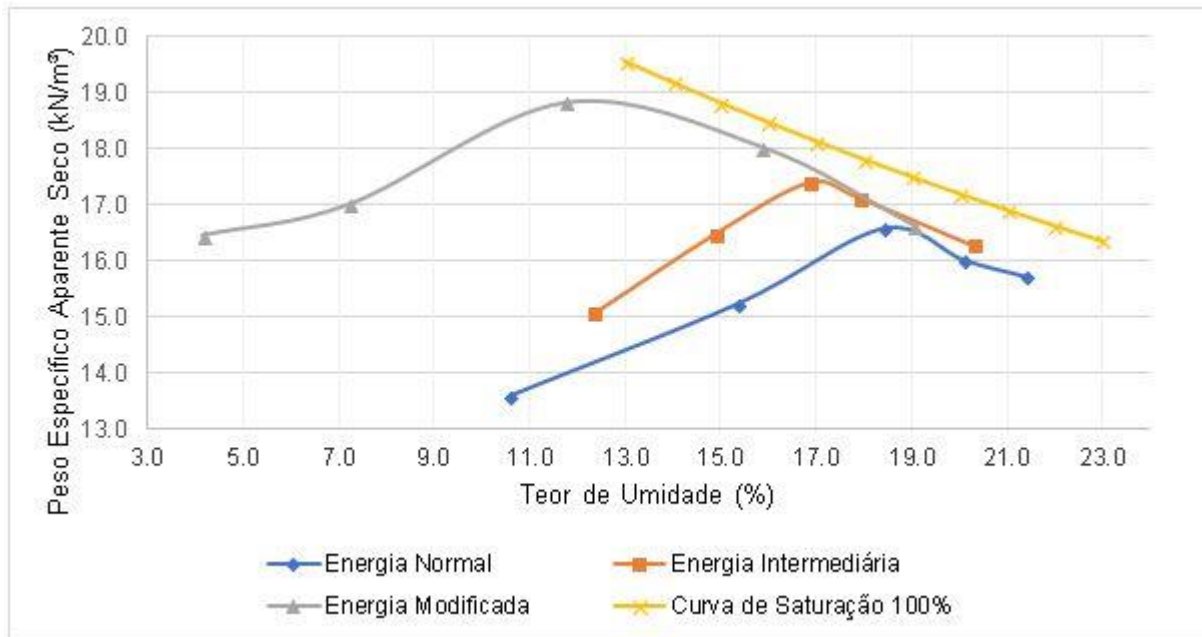
Figura 20 – Ensaio compactação SL



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor obtido para a umidade ótima ao ser empregado a energia normal foi de 14%, o peso específico aparente seco máximo de 17,9 kN/m³, para a energia intermediária foi de 12% e 18,8 kN/m³, e para energia modificada foi de 10% e 19,7 kN/m³. A Figura 21 mostra as curvas de compactação para o LMP.

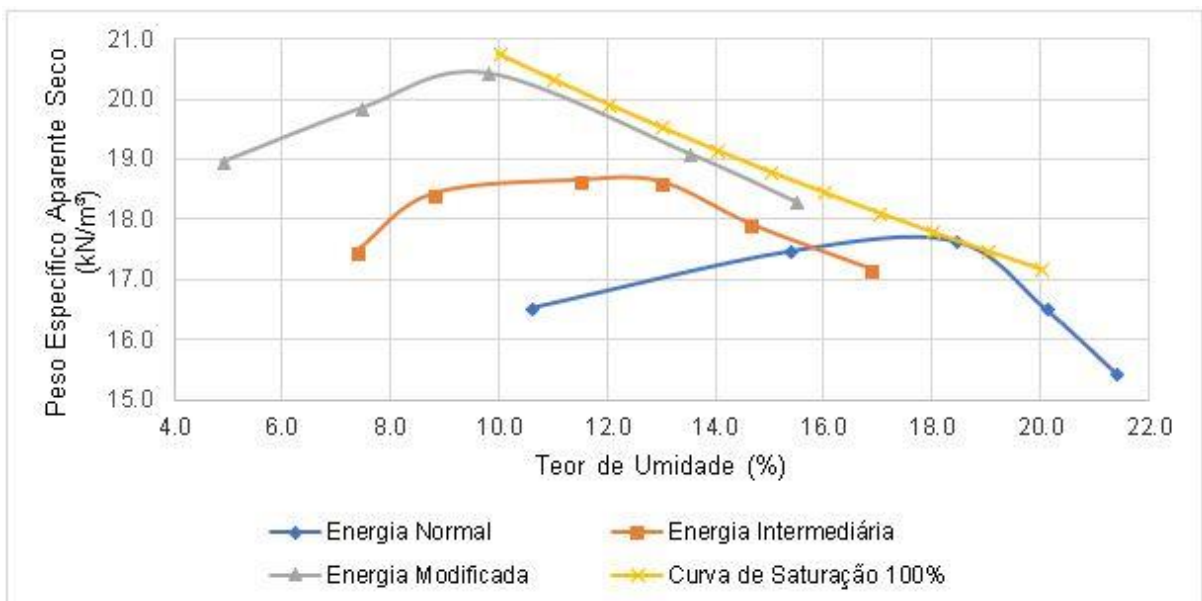
Figura 21 - Ensaio compactação LMP



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor obtido para a umidade ótima com o emprego de energia normal foi de 18%, o peso específico aparente seco máximo de 16,6 kN/m³, para a energia intermediária foi de 17% e 17,5kN/m³, e para energia modificada foi de 12% e 18, 8 kN/m³. A Figura 22 demonstra as curvas de compactação para 60% SL+40% RCD-C.

