



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE BARREIRA CAPILAR COM RCD
COMO CAMADA DE BLOQUEIO PARA COBERTURAS FINAIS DE
ARSU**

THAYS CAR FELICIANO DE OLIVEIRA

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2019



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE BARREIRA CAPILAR COM RCD COMO CAMADA DE BLOQUEIO PARA COBERTURAS FINAIS DE ARSU

THAYS CAR FELICIANO DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Me. Julio César Bizarreta Ortega

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2019

Dedico este trabalho:

Ao meu pai, Volnei †, minha estrela fonte de inspiração diária.

E à minha mãe, Marilene, meu grande exemplo.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pelo amor e suporte de todos os dias, por toda a educação e exemplos que me tornaram quem sou hoje. Por acreditar em mim e me incentivar a ser melhor sempre e jamais deixar que eu desistisse diante dos obstáculos. Agradeço também aos demais familiares, em especial à tia Maria, Gabi e Juh pelas boas energias para minhas conquistas.

Aos diversos amigos que contribuíram de alguma maneira com a execução deste trabalho ou os que estiveram presentes durante a graduação. Cito alguns: Erik, Rolando e Andrés que me auxiliaram com a coleta e transporte do material utilizado na pesquisa e com algumas etapas dos experimentos; prof.^a Gisèle que cedeu algumas aulas para realizarmos experimentos em conjunto com a turma de Mec. Solos I; Bertha, Deborah, Samanta e Sarita por tornarem a graduação mais divertida; Aída, Camila, Itzi e Klaudia, minha família do intercâmbio, que deixaram os dias tão alegres e me proporcionaram um crescimento pessoal enorme; Emerson, pelo carinho, incentivo e inspiração de sempre.

À Bia, que esteve presente em praticamente todas as etapas deste trabalho, não medi esforços para me ajudar no laboratório e me impulsionou em toda a trajetória. Muito mais que isso, agradeço às “DIVAS SA” (Bia, Isa e Re) pelas conversas e dicas para escrita do trabalho e, mais importante, a amizade desde o início da graduação. Vocês me ensinaram o verdadeiro sentido de trabalho em equipe e como isso nos dá mais força e nos leva mais longe.

Aos técnicos dos laboratórios da UNILA: Dalila, Paula, Luciano, Eleandro e Andrey, pela disposição e paciência em todos os momentos. Também aos técnicos Nilo e Maurício do laboratório de tecnologia do concreto de Itaipu (LTCl), que auxiliaram com as atividades da IC nos primeiros anos de graduação, o que também contribuiu para minha formação acadêmica.

Aos professores da UNILA que me acompanharam nesta jornada da graduação, pelos aprendizados (que vão além dos conteúdos didáticos), os quais possibilitaram a realização deste trabalho. Em especial à Prof.^a Edna Possan e ao Prof. Julio Bizarreta. À prof.^a Edna por ter me acolhido desde o primeiro semestre, compartilhado tantas experiências do universo científico e me incentivado constantemente para que eu

enfrentasse novos desafios. E, ao Prof. Julio, pela orientação, paciência e ensinamentos, por possibilitar meu contato inicial com a área da geotecnia.

Ao Geólogo Gerson Lorenzi, pela oportunidade de estágio no final da graduação e pela confiança e, com isso, me proporcionar inúmeros aprendizados, contribuindo tanto para meu crescimento profissional como pessoal.

À Prof.^a Marcia Helena Beck do IFPR, por todos estes anos (desde o curso técnico) de confiança e de incentivo em minha jornada acadêmica e por ter sido minha inspiração inicial para cursar engenharia civil.

Ao Eng.^o Eduardo Duarte, pelo fornecimento do material e informações pertinentes utilizados nesta pesquisa.

Por fim, à Deus, luz em todo o caminho.

À todos vocês meus mais sinceros agradecimentos! Todo o processo de realização deste trabalho e, mais, da minha formação acadêmica, me mostraram a importância dos laços que criamos com as pessoas para as conquistas.