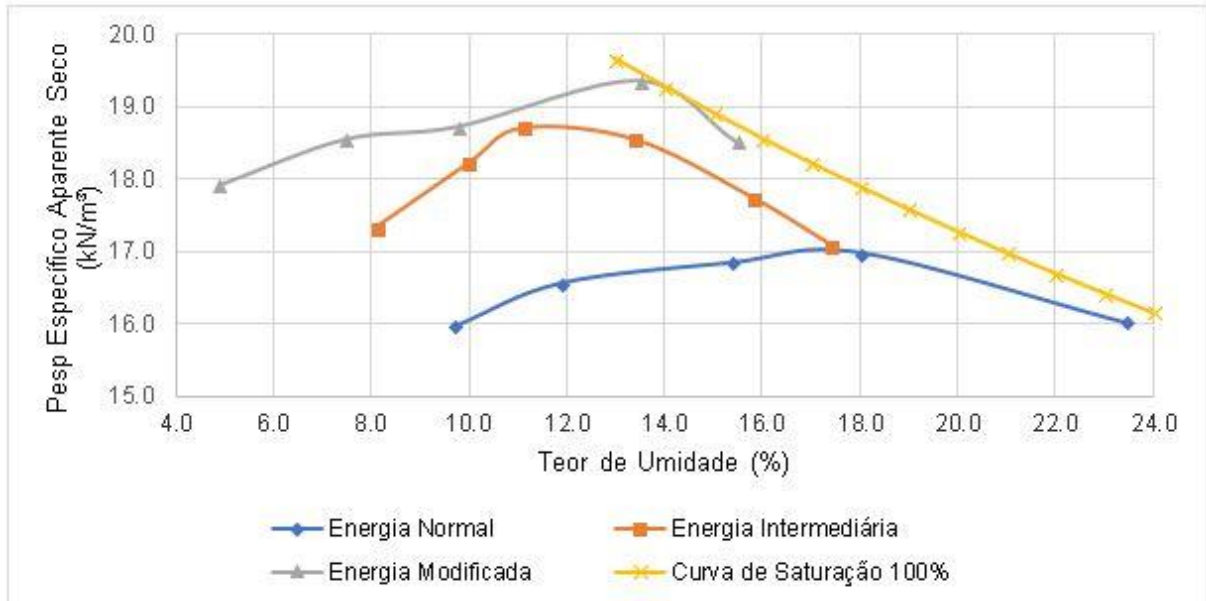
Figura 22- Compactação 60% SL+40% RCD-C



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor obtido para a umidade ótima com o emprego de energia normal foi de 18,5%, o peso específico aparente seco máximo de 17,7 kN/m³, para a energia intermediária foi de 13% e 18,6kN/m³, e para energia modificada foi de 9,5% e 20,5 kN/m³. Figura 23 demonstra as curvas de compactação para 60% SL+40% RCD-CV.

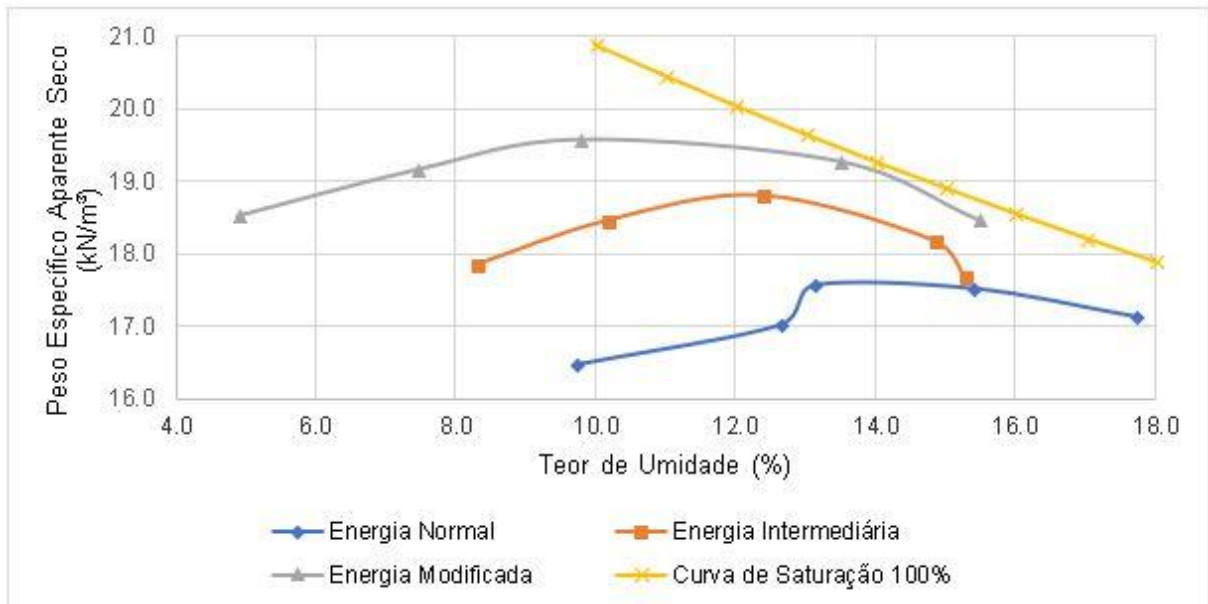
Figura 23 - Compactação 60% SL+ 40% RCD-CV



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor para a umidade ótima para a energia normal foi de 17,5%, o peso específico aparente seco máximo de 17 kN/m³, para a energia intermediária foi de 11,5% e 18,7kN/m³, e para a energia modificada foi de 12,5% e 19 kN/m³. A Figura 24 demonstra as curvas para 60% SL+20% RCD-C+20% RCD-CV.

Figura 24 - Compactação 60% SL+20% RCD-CV 20% RCD-C



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor para a umidade ótima da energia normal foi de 13%, o peso específico aparente seco máximo de 17,7 kN/m³, para a energia intermediária foi de 12,5% e 18,8kN/m³, e para a energia modificada foi de 10,0% e 19,6 kN/m³.

Em todos os gráficos apresentados percebe-se uma redução do teor de umidade a medida que se aumenta da energia de compactação. Este fenômeno também é relacionado pela pesquisa de Mitchell (1965), o qual também apresentou a redução do teor de umidade e aumento da energia de compactação para o estudo de siltes, um dos motivos está relacionado com a energia aplicada ocorrendo um esforço maior de iteração entre partículas aumentando o grau de dispersão das partículas.

A Tabela 8 apresenta um resumo com os valores encontrados no ensaio e seus respectivos parâmetros tais como umidade ótima, peso específico aparente seco máximo, índice de vazios, porosidade.

Tabela 8 – Tabela resumo com parâmetros obtidos na compactação

Nomenclatura/Energia aplicada	Peso específico aparente seco máximo (kN/m³)	Umidade ótima (%)	Índice de Vazios	Porosidade (%)
SL - Energia Normal	17,9	14	0,47	32,20
SL - Energia Intermediária	18,8	12	0,40	28,79
SL - Energia Modificada	19,7	10	0,34	25,38
LMP - Energia Normal	16,6	18	0,58	36,64
LMP - Energia Intermediária	17,5	17	0,50	33,21
LMP - Energia Modificada	18,8	12	0,39	28,24
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Normal	17,7	18,5	0,49	32,95
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Intermediária	18,6	12	0,42	29,55
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Modificada	20,5	9,5	0,29	22,35
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Normal	17	17,5	0,55	35,61
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Intermediária	18,7	11,5	0,41	29,17
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Modificada	19	12,5	0,39	28,03
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Normal	17,7	13	0,49	32,95
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Intermediária	18,8	12,5	0,40	28,79
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Modificada	19,6	10	0,35	25,76

Fonte: Elaborado pelo autor.

O liner mineral que apresentou os melhores resultados foi o SL 60% e 40% RCD-C - Energia Modificada, devido ao elevado peso específico, baixa umidade ótima, menor índice de vazios entre eles, e menor prosidade.

Sobre os RCD-C e RCD-CV no quesito de absorção de água, não houve diferença na umidade ótima significativa, como pode perceber na tabela acima a variação foi de 1% a 2% entre as amostras.

No estudo realizado por Daniel e Benson (1990) analisando o estudo da energia de compactação em 3 diferentes solos e assim correlacionando com a condutividade apresentou parâmetros já comprovados por Mitchell (1965), ainda assim foi melhorado a questão da zona ótima aceitável de compactação, que fica entre os pontos de viragem da curva de compactação (ramo úmido e ramo seco). Em teoria isso se deve pois quanto maior a energia preenche os vazios de ar mais rapidamente, e com isso necessita menos água, diferente de uma energia menor que precisa mais água para o mesmo efeito.

4.4 PERMEABILIDADE

Os resultados encontrados no ensaio de condutividade estão apresentados na Tabela 9, os valores em verde são referentes a amostras que obtiveram o resultado da norma. As medições do ensaio de permeabilidade podem ser encontradas no apêndice C.

Tabela 9 – Coeficiente de Permeabilidade

Nomenclatura/Energia aplicada	Coeficiente de permeabilidade k_{20} (cm/s)
SL - Energia Normal	2,86E-06
SL - Energia Intermediária	2,96E-06
SL - Energia Modificada	1,90E-07
LMP - Energia Normal	9,79E-07
LMP - Energia Intermediária	9,77E-07
LMP - Energia Modificada	9,37E-07
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Normal	1,36E-06
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Intermediária	1,59E-06
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Modificada	5,51E-07
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Normal	1,05E-06
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Intermediária	1,46E-06
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Modificada	9,96E-07
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Normal	6,35E-06
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Intermediária	8,30E-06
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Modificada	9,37E-07

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para efeitos de projeto e a recomendação da norma de aterro sanitário que exige o coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 10^{-7} cm/s, apenas as amostras que se apresentam na tabela em verde atenderam esse critério, destacando que a energia modificada obteve 100% de aproveitamento na aprovação do coeficiente de permeabilidade. Isso se deve que na energia modificada o peso específico aparente seco é elevado e com isso há uma redução no índice de vazios e consequentemente na porosidade do material, tornando o assim menos permeável.

Estudo de Mitchell (1965) constatou que a medida que aumenta a energia de compactação a permeabilidade diminui, o número de espaços é reduzido e a permeabilidade varia diretamente com a área de seção dos poros. Um dos possíveis

motivos das outras energias não conseguirem o mesmo efeito pode estar relacionado com o índice de vazios e a porosidade do material, não atingindo o valor suficiente para reduzir a passagem da percolação da água a valores aceitáveis.

No artigo de Benson et al. (1999) o qual analisou 85 argilas compactadas em escala real nos Estados Unidos para uso em *liners*, foi indicado que apenas 74% atenderam o coeficiente de permeabilidade 10^{-7} cm/s, sugerido pela norma, apontando falhas no sistema de revestimento na parte de execução e controle da umidade de compactação.

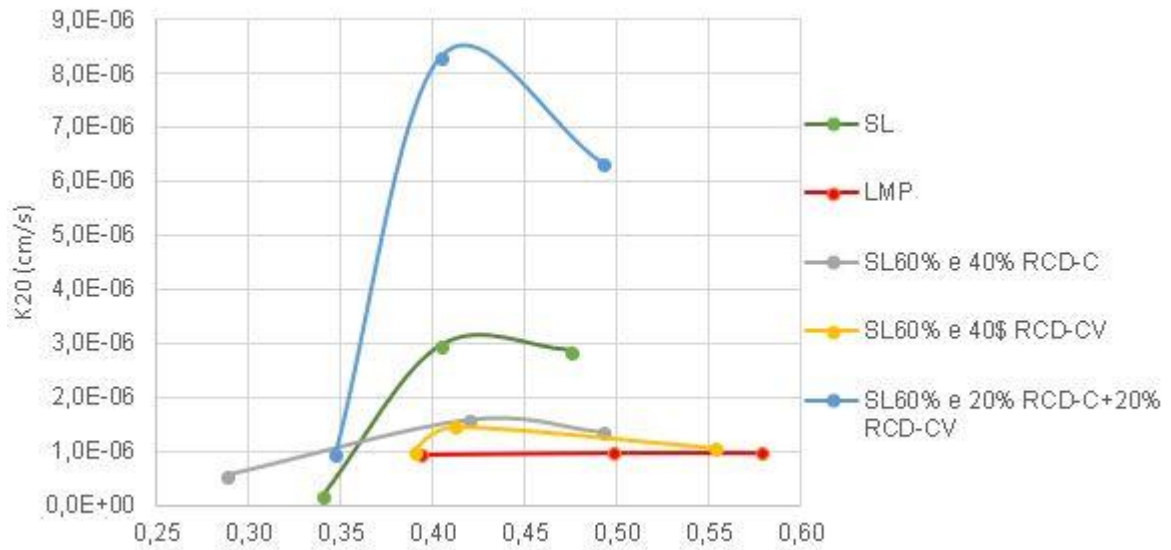
No trabalho de Soares (2012), foi utilizado um solo saprolítico de filito compactado no ponto ótimo e energia normal e atingiu uma permeabilidade de 5×10^{-8} m/s para revestimento de fundo, também foi constatado que a energia modificada não diminuiu a permeabilidade significativamente. Neste trabalho o aumento para energia modificada trouxe auxílio para atender a norma.

Na pesquisa Vinayagamoorthy et al. (2015) analisou em *liners* minerais submetidos a ensaios de permeabilidade normal e a permeabilidade acelerada, levando em consideração a análise em escala real, para tal houve uma melhora na permeabilidade (redução), pois o ensaio de forma acelerada traz redução de espaços na parte estrutural do forro.

Outro estudo realizado sobre a resultado da permeabilidade apenas de RCD-R (resíduo de construção e demolição reciclado), ou seja, solos arenosos consistiu que com o aumento do grau de compactação e redução no índice de vazios do RCD-R, há uma diminuição nos valores dos coeficientes de permeabilidade chegando no máximo $1,835 \times 10^{-4}$ cm/s, para essa análise foi utilizado o permeômetro de carga constate. (ROSA E SANTOS, 2016).

A partir dos resultados encontrados no ensaio de compactação e permeabilidade é possível fazer uma relação de índice de vazios e coeficiente de permeabilidade. O gráfico a seguir demonstra a relação descrita.

Figura 25 – Índice de Vazios (e) x Coeficiente de Permeabilidade (k)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste gráfico percebe-se que a medida que o índice de vazios diminui o coeficiente de permeabilidade também diminui. Os pontos com índice de vazios menores que 0,40 atenderam ou ficaram perto de atender o coeficiente de permeabilidade $k=10^{-7}$ cm/s. Também vale destacar que o LMP se manteve constante ao longo do gráfico, bem na linha aceitável para o *liner*. Por fim, considerando todos os parâmetros encontrados o melhor resultado ficou para o SL60% e 40% RCD-C, que obteve a menor permeabilidade e o menor índice de vazios, neste gráfico indicado no primeiro ponto em cinza.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação aos ensaios de caracterização de materiais:

- Os resultados dos ensaios de caracterização dos solos destaca-se alguns valores obtidos para os solos, os valores referem-se respectivamente para SL e LMP, como o peso específico natural de 17,13 kN/m³ e de 16,1 kN/m³, assim como para o peso específico real dos grãos de 26,36 kN/m³ e de 26,2 kN/m³, o índice de vazios de 0,78 e 0,93, assim como a porosidade de 43,85% e 48,26%;
- Os resultados dos ensaios de caracterização de materiais dos RCD, destaca-se alguns valores obtidos para os solos, os valores referem-se respectivamente para RCD-C e RCD-CV, como o peso específico 13,3 kN/m³ e de 11,6 kN/m³, assim como para o peso específico real dos grãos 26,65kN/m³ e de 26,51 kN/m³, o índice de vazios de 0,98 e 1,27, assim como a porosidade de 49,49% e 55,95%;
- O Limite de Liquidez do SL foi de 28%, para o LMP de 43%, o Limite de Plasticidade apresentou SL 20% e 28% para o LMP. No que se refere a classificação dos solos segundo HRB, este foi para o SL como solo argiloso de alta compressibilidade e o LMP como argila de alta compressibilidade e alta plasticidade. Já o Índice de plasticidade dos solos foi de 8% para o SL e 15% para o LMP.