RESUMO

O sistema de cobertura final de aterros é imprescindível para minimizar a percolação da água da chuva para os resíduos e, conseqüentemente, evitar a geração excessiva de lixiviados. No entanto, as técnicas e materiais convencionais deste sistema (por exemplo, coberturas monolíticas de solos de baixa permeabilidade) nem sempre são viáveis, motivo pelo qual buscam-se alternativas, em especial em climas tropicais e subtropicais, onde há maior incidência de chuvas. Em paralelo, identifica-se também nos meios urbanos a dificuldade de destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD). Uma alternativa para essas duas questões são as coberturas do tipo barreira capilar (BC), as quais possuem maior flexibilidade quanto aos materiais para compô-las. Neste contexto, no presente trabalho estudou-se a aplicação dos RCD como camada de bloqueio de cobertura do tipo (BC), em conjunto com o solo da região como camada capilar. Para tanto, os materiais foram caracterizados (quanto a propriedades físicas e hidráulicas) e foram realizados ensaios de coluna para verificar a influência do teor de finos do RCD no funcionamento da BC, bem como ensaios em modelo reduzido visando analisar a influência do teor de umidade inicial de compactação do RCD. Os resultados indicam que os materiais são compatíveis para aplicação conjunta em sistemas de barreira capilar (SBC), tendo em vista seu contraste granulométrico e sua diferença de capacidade de retenção de água. Nos testes de coluna observou-se uma relação inversa entre a porcentagem de finos e o funcionamento da BC. Os ensaios no modelo reduzido indicaram que o SBC com umidades iniciais de compactação do RCD de até 3,5% poderiam apresentar melhor desempenho que coberturas monolíticas e, cabe ainda ressaltar que para todas as umidades testadas foram obtidos resultados satisfatórios quanto à taxa de percolação do sistema para chuvas de até 90 mm (que representam eventos de ocorrência escassa, menor a 1%).

Palavras-chave: barreira capilar; camada de bloqueio; percolação; aterro sanitário; RCD; modelo reduzido.

ABSTRACT

The final cover of landfills is essential to minimize percolation of rain water into the residues mass and, therefore, avoid excessive generation of leachate. However, the conventional materials and techniques of this system (for example, monolithic covers of low permeability soils) are not always feasible, reason why new alternatives have been researched, especially in tropical and subtropical climates, where the rainfall incidence is higher. In parallel, in urban areas it is identified the difficulty for construction and demolition waste (CDW) destination. An alternative to these two questions is the capillary barrier (CB) cover system, which has greater flexibility in the composition of its materials. In this sense, the present work aims to study the use of (CDW) as the capillary block of CB in landfills final cover, combined with the local soil as capillary layer. Therefore, both materials were characterized (for physical and hydraulic properties) and column tests were performed to verify the influence of the CDW fines content on the operation of BC, as well as testes in a flume model to analyze the influence of the compaction initial moisture content of CDW. Results indicate that the materials are compatible for application in capillary barrier systems (CBS), because of their granulometric contrast and their difference in water retention capacity. In the column tests, an inverse relation was observed between the percentage of fines and the operation time of CB. Flume model analysis indicated that the CBS with RCD compaction initial moisture content up to 3,5% could present better performance than monolithic covers. For all the tested compaction initial moisture, satisfactory results were obtained regarding the percolation rate of the system for rains of up to 90 mm (representing events of scarce occurrence, less than 1%).