Com relação aos ensaios de compactação do *liner* alternativo:

- Os teores encontrados no software de empacotamento foram de 60% SL + 40% RCD-CV, 60% SL+ 40% RCD-C, 60% SL + 20% RCD-CV + 20% RCD-C;
- O valor encontrado para a umidade ótima do SL com energia normal foi de 14% o peso específico aparente seco máximo de 17,9 kN/m³, para a energia intermediária foi de 12% e 18,8kN/m³, e para a energia modificada foi de 10% e 19,7 kN/m³;
- Para o LMP foi obtido para a umidade ótima da energia normal foi de 18% o peso específico aparente seco máximo de 16,6 kN/m³, para a energia intermediária foi de 17% e 17,5kN/m³, e para a energia modificada foi de 12% e 18, 8 kN/m³;

- No caso de 60% SL+40% RCD-C a umidade ótima da energia normal foi de 18,5%, o peso específico aparente seco máximo de 17,7 kN/m³, para a energia intermediária foi de 13% e 18,6kN/m³, e para a energia modificada foi de 9,5% e 20,5 kN/m³;
- O valor encontrado na composição 60% SL+ 40% RCD-CV foi encontrado para a umidade ótima da energia normal foi de 17,5% o peso específico aparente seco máximo de 17 kN/m³, para a energia intermediária foi de 11,5% e 18,7kN/m³, e para a energia modificada foi de 12,5% e 19 kN/m³;
- Quanto a composição 60% SL+20% RCD-CV 20% RCD-C foi obtido para a umidade ótima empregando a energia normal 13%, o peso específico aparente seco máximo de 17,7 kN/m³, para a energia intermediária foi de 12,5% e 18,8kN/m³, e para a energia modificada foi de 10% e 19,6 kN/m³.

Por fim, no ensaio de permeabilidade com as misturas de RCD ou somente solo, apenas as energias modificadas atenderam a exigência da norma de aterro sanitário com coeficiente de permeabilidade $k_{20}=10^{-7}$ cm/s. Portanto, apenas com esta energia de compactação seria viável tecnicamente a aplicação deste *liner* alternativo como camada de impermeabilização inferior em aterros sanitários.

Cabe contudo, uma discussão quanto a aplicação deste *liner* em outras etapas do aterro sanitário, como camadas de coberturas intermediárias e/ou finais. Nestes casos, a exigência de impermeabilização não é tão rigorosa, o que viabilizaria a utilização do *liner* estudado por esta pesquisa.

E, finalmente, ressalta-se que o *liner* mineral padrão, utilizado pela CRVR e avaliado nesta pesquisa como o *liner* referência, atendeu a todas as exigências de parâmetros físicos e de permeabilidade exigidos por norma.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para completar ainda mais outros trabalhos sugiro os seguintes estudos:

- Incorporar outros tipos de resíduos, como cinza de casca de arroz e cinza volante;
- Encontrar outras proporções de solo e RCD;
- Incorporar no solo local uso de argila bentonita em pequenas quantidades;
- Misturar uma fração de solo local e *liner* mineral padrão;
- Testar permeabilidade em câmara triaxial com confinamento variando as tensões conforme está no aterro sanitário (σ_1 e σ_3).
- Execução de ensaios ambientais para viabilidade do *liner*, tais como testes de lixiviação e solubilização.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Amanda Francieli de. **Avaliação de materiais argilosos da Formação Corumbataí para uso em liners compactados (CCL)**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.

ANDREASEN, AH Mn; ANDERSEN, J. Relation between grain size and interstitial space in products of unconsolidated granules. **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, n. 3, p. 217-228, 1930.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: versão corrigida. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: versão Corrigida. Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182**: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14545**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

BENSON, Craig H.; DANIEL, David E.; BOUTWELL, Gordon P. Field performance of compacted clay *liners*. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 5, p. 390-403, 1999.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. Oficina de Textos, 2008.

BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Manual de pavimentação. 3ed – Rio de Janeiro, 2006

CAETANO, Marcelo Oliveira. **Aplicação do reator de chicanas no tratamento de lixiviados de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos para remoção de nitrogênio amoniacal por “stripping**. (2009).

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações. In: **Mecânica dos solos e suas aplicações**. LTC, 2015.

CHRIST, Roberto. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. 2014

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM) – **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul** (2006). Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf> Acesso: 14/04/2018.

CONAMA-448/2012 - Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução 448/2012- Altera a Resolução 307/2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução no 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

COSTA, Carlos Henrique Rinck da. **Estudo de mistura solo-carvão ativado como barreira reativa no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos**. 2006.

DANIEL, David E.; BENSON, Craig H. Water content-density criteria for compacted soil *liners*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1811-1830, 1990.

DANIEL, David Edwin (Ed.). **Geotechnical practice for waste disposal**. Springer Science & Business Media, 1993.

DAY, Steven R.; DANIEL, David E. Hydraulic conductivity of two prototype clay *liners*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 111, n. 8, p. 957-970, 1985.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Rio de Janeiro. Manual de pavimentação. 2006.

DOS SANTOS ORTEGA, Fernando et al. Influência dos Modelos de Alfred e de Andreasen Sobre a Microestrutura e Densidade a Verde de Compactos Cerâmicos Obtidos por Colagem ou Prensagem (The Influence of Alfred and Andreasen Models on the Microstructure and Green Density of Ceramic Compacts Obtained by Slip Casting and Dry Pressing). **Cerâmica**, v. 43, n. 283-284, p. 183, 1997.

FOLKES, David J. Fifth Canadian Geotechnical Colloquium: Control of contaminant migration by the use of *liners*. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 19, n. 3, p. 320-344, 1982.

FUNK, James E.; DINGER, Dennis. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing**. Springer Science & Business Media, 1994.

FURNAS, C. C. Grading aggregates-I.-Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 23, n. 9, p. 1052-1058, 1931.

Gomes; Martins. Capítulo 3: Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos Urbanos para municípios de Pequeno Porte. In: CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades**. (2003).

HE, D.; EKERE, N. N.; CAI, L. Computer simulation of random packing of unequal particles. **Physical review E**, v. 60, n. 6, p. 7098, 1999.

HENDRIKS, Ch F.; JANSSEN, G. M. T. Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions. **Heron**, v. 46, n. 2, p. 109-117, 2001.

JOHN, Vanderley M., and Vahan Agopyan. "Reciclagem de resíduos da construção. **Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos**, (2000).

JUCÁ, José Fernando Thomé. Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL-REGEO**. 2003. p. 2003.

KONARZEWSKI, Vitor Hugo Cordeiro. **Tratamento combinado de lixiviados de aterro sanitário e drenagem ácida de minas**. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2009

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese Doutorado– Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo, 2001. 208 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 204f. Diss. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LUKIANCHUKI, Juliana Azoia. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MASSAD, Façal. **Mecânica dos solos experimental**. Oficina de Textos, 2016.