Keywords: capillary barrier; capillary block; percolation; landfill; CDW; flume model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de um sistema de cobertura final.....	17
Figura 2. Relação entre o potencial matricial e condutividade hidráulica para dois solos de diferentes texturas.	20
Figura 3. Exemplos de curvas características de diferentes tipos de solos.	21
Figura 4. Representação de barreira capilar.	23
Figura 5. Fluxograma da metodologia do trabalho.	28
Figura 6. Coleta dos materiais utilizados para o trabalho no ARSU de Foz do Iguaçu.	29
Figura 7. Coleta dos materiais utilizados para o trabalho no ARSU de Foz do Iguaçu.	29
Figura 8. Determinação da composição gravimétrica do RCD por separação tátil-visual.	30
Figura 9. Ensaio de determinação da massa específica dos grãos do solo e do RCD.	31
Figura 10. Ensaio de granulometria do RCD..	32
Figura 11. Ensaio de compactação.	32
Figura 12. Ensaio da curva característica..	34
Figura 13. Ensaio de permeabilidade.	34
Figura 14. Montagem do ensaio de coluna..	35
Figura 15. Ensaio de coluna e coleta de amostras..	36
Figura 16. Argila em torrões presente no RCD.....	37
Figura 17. Projeto do modelo reduzido.....	38
Figura 18. Montagem da caixa (modelo reduzido).	39
Figura 19. Montagem dos reforços em perfil metálico 30 mm para a caixa.	39
Figura 20. Término da montagem da caixa.	40
Figura 21. Drenos utilizados no modelo reduzido.....	41
Figura 22. Disposição dos drenos inferiores do modelo reduzido, proposta 1.	41
Figura 23. Disposição dos drenos inferiores do modelo reduzido, proposta 2.	42
Figura 24. Dreno lateral da camada de solo.....	42
Figura 25. Dreno <i>runoff</i>	42
Figura 26. Drenos de percolação lateral da camada capilar e <i>runoff</i>	43
Figura 27. Simulador de chuva.	44
Figura 28. Dispositivos compactadores. O peso dos compactadores (1,3 kg) mais elementos de incremento (2,4 kg) totalizou cerca de 3,7 kg.....	46
Figura 29. Esquema de cálculo dos volumes de chuva VEVr e VCDR.	48
Figura 30. Curvas granulométricas dos materiais estudados.	51
Figura 31. Curvas de compactação do solo e do RCD miúdo.	52

Figura 32. Curva de retenção dos materiais estudados.	54
Figura 33. Curvas que relacionam tempo e profundidade de percolação, para os diferentes ensaios de coluna.	55
Figura 34. Tempo de permanência do fluxo na BC e velocidades médias de percolação no solo e no RCD.	55
Figura 35. Curvas granulométricas dos RCD utilizados nos ensaios de coluna.	56
Figura 36. Esquema geral do ensaio no modelo reduzido.....	57
Figura 37. Avanço lateral do fluxo na camada capilar.	58
Figura 38. Porcentagem de contribuição dos drenos e de retenção em relação ao volume de chuva de entrada.....	62
Figura 39. Tempo (após início do ensaio) para chegada do fluxo ao redor do dreno A	64
Figura 40. Ensaio E1.....	65
Figura 41. Ensaio E2.....	66
Figura 42. Contribuição dos drenos de E3 (em relação ao evento total, de 121,37 mm).	66
Figura 43. Processos de umedecimento do solo.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados de precipitação no município de Foz do Iguaçu-PR de jan/1998 a dez/2018.....	45
Tabela 2. Ocorrência de precipitações fortes (acima de 50,1 mm) no município de Foz do Iguaçu-PR de jan/1998 a dez/2018.....	45
Tabela 3. Resultados do ensaio de gravimetria.....	50
Tabela 4. Resultados de massa específica dos grãos.....	50
Tabela 5. Distribuição granulométrica dos materiais conforme ABNT.....	51
Tabela 6. Parâmetros das curvas de compactação (sem reuso).....	52
Tabela 7. Coeficiente de permeabilidade dos materiais estudados (em cm/s).....	53
Tabela 8. Resultados dos ensaios de coluna.....	55
Tabela 9. Resultados dos ensaios do modelo reduzido.....	58
Tabela 10. Comparação entre parâmetros VEVR e VCDR da simulação de chuva....	61
Tabela 11. Resultados de volume coletado por cada dreno no modelo reduzido.....	62
Tabela 12. Resultados de eficiência do SBC.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Principais elementos de um aterro sanitário e suas funções.....	16
Quadro 2. Resumo das características dos materiais dos ensaios de coluna.....	36
Quadro 3. Resumo das características dos materiais dos ensaios do modelo reduzido.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	15
3.2 Aterros Sanitários.....	16
3.2.1 Elementos de um Aterro Sanitário	16
3.2.2 Cobertura Final de Aterros Sanitários	17
3.3 Fluxo de água em solos não saturados	18
3.3.1 Potencial total da água no solo	19
3.3.2 Curva de retenção (curva característica)	21
3.4 Barreiras Capilares.....	22
3.4.1 Barreiras capilares inclinadas	23
3.4.2 Barreiras capilares com material coesivo.....	24
3.4.3 Barreiras capilares em climas úmidos.....	25
3.5 Resíduos de Construção e Demolição	26
3.5.1 Panorama geral da gestão de RCD no Brasil e região de estudo	26
3.5.2 Utilização de RCD como material alternativo.....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Obtenção e preparo dos materiais.....	29
4.2 Caracterização dos materiais	30
4.3 Ensaio de coluna	35
4.4 Modelo reduzido.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Caracterização dos materiais	50
5.2 Ensaio de coluna	54
5.3 Modelo reduzido.....	57
5.3.1 Velocidades de percolação e tempo de permanência na BC	58
5.3.2 Capacidade de campo	60
5.3.3 Coleta dos drenos.....	61
5.3.4 Limitações experimentais.....	67
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O sistema de cobertura final de aterros de resíduos sólidos urbanos (ARSU) é de suma importância, principalmente considerando sua função de barreira física, isto é, de minimizar a infiltração de água de precipitação e sua percolação até os resíduos. O referido sistema influencia diretamente na geração de lixiviados, motivo pelo qual busca-se o uso de camadas com materiais tão impermeáveis quanto possível, tais como o solo argiloso compactado com baixa permeabilidade ($K_{sat} < 1E-7$ cm/s), convencionalmente aplicado (i.e., coberturas monolíticas). No entanto, a qualidade da compactação para que o solo atenda a este requisito envolve custos adicionais em equipamentos adequados e, além disso, é comum a manifestação de trincas de contração na camada de argila, diante de ciclos de molhagem e secagem naturais, afetando assim o bom desempenho do sistema de cobertura final (STARK et al., 2012).

Ademais, outro problema enfrentado em muitas regiões para a execução das coberturas finais de aterros do tipo monolíticas (somente solo compactado) é a indisponibilidade de jazidas de solos adequados, bem como a degradação do meio ambiente (por exemplo, erosão) quando da disponibilidade do material desejável.

Como resposta a este problema tem-se a alternativa de coberturas com efeito de barreira capilar, cujo mecanismo para reduzir a percolação de água para os resíduos difere-se das práticas convencionais. Nesse sistema explora-se o contraste das propriedades hidráulicas não saturadas de duas camadas de diferentes granulometrias sobrepostas, sendo a superior de material fino (camada capilar) e a subjacente de material mais grosso (camada de bloqueio), de maneira a criar uma barreira na interface dessas camadas (BIZARRETA; CAMPOS, 2017). Ressalta-se que o SBC não exige que seus materiais constituintes possuam permeabilidades tão baixa quanto as coberturas monolíticas de argila citadas acima; assim, tem-se maior gama de materiais com potencial de uso para este sistema, o que justifica o interesse nesta técnica.

Desta forma, diversos autores passaram a propor a aplicação de materiais alternativos para as coberturas finais de ARSUs, sendo estes, em geral, materiais disponíveis em grandes quantidades nas proximidades do aterro e que não possuam destinação adequada. Alguns exemplos encontrados na literatura são: lodos de estações de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) (CASTILHOS JUNIOR; PRIM; PIMENTEL, 2011; TRAVAR; et al., 2015), escória de alto forno (ANDREAS; DIENER; LAGERKVIST, 2014) e cinza volante (TRAVAR, et al., 2015) e, em específico para SBCs, materiais como resíduos sólidos urbanos (RSU) compostados (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013; ALMEIDA, 2011), resíduos de pavimentos asfálticos (HARNAS; et al., 2014) e resíduos de construção e demolição (RCD) (BARROS,