MITCHELL, James Kenneth; HOOPER, Don R.; CAMPANELLA, Richard G. Permeability of compacted clay. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Div**, v. 92, n. SM5, Proc Paper 490, 1966.

MOURA, Maria José; FIGUEIREDO, Maria Margarida. Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de E. globulus. **Silva Lusitana**, v. 10, n. 2, p. 207-216, 2002.

NOGUEIRA, Joao Baptista et al. **Mecânica dos solos: ensaios de laboratório**. EESC -USP.2005.

PIETERSEN, H. S., and A. L. A. Fraay. "Performance of concrete with recycled aggregates. **Materials and technologies for sustainable construction–cib world building congress**. 1998.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PRIM; Oliveira, Castilhos Junior. Apêndice 2: Transportes de Contaminantes. In: CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades**. (2003).

PROCTOR, Ralph R. Fundamental principles of soil compaction. **Engineering News Record**, v. 111, n. 9, p. 245-248, 1933.

ROSA, Isabelle de Lima; DOS SANTOS, Eder Carlos Guedes. Fatores de Influência na Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). **Anais cobramseg**, 2016.

SILVEIRA, Geraldo Tadeu Rezende. **Metodologia de caracterização dos resíduos sólidos como base para uma gestão ambiental: Estudo de caso: entulhos da construção civil em Campinas**, São Paulo. (1993).

SOARES, Valéria. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SONAWANE, Tushar R., and Sunil S. Pimplikar. Use of recycled aggregate in concrete. **International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)** (2013): 1-9.

SOUTO, G. D. B.; POVINELLI, Jurandyr. Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil. In: **Annals of the 24th Brazilian Congress of Sanitary and Environmental Engineering**, Belo Horizonte, MG, Brazil. 2007. p. 2-7.

TAYLOR, D. **Fundamentals of Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948.

TORGAL, Fernando Pacheco; SAID, Jalali. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. 2010.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. Mc Graw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

VASUDEVAN, Gunalaan. Study on the Demolition Waste Management in Malaysia Construction Industry. **International Journal of Scientific Engineering and Technology (ISSN: 2277-1581) Volume**, n. 4, p. 131-135, 2015.

VILLIBOR, Douglas Fadul. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. EESC-STT, 1982.

VINAYAGAMOORTHY, Sivakumar et al. Influence of testing on permeability of compacted fine soils. **Geotechnical Engineering**, v. 168, n. GE5, p. 422-438, 2015.

ZANTA; Ferreira. Capítulo 1: Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de. Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades. (2003).

ZORDAN, S. E. **A Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

APÊNDICE A – SEDIMENTAÇÃO

Tabela 10 – Peneiramento Solo Local

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL				
Peneira	Amostra Úmida (W): 70g	Amostra Seca (Ws):69,08g		
nº	Mm	Material Retido (g)	Material Retido Acumulado (g)	Material Passado (%)
16	1,2	0,06	0,06	99,91
30	0,6	0,09	0,15	99,78
40	0,42	0,58	0,73	98,93
60	0,25	1,83	2,56	96,25
100	0,15	12,11	14,67	78,48
200	0,075	18,14	32,81	51,88

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 – Sedimentação Solo Local

Data	Hora	Δt	Temp. (°C)	Leitura (L)	Diâmetro dos Grãos (mm)	Q = % da Amostra Total
22/jan	09:04	0,5 min	25,2	1,0165	0,0802	33,11
22/jan	09:05	1 min	25,2	1,0150	0,0567	29,61
22/jan	09:06	2 min	25,2	1,0135	0,0401	26,12
22/jan	09:08	4 min	25,2	1,0130	0,0277	24,96
22/jan	09:12	8 min	24,8	1,0125	0,0197	23,62
22/jan	09:19	15 min	25,4	1,0120	0,0143	22,72
22/jan	09:34	30 min	24	1,0115	0,0102	20,96
22/jan	10:04	1 h	23	1,0105	0,0073	18,23
22/jan	11:04	2 h	22,9	1,0080	0,0052	12,36
22/jan	13:04	4 h	21,9	1,0070	0,0037	9,65
22/jan	17:04	8 h	21,8	1,0060	0,0026	7,28
23/jan	09:04	24 h	21,6	1,0050	0,0015	4,88

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Peneiramento *Liner* Mineral Padrão

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL				
		Amostra Parcial Seca		
Peneira		Amostra Úmida (W): 70g	(Ws):66,98g	
nº	mm	Material Retido (g)	Material Retido Acumulado (g)	Material Passado (%)
16	1,2	0,07	0,07	99,89
30	0,6	1,45	1,52	97,63
40	0,42	1,62	3,14	95,11
60	0,25	3,68	6,82	89,38
100	0,15	9,97	16,79	73,85
200	0,075	13,71	30,5	52,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 13 – Sedimentação *Liner* Mineral Padrão

Data	Hora	Δt	Temp. (°C)	Leitura (L)	Diâmetro dos Grãos (mm)	Q = % da Amostra Total
22/jan	09:25	0,5 min	23,8	1,0190	0,0819	39,69
22/jan	09:26	1 min	23,8	1,0185	0,0579	38,49
22/jan	09:27	2 min	23,8	1,0175	0,0409	36,07
22/jan	09:29	4 min	23,8	1,0175	0,0283	36,07
22/jan	09:33	8 min	23,6	1,0170	0,0200	34,79
22/jan	09:40	15 min	23,6	1,0170	0,0146	34,79
22/jan	09:55	30 min	23,6	1,0170	0,0103	34,79
22/jan	10:25	1 h	23,5	1,0165	0,0073	33,54
22/jan	11:25	2 h	22,6	1,0160	0,0052	31,96
22/jan	13:25	4 h	21,9	1,0155	0,0037	30,48
22/jan	17:25	8 h	21,7	1,0150	0,0026	29,20
23/jan	09:25	24 h	21,4	1,0110	0,0015	19,44

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 – Peneiramento resíduo beneficiado RCD-C

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL				
		Amostra Parcial Seca (Ws):118,26g		
Peneira	Amostra Úmida (W): 120g			
nº	mm	Material Retido (g)	Material Retido Acumulado (g)	Material Passado (%)
16	1,2	22,27	22,27	80,90
30	0,6	36,96	59,23	49,19
40	0,42	9,49	68,72	41,05
60	0,25	16,06	84,78	27,27
100	0,15	17,47	102,25	12,29
200	0,075	3,68	105,93	9,13

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Sedimentação resíduo beneficiado RCD-C

Data	Hora	Δt	Temp. (°C)	Leitura (L)	Diâmetro dos Grãos (mm)	Q = % da Amostra Total
22/jan	08:27	0,5 min	26	1,0085	0,0788	8,61
22/jan	08:28	1 min	26	1,0080	0,0558	7,93
22/jan	08:29	2 min	26	1,0075	0,0394	7,26
22/jan	08:31	4 min	25,6	1,0070	0,0273	6,48
22/jan	08:35	8 min	25,4	1,0065	0,0194	5,75
22/jan	08:42	15 min	25,4	1,0060	0,0141	5,08
22/jan	08:57	30 min	24,8	1,0055	0,0101	4,25
22/jan	09:27	1 h	24,1	1,0050	0,0072	3,40
22/jan	10:27	2 h	22,8	1,0045	0,0051	2,42
22/jan	12:27	4 h	21,6	1,0040	0,0037	1,48
22/jan	16:27	8 h	21,9	1,0040	0,0026	1,54
23/jan	08:27	24 h	21,8	1,0035	0,0015	0,85

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Peneiramento resíduo beneficiado RCD-CV

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL				
		Amostra Parcial Seca (Ws):118,26g		
Peneira		Amostra Úmida (W): 120g		
nº	mm	Material Retido (g)	Material Retido Acumulado (g)	Material Passado (%)
16	1,2	14,45	14,45	87,68
30	0,6	27,75	42,2	64,03
40	0,42	11,8	54	53,98
60	0,25	25,76	79,76	32,02
100	0,15	16,88	96,64	17,63
200	0,075	6,35	102,99	12,22

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 17 – Sedimentação resíduo beneficiado RCD-CV

Data	Hora	Δt	Temp. (°C)	Leitura (L)	Diâmetro dos Grãos (mm)	Q = % da Amostra Total
22/jan	08:43	0,5 min	25	1,0115	0,0801	12,41
22/jan	08:44	1 min	25	1,0105	0,0566	11,05
22/jan	08:45	2 min	25	1,0095	0,0400	9,70
22/jan	08:49	4 min	24,3	1,0085	0,0278	8,18
22/jan	08:53	8 min	24,5	1,0075	0,0196	6,88
22/jan	08:58	15 min	23,9	1,0065	0,0144	5,38
22/jan	09:23	30 min	23,9	1,0060	0,0102	4,71
22/jan	09:43	1 h	22,7	1,0055	0,0073	3,75
22/jan	10:43	2 h	22,5	1,0050	0,0052	3,03
22/jan	12:43	4 h	21,9	1,0045	0,0037	2,22
22/jan	16:43	8 h	21,6	1,0045	0,0026	2,15
23/jan	08:43	24 h	21,6	1,0045	0,0015	2,15

Fonte: Elaborada pelo autor.

APENDICE B –COMPACTAÇÃO

A energia de compactação é dada por:

$$EC = \frac{MgNnH}{V}$$

Onde:

Ec	Energia de compactação	kJ/m ³
M	Massa soquete	kg
H	Altura de queda soquete	m
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
N	Número de golpes/camada	
n	Número de camadas	
V	Volume do cilindro de compactação	m ³
EN	Energia normal	kJ/m ³
EI	Energia intermediária	kJ/m ³
EM	Energia modificada	kJ/m ³
NN	Número de golpes normal	
NI	Número de golpes intermediária	
NM	Número de golpes modificada	

Conversão da energia de compactação Proctor – Marshall

EN	$2,5\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot 26 \cdot 3 \cdot 0,3\text{m} / 1\text{m}^3$	573,89 kJ/m ³
EI	$4,5\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot 21 \cdot 3 \cdot 0,45\text{m} / 1\text{m}^3$	1251,51 kJ/m ³
EM	$4,5\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot 27 \cdot 5 \cdot 0,45\text{m} / 1\text{m}^3$	2681,81 kJ/m ³
	isolando o N e fixando a energia temos	
NN		6 golpes
NI		13 golpes
NM		29 golpes

Energia Modificada Solo Local						
Umidade Higroscópica						
		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	7	106	263	91	198
W + Cápsula	265,33	25,04	26,44	24,22	29,44	28,3
Ws + Cápsula	263,2	23,68	24,95	22,71	27,29	26,04
Peso Cápsula	183,67	7,07	7,58	7,23	8,05	7,61
Água	2,13	1,36	1,49	1,51	2,15	2,26
Ws	79,53	16,61	17,37	15,48	19,24	18,43
Umidade	2,68	8,19	8,58	9,75	11,17	12,26
		1	2	3	4	5
Número do Ponto						
Peso Amostra e Molde (g)		6525,00	6565,00	6660,00	6660,00	6655,00
Peso Molde (g)						
)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		2035,00	2075,00	2170,00	2170,00	2165,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		2,038	2,078	2,174	2,174	2,169
Peso Específico Seco (yd)		18,84	19,14	19,80	19,55	19,32

Energia Intermediária Solo Local							
Umidade Higroscópica							
		1	2	3	4	5	6
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	75	7	86	192	124	164
W + Cápsula	265,33	28,34	27,12	29,10	28,17	31,85	29,7
Ws + Cápsula	263,2	27,16	25,61	27,19	25,91	29,04	26,71
Peso Cápsula	183,67	8,85	7,09	8,22	7,58	8,34	8,2
Água	2,13	1,18	1,51	1,91	2,26	2,81	2,99
Ws	79,53	18,31	18,52	18,97	18,33	20,70	18,51
Umidade	2,68	6,44	8,15	10,07	12,33	13,57	16,15
		1	2	3	4	5	6
Número do Ponto							
Peso Amostra e Molde (g)		6345,00	6400,00	6535,00	6595,00	6590,00	6454,00
Peso Molde (g)							
)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1855,00	1910,00	2045,00	2105,00	2100,00	1964,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,858	1,913	2,048	2,108	2,103	1,967
Peso Específico Seco (yd)		17,456	17,689	18,610	18,770	18,521	16,937

Energia Normal Solo Local

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5	6	7
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	1	80	173	288	358	239	115
W + Cápsula	265,33	24,65	28,88	29,73	24,11	26,58	32,43	32,45
Ws + Cápsula	263,2	23,50	27,24	27,81	22,19	24,32	29,05	28,77
Peso Cápsula	183,67	6,99	7,89	8,49	6,21	8,11	7,6	8,4
Água	2,13	1,15	1,64	1,92	1,92	2,26	3,38	3,68
Ws	79,53	16,51	19,35	19,32	15,98	16,21	21,45	20,37
Umidade	2,68	6,97	8,48	9,94	12,02	13,94	15,76	18,07
Número do Ponto								
		1	2	3	4	5	6	
Peso Amostra e Molde (g)		6270,00	6330,00	6390,00	6475,00	6525,00	6520,00	6490,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1780,00	1840,00	1900,00	1985,00	2035,00	2030,00	2000,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,783	1,843	1,903	1,988	2,038	2,033	2,003
Peso Específico Seco (yd)		16,67	16,99	17,31	17,75	17,89	17,57	16,97

Energia Modificada *Liner* Mineral

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	7	91	106	198	328
W + Cápsula	265,33	22,39	28,10	32,22	27,39	35,12
Ws + Cápsula	263,2	21,78	26,75	29,63	24,68	30,67
Peso Cápsula	183,67	7,07	8,05	7,58	7,61	7,31
Água	2,13	0,61	1,35	2,59	2,71	4,45
Ws	79,53	14,71	18,70	22,05	17,07	23,36
Umidade	2,68	4,147	7,219	11,746	15,876	19,050
Número do Ponto						
		1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)		6200,00	6310,00	6590,00	6575,00	6465,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1710,00	1820,00	2100,00	2085,00	1975,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,713	1,823	2,103	2,088	1,978
Peso Específico Seco (yd)		16,446	17,003	18,824	18,023	16,617