2005; BIZARRETA; CAMPOS, 2017). Em relação a este último, verifica-se o potencial de aplicação conjunta com solo argiloso, por meio de estudos de caracterização geotécnica de ambos os materiais, conduzidos tanto por (BARROS, 2005) quanto por (BIZARRETA; CAMPOS, 2017). No entanto, a literatura ainda carece de estudos do funcionamento sobre o sistema como um todo, i.e, não somente considerando as particularidades de cada camada, mas também considerando como se dá o fluxo através delas.

A aplicação de RCD para coberturas como SBC é de amplo interesse, pois além deste material trata-se de uma alternativa de viés sustentável, por diminuir a utilização de matéria-prima natural, também possui ampla disponibilidade em centros urbanos, uma vez que sua disposição final ainda é dificultosa e sua produção é elevada.

Por fim, um aspecto a ser pontuado, é que os SBCs são comumente utilizados em climas áridos e semi-áridos, com algumas poucas aplicações em climas mais úmidos, que caracterizam a região de estudo, subtropical. Porém mais recentemente a preocupação por pesquisas de SBC em climas úmidos (NG; et al., 2015; HARNAS; et al., 2014) passou a emergir, sendo portanto de interesse a aplicação de estudos deste tipo no local de desenvolvimento do trabalho. Nesse sentido, o presente trabalho visa avaliar o potencial de aplicação de RCD, do ponto de vista da percolação, como camada de bloqueio em barreiras capilares, para cobertura final de ARSUs em região de clima úmido, por meio de ensaios de coluna e em modelo físico reduzido.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente o emprego da fração miúda de RCD (<4,8 mm) como camada de bloqueio em coberturas com sistema de barreira capilar, verificando sua adequação à aterros de resíduos sólidos urbanos (ARSU).

2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar a influência do teor de finos do RCD no sistema de barreira capilar por meio de ensaios de coluna;
- b) Analisar a influência da umidade inicial de compactação do RCD no SBC em coberturas inclinadas, por meio de modelo físico reduzido;
- c) Avaliar o desempenho da solução proposta em coberturas inclinadas, considerando a percolação no sistema e tendo em vista as propriedades hidráulicas do solo e do RCD.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A geração de RSU no Brasil apresenta um aumento significativo a cada ano. Exemplo disso são os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), os quais indicam que em 2007 a quantidade de RSU gerados foi de 164 mil ton/dia (com cobertura de coleta de 83,6%) (ABRELPE, 2007), enquanto que no ano de 2017, dez anos depois, essa quantidade subiu para 214,8 mil ton/dia (cobertura de coleta de 91,2%) (ABRELPE, 2017), representando um crescimento de 24% na geração de RSU.

Portanto, a destinação final desses resíduos torna-se preocupante, uma vez que sua disposição inadequada causa impactos socioambientais diversos, tais como a degradação do solo, a contaminação de corpos hídricos (rios, aquíferos, lagos, etc.), a poluição do ar (por conta da emissão de gases) e a proliferação de vetores (JACOBI; BESEN, 2011).

Atualmente no Brasil, as principais técnicas empregadas para disposição final de RSU são as de vazadouro a céu aberto (popularmente denominados “lixões”), aterros controlados e aterros sanitários. Entre eles, tanto os vazadouros quanto os aterros controlados são considerados inadequados, principalmente por não contarem com medidas de controle e de tratamento dos lixiviados (chorume) e dos gases produzidos pela decomposição dos resíduos. Ademais, o descarte dos RSU nessas duas técnicas geralmente é realizado diretamente sobre o solo (FERRI; CHAVES; RIBEIRO, 2015; GOUVEIA; PRADO, 2010), o que contribui fundamentalmente para sua contaminação.

Diante de tal preocupação, entrou em vigor em 2010 a Lei Nº 12305, que dispõe sobre o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Tal plano possui como uma de suas metas a substituição total dos vazadouros a céu aberto e aterros controlados por aterros sanitários, em um período de 20 anos (BRASIL, 2010). Desta maneira, têm-se observado no Brasil uma tendência para aumento dos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Dados da ABRELPE indicam que de 2007 a 2017 a porcentagem de resíduos destinados à aterros sanitários subiu de 38,6% para 59,1% (ABRELPE, 2007; ABRELPE, 2017). Neste contexto, o desenvolvimento de pesquisas acerca dos aterros sanitários é de extrema importância, para assegurar sua boa funcionalidade, diante das características necessárias para este tipo de obra, que serão discutidas no item 3.2.

3.2 Aterros Sanitários

Os Aterros Sanitários, diferentemente dos vazadouros e aterros controlados, tratam-se de obras executadas com o objetivo de realizar a disposição final dos resíduos sólidos sem causar danos à saúde pública, bem como minimizar os impactos ambientais (ABNT, 1992).

De acordo com Montañó (2012), para sua implantação devem ser realizados estudos detalhados e criteriosos de vida útil (VU), custos, profundidade do lençol freático, distância dos corpos d'água utilizados para abastecimento público, características climáticas, hidrológicas e de acessibilidade (distância dos centros geradores dos resíduos).

3.2.1 Elementos de um Aterro Sanitário

O projeto de um aterro sanitário deve prever a instalação de elementos de captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados e gases, bem como sistemas de impermeabilização superior e inferior (ELK, 2007). Os principais elementos de projeto do aterro e suas funções podem ser visualizados no Quadro 1.

Quadro 1. Principais elementos de um aterro sanitário e suas funções.

Elemento	Função
Sistema de drenagem de águas superficiais	Evitar entrada de água de escoamento superficial no aterro, objetivando a redução do volume de lixiviados e problemas de instabilidade devido ao aumento de poropressões.
Sistema de impermeabilização de fundo e laterais	Proteger e impedir a percolação do chorume para o subsolo e aquíferos existentes.
Sistema de drenagem dos lixiviados	Evitar acumulação dos lixiviados dentro do aterro, minimizando as chances de infiltrarem no solo e contaminarem as águas subterrâneas.
Sistema de tratamento de lixiviados	Possibilitar adequação mínima com a legislação ambiental para lançamento dos lixiviados.
Sistema de drenagem e tratamento de gases	Evitar que os gases escapem através de meios porosos e atinjam fossas, esgotos ou até mesmo edificações, além de diminuir o risco de explosões devido à natureza do gás produzido.
Cobertura intermediária (diária)	Eliminar (ou reduzir) a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, reduzir os odores e impedir saída em excesso de biogás.
Cobertura final	Minimizar a infiltração de água para as camadas subjacentes, maximizando o escoamento superficial; controlar a saída de gases e promover a separação entre os resíduos e a vida animal e vegetal.

Fonte: Elaborado a partir de Elk (2007).

Todos esses elementos desempenham um papel fundamental para bom funcionamento e operação do aterro e, Simon e Müller (2004) destacam que a cobertura final é uma das mais

influentes para a segurança do aterro a longo prazo, ou seja, após sua desativação. Ademais, uma cobertura final que desempenhe suas funções de forma eficiente, acaba por reduzir os custos de tratamento de lixiviados após o fechamento do aterro (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013).

3.2.2 Cobertura Final de Aterros Sanitários

As coberturas finais de aterros sanitários, idealmente, devem ser constituídas por diversas camadas, sendo elas: de superfície, de proteção (a qual armazena a água percolada da camada superior), de drenagem (que promove o escoamento lateral da água percolada), de barreira hidráulica (que impede a infiltração da água não escoada), de coleta de gás e de fundação (KOERNER; DANIEL, 1997; KOVAčlć, 1994), conforme representado na

Figura 1. No entanto, Barros (2005) ressalta que nem todos os componentes são necessários em determinados tipos de sistema de cobertura final. Por exemplo, em regiões de clima árido é possível dispensar a camada de drenagem, além da possibilidade de fazer uma combinação entre um e outro componente dos listados, como é o caso da junção da camada de superfície com a de proteção, ou então da camada de fundação com a de coleta de gás.

Figura 1. Elementos de um sistema de cobertura final.



Fonte: Oliveira e Braga (2017).

Os materiais classicamente empregados para as diversas camadas da cobertura final de um aterro são: solos pouco permeáveis, em geral solos argilosos compactados ($K_{\text{sat}} \leq 1\text{E-}7$ cm/s), para camadas de barreira hidráulica; brita ou outro material inerte, que permitam a presença de poros para as camadas drenantes de precipitação e de gases; e, materiais geossintéticos (SIMON; MÜLLER, 2004). Porém, conforme relatado por Andreas, Diener e Lagerkvist (2014),

a aplicação desses materiais pode encarecer o projeto diante de fatores de disponibilidade restrita nas proximidades do aterro, além das questões de agressão ao meio ambiente com a extração de matéria-prima. Nesse sentido, passou-se a considerar a aplicação de materiais alternativos para compor a cobertura final de aterros sanitários, como resíduos disponíveis em grandes quantidades nas proximidades e que não possuam destinação.

Alguns exemplos desses materiais alternativos encontrados na literatura são: lodos de estações de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) (CASTILHOS JUNIOR; PRIM; PIMENTEL, 2011; TRAVAR et al., 2015), escória de alto forno (ANDREAS; DIENER; LAGERKVIST, 2014), cinza volante (TRAVAR, 2015), resíduos de construção e demolição (RCD) (LOCASTRO; ANGELIS, 2016; OLIVEIRA; BRAGA, 2017; BARROS, 2005; BIZARRETA; CAMPOS, 2017) e resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente ou compostados (IZZO; MAHLER; ROSE, 2013; ALMEIDA; 2011).

Cabe ressaltar, que o uso sugerido para tais materiais varia. Exemplo disso é apresentado no estudo de Castilhos Junior, Prim e Pimentel (2011), onde a aplicação dos lodos de ETA e ETE foi analisada nas camadas de superfície/proteção e de barreira hidráulica, enquanto que Travar et al. (2015) e Andreas, Diener e Lagerkvist (2014) realizaram experimentos aplicando o material em questão em todas as camadas constituintes da cobertura final, porém em diferentes proporções, conforme os requisitos de cada camada. Em relação ao RCD, este foi testado tanto para aplicação em camadas drenantes (AFFONSO, 2005; OLIVEIRA; BRAGA, 2017; LOCASTRO; ANGELIS, 2016), quanto como componente de sistema de barreira capilar (BIZARRETA & CAMPOS, 2017; BARROS, 2005). De mesma forma, os resíduos tratados mecânica e biologicamente ou compostados estudados por Izzo, Mahler e Rose (2013) e por Almeida (2011), também foram aplicados como sistema de barreira capilar, sendo tal sistema objeto do presente trabalho. Destaca-se ainda que essa técnica se difere das convencionais em coberturas finais, pois explora as propriedades não saturadas do solo ao invés de sua impermeabilização.

3.3 Fluxo de água em solos não saturados

O movimento da água através do solo pode ocorrer de diferentes formas, por meio de fluxo saturado, fluxo não saturado ou movimento de vapor. No âmbito deste trabalho, é imprescindível o entendimento de certos conceitos relacionados com o fluxo não saturado, o qual se caracteriza pela presença de ar nos poros de maior dimensão da matriz do solo, resultando em fluxos de água apenas nos poros de menor dimensão (WEIL; BRADY, 2017).

Outra maneira de descrever esse tipo de fluxo é que ele ocorre em condição de umidade abaixo do valor de saturação do material (REICHARDT; TIMM, 2004).

Em solos não saturados, o teor de água e a força com que esta é armazenada (denominada potencial da água) podem ser altamente variáveis, sendo estes os dois fatores determinantes para a taxa e direção do movimento do fluido. No entanto, esse processo de fluxo é, em geral, de difícil descrição quantitativa, pois variações nos parâmetros de umidade e potencial ao longo da matriz do solo envolvem funções complexas para descrever sua permeabilidade (MONCADA, 2008).

3.3.1 Potencial total da água no solo

A retenção e o movimento da água nos solos são fenômenos relacionados com a energia, mais especificamente a energia potencial, devido à característica de movimento lento da água em tais substratos, que faz com que a energia cinética seja desprezível. Em geral, a energia da água no solo em determinado ponto é comparada àquela da água pura em condições padrões de temperatura e pressão, sendo a diferença entre esses dois níveis de energia denominada potencial da água no solo. Assim como a pressão, o termo potencial implica estado de diferença de energia (WEIL; BRADY, 2017).

Segundo Machado e Vilar (2015) existem diversos potenciais na natureza que podem afetar a energia interna dos fluidos intersticiais presentes no solo, conforme evidenciado na Eq. 1, sendo que todos estes potenciais em conjunto definem um potencial total (Ψ_{total}).

$$\Psi_{total} = \Psi_{temp} + \Psi_z + \Psi_{cin} + \Psi_p + \Psi_{pn} + \Psi_m + \Psi_{osm} \quad (1)$$

Onde: Ψ_{temp} potencial térmico, Ψ_z potencial gravitacional, Ψ_{cin} potencial cinético, Ψ_p potencial de pressão, Ψ_{pn} potencial pneumático, Ψ_m potencial matricial e Ψ_{osm} potencial osmótico.

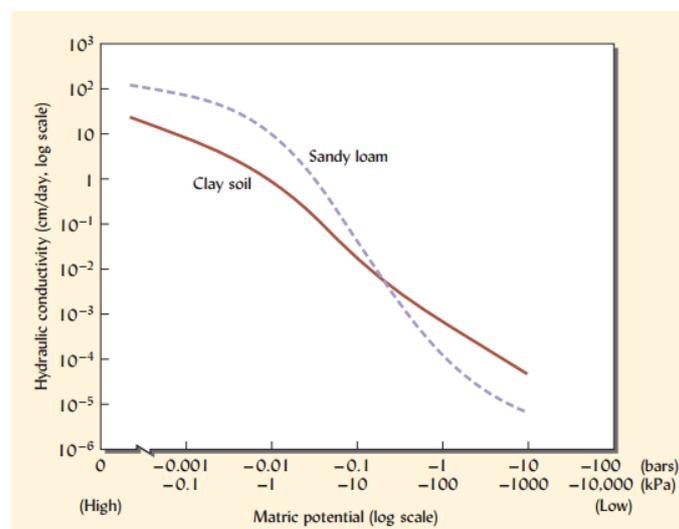
Tendo em conta o conceito de cada um desses potenciais no solo, Reichardt e Timm (2004) destacam que em fluxo não saturado apenas as componentes matricial e gravitacional são relevantes. De acordo com Weil e Brady (2017), o potencial gravitacional representa o nível de energia dado um ponto de referência e, o potencial matricial relaciona-se com a pressão negativa (por vezes denominada sucção) devido às forças de atração entre a água e os sólidos da matriz do solo (i.e., adsorção e capilaridade). Especificamente em relação à capilaridade, esta resulta da atuação conjunta dos fenômenos de adesão e coesão que

ocorrem com as moléculas de água. A adesão representa a atração de moléculas às superfícies sólidas, enquanto que a coesão representa a atração entre as próprias moléculas de água. Desta forma quando as moléculas de água são atraídas por determinada superfície (por exemplo as partículas de solo), ao mesmo tempo as forças coesivas mantem tais moléculas unidas, de forma a resultar numa frente de avanço de água, isto é, a capilaridade.

Portanto, conhecendo-se o potencial da água em vários pontos do solo é possível prever a direção de seu