Energia Intermediária *Liner* Mineral

Umidade Higroscópica

		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	115	124	239	4	288
W + Cápsula	242,25	26,15	25,93	25,12	22,25	20,66
Ws + Cápsula	240,2	24,20	23,65	22,59	19,95	18,22
Peso Cápsula	182,95	8,41	8,33	7,59	7,12	6,2
Água	2,05	1,95	2,28	2,53	2,30	2,44
Ws	57,25	15,79	15,32	15,00	12,83	12,02
Umidade	3,58	12,350	14,883	16,867	17,927	20,300
Número do Ponto						
		1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)		6180,00	6380,00	6520,00	6505,00	6445,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1690,00	1890,00	2030,00	2015,00	1955,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,693	1,893	2,033	2,018	1,958
Peso Específico Seco (yd)		15,067	16,479	17,399	17,115	16,278

Energia Normal *Liner* Mineral

Umidade Higroscópica

		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	16	2	269	360	344
W + Cápsula	265,33	25,09	21,92	21,32	24,78	25,47
Ws + Cápsula	263,2	23,36	19,92	18,92	21,75	22,15
Peso Cápsula	183,67	7,02	6,91	5,89	6,67	6,62
Água	2,13	1,73	2,00	2,40	3,03	3,32
Ws	79,53	16,34	13,01	13,03	15,08	15,53
Umidade	2,68	10,59	15,37	18,42	20,09	21,38
Número do Ponto						
		1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)		5990,00	6245,00	6450,00	6410,00	6395,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1500,00	1755,00	1960,00	1920,00	1905,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,502	1,758	1,963	1,923	1,908
Peso Específico Seco (yd)		13,59	15,24	16,58	16,01	15,72

Energia Modificada 60% SL+40%RCD-C

Umidade Higroscópica

		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	7	91	106	198	328
W + Cápsula	265,33	20,82	26,21	22,53	25,69	32,01
Ws + Cápsula	263,2	20,18	24,95	21,20	23,54	28,7
Peso Cápsula	183,67	7,07	8,05	7,58	7,61	7,31
Água	2,13	0,64	1,26	1,33	2,15	3,31
Ws	79,53	13,11	16,90	13,62	15,93	21,39
Umidade	2,68	4,882	7,456	9,765	13,497	15,475

Número do Ponto	1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)	6475,00	6620,00	6730,00	6655,00	6600,00
Peso Molde (g)	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)	1985,00	2130,00	2240,00	2165,00	2110,00
Volume do Molde (cm ³)	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)	1,988	2,134	2,244	2,169	2,113
Peso Específico Seco (yd)	18,957	19,855	20,441	19,107	18,303

Energia intermediária 60% SL+40%RCD-C

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5	6
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	106	328	198	91	263	7
W + Cápsula	265,33	31,35	25,64	30,63	33,18	28,92	36,3
Ws + Cápsula	263,2	29,72	24,16	28,26	30,29	26,15	32,09
Peso Cápsula	183,67	7,60	7,32	7,62	8,04	7,24	7,13
Água	2,13	1,63	1,48	2,37	2,89	2,77	4,21
Ws	79,53	22,12	16,84	20,64	22,25	18,91	24,96
Umidade	2,68	7,369	8,789	11,483	12,989	14,648	16,867
Número do Ponto		1	2	3	4	5	6
Peso Amostra e Molde (g)		6360,00	6490,00	6565,00	6590,00	6540,00	6495,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4491,00
Peso Solo Compactado (g)		1870,00	2000,00	2075,00	2100,00	2050,00	2004,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	999,35
Peso Específico Úmido (y)		1,873	2,003	2,078	2,103	2,053	2,005
Peso Específico Seco (yd)		17,445	18,415	18,644	18,617	17,910	17,159

Energia Normal 60% SL+40%RCD-C

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	120	232	319	327	354
W + Cápsula	265,33	24,53	25,46	26,79	28,90	25,47
Ws + Cápsula	263,2	22,66	23,27	24,09	25,53	22,15
Peso Cápsula	183,67	7,22	7,36	6,65	7,36	7,98
Água	2,13	1,87	2,19	2,70	3,37	3,32
Ws	79,53	15,44	15,91	17,44	18,17	14,17
Umidade	2,68	12,111	13,765	15,482	18,547	23,430
Número do Ponto		1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)		6340,00	6475,00	6525,00	6445,00	6395,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1850,00	1985,00	2035,00	1955,00	1905,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,853	1,988	2,038	1,958	1,908
Peso Específico Seco (yd)		16,529	17,477	17,651	16,519	15,459

Energia Modificada 60%SL+40%RCD-CV

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5	6
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	138	220	72	7	4	214
W + Cápsula	265,33	32,69	25,60	22,03	26,99	26,14	27,92
Ws + Cápsula	263,2	31,40	24,27	20,90	24,81	23,74	24,92
Peso Cápsula	183,67	8,73	7,13	8,90	7,11	7,12	6,79
Água	2,13	1,29	1,33	1,13	2,18	2,40	3,00
Ws	79,53	22,67	17,14	12,00	17,70	16,62	18,13
Umidade	2,68	5,690	7,760	9,417	12,316	14,440	16,547
Número do Ponto		1	2	3	4	5	6
Peso Amostra e Molde (g)		6380,00	6485,00	6535,00	6660,00	6605,00	6555,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4491,00
Peso Solo Compactado (g)		1890,00	1995,00	2045,00	2170,00	2115,00	2064,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	999,35
Peso Específico Úmido (y)		1,893	1,998	2,048	2,174	2,118	2,065
Peso Específico Seco (yd)		17,912	18,544	18,721	19,352	18,512	17,721

Energia Intermediária 60%SL+40%RCD-CV

Umidade Higroscópica		Umidade de Moldagem					
		1	2	3	4	5	6
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	4	72	7	220	133	263
W + Cápsula	265,33	25,59	30,09	22,15	24,96	35,6	25,23
Ws + Cápsula	263,2	24,20	28,16	20,65	22,85	31,92	22,56
Peso Cápsula	183,67	7,06	8,84	7,13	7,10	8,68	7,22
Água	2,13	1,39	1,93	1,50	2,11	3,68	2,67
Ws	79,53	17,14	19,32	13,52	15,75	23,24	15,34
Umidade	2,68	8,110	9,990	11,095	13,397	15,835	17,405
Número do Ponto		1	2	3	4	5	6
Peso Amostra e Molde (g)		6360,00	6490,00	6565,00	6590,00	6540,00	6495,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4491,00
Peso Solo Compactado (g)		1870,00	2000,00	2075,00	2100,00	2050,00	2004,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	999,35
Peso Específico Úmido (y)		1,873	2,003	2,078	2,103	2,053	2,005
Peso Específico Seco (yd)		17,326	18,214	18,709	18,550	17,727	17,080

Energia Normal 60%SL+40%RCD-CV

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	7	138	4	72	31
W + Cápsula	265,33	23,27	26,05	25,72	30,51	25,82
Ws + Cápsula	263,2	21,84	24,21	23,24	27,21	22,25
Peso Cápsula	183,67	7,12	8,73	7,12	8,9	7,01
Água	2,13	1,43	1,84	2,48	3,30	3,57
Ws	79,53	14,72	15,48	16,12	18,31	15,24
Umidade	2,68	9,715	11,886	15,385	18,023	23,425

Número do Ponto	1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)	6240,00	6340,00	6430,00	6490,00	6465,00
Peso Molde (g)	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)	1750,00	1850,00	1940,00	2000,00	1975,00
Volume do Molde (cm ³)	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)	1,753	1,853	1,943	2,003	1,978
Peso Específico Seco (yd)	15,977	16,562	16,841	16,974	16,028

Energia Modificada 60%SL+20%RCD-CV+20%RCD-C

Umidade Higroscópica		Umidade de Moldagem				
		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	325	6	149	150	349
W + Cápsula	265,33	24,36	30,21	27,43	39,59	26,94
Ws + Cápsula	263,2	23,34	28,38	25,59	36,23	24,36
Peso Cápsula	183,67	6,20	7,29	7,99	8,66	6,73
Água	2,13	1,02	1,83	1,84	3,36	2,58
Ws	79,53	17,14	21,09	17,60	27,57	17,63
Umidade	2,68	5,951	8,677	10,455	12,187	14,634

		1	2	3	4	5
Número do Ponto		1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)		6450,00	6570,00	6650,00	6650,00	6605,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1960,00	2080,00	2160,00	2160,00	2115,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,963	2,083	2,164	2,164	2,118
Peso Específico Seco (yd)		18,530	19,171	19,588	19,285	18,480

Energia intermediária 60%SL+20%RCD-CV+20%RCD-C

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	4	72	7	220	133
W + Cápsula	265,33	24,11	28,01	29,70	24,44	26,3
Ws + Cápsula	263,2	22,82	26,16	27,38	22,07	23,7
Peso Cápsula	183,67	7,25	7,95	8,64	6,11	6,68
Água	2,13	1,29	1,85	2,32	2,37	2,60
Ws	79,53	15,57	18,21	18,74	15,96	17,02
Umidade	2,68	8,285	10,159	12,380	14,850	15,276

		1	2	3	4	5
Número do Ponto		1	2	3	4	5
Peso Amostra e Molde (g)		6420,00	6520,00	6600,00	6575,00	6525,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1930,00	2030,00	2110,00	2085,00	2035,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (y)		1,933	2,033	2,113	2,088	2,038
Peso Específico Seco (yd)		17,853	18,458	18,807	18,184	17,682

Energia Normal 60%SL+20%RCD-CV+20%RCD-C

Umidade Higroscópica		1	2	3	4	5	6
N° Cápsula	FRIGIDEIRA	91	198	263	106	328	7
W + Cápsula	265,33	31,88	27,67	26,04	33,75	30,51	33,53
Ws + Cápsula	263,2	29,77	25,42	23,86	30,26	27,02	29,1
Peso Cápsula	183,67	8,06	7,61	7,24	7,60	7,31	7,08
Água	2,13	2,11	2,25	2,18	3,49	3,49	4,43
Ws	79,53	21,71	17,81	16,62	22,66	19,71	22,02
Umidade	2,68	9,72	12,63	13,12	15,40	17,71	20,12
Número do Ponto		1	2	3	4	5	6
Peso Amostra e Molde (g)		6295,00	6405,00	6475,00	6510,00	6505,00	6495,00
Peso Molde (g)		4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00	4490,00
Peso Solo Compactado (g)		1805,00	1915,00	1985,00	2020,00	2015,00	2005,00
Volume do Molde (cm ³)		998,35	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso Específico Úmido (γ)		1,808	1,918	1,988	2,023	2,018	2,008
Peso Específico Seco (γ _d)		16,48	17,03	17,58	17,53	17,15	16,72

Energia Normal - Solo Local 60% e 20% RCD-CV e 20% RCD-C

Bureta 3		Hora de leitura	Tempo (t) s	Leitura da bureta	Altura inicial (h0) cm	Altura final (h1) cm	Temp. °C	Coefficiente de Correção (Ck)	Coefficiente de Permeabilidade k20 (cm/s)
Diâmetro (cm)	1	10min	600	8,40	152,20	143,80	21,90	0,945	7,1054E-06
Área (cm ²)	0,78	a	10min	600	8,00	152,20	144,20	21,90	6,7577E-06
Corpo de prova		10min	600	7,70	152,20	144,50	21,90	0,945	6,4976E-06
Comprimento (cm)	8	L	10min	600	7,60	152,20	144,60	21,90	6,4110E-06
Área (cm ²)	78,54	A	10min	600	7,50	152,20	144,70	21,90	6,3245E-06
Peso (g)	1210		10min	600	7,50	152,20	144,70	21,90	6,3245E-06
Massa Seca	1061,4	g	10min	600	7,50	152,20	144,70	21,90	6,3245E-06
γ_d	1,68927	g/cm ³						kmedio	6,35E-06
ei	0,55096								

Energia Intermediária - Solo Local 60% e 20% RCD-CV e 20% RCD-C

Bureta		Hora de leitura	Tempo (t) s	Leitura da bureta	Altura inicial (h0) cm	Altura final (h1) cm	Temp. °C	Coefficiente de Correção (Ck)	Coefficiente de Permeabilidade k20 (cm/s)
Diâmetro (cm)	1	10min	600	8,90	152,20	143,30	24,5	0,932	7,4376E-06
Área (cm ²)	0,78	a	10min	600	9,90	152,20	142,30	24,5	8,3020E-06
Corpo de prova		10min	600	9,90	152,20	142,30	24,5	0,932	8,3020E-06
Comprimento (cm)	8	L	10min	600	9,90	152,20	142,30	24,5	8,3020E-06
Área (cm ²)	78,54	A	10min	600	9,90	152,20	142,30	24,5	8,3020E-06
Peso (g)	1255		10min	600	9,90	152,20	142,30	24,5	8,3020E-06
Massa Seca	1115,56	g	10min	600	9,90	152,20	142,30	24,5	8,3020E-06
γ_d	1,77546	g/cm ³						kmedio	8,30E-06
ei	0,47568								

Energia Modificada - Solo Local 60% e 20% RCD-CV e 20% RCD-C

Bureta		Hora de leitura	Tempo (t) s	Leitura da bureta	Altura inicial (h0) cm	Altura final (h1) cm	Temp. °C	Coefficiente de Correção (Ck)	Coefficiente de Permeabilidade k20 (cm/s)
Diâmetro (cm)	1	10min	600	2,00	152,20	150,20	21,00	0,975	1,7081E-06
Área (cm ²)	0,78	a	10min	600	1,60	152,20	150,60	21,00	1,3647E-06
Corpo de prova		10min	600	1,50	152,20	150,70	21,00	0,975	1,2789E-06
Comprimento (cm)	8	L	10min	600	1,30	152,20	150,90	21,00	1,1077E-06
Área (cm ²)	78,54	A	10min	600	1,10	152,20	151,10	21,00	9,3665E-07
Peso (g)	1290		10min	600	1,10	152,20	151,10	21,00	9,3665E-07
Massa Seca	1167,42	g	10min	600	1,10	152,20	151,10	21,00	9,3665E-07
γ_d	1,858	g/cm ³						kmedio	9,37E-07
ei	0,41012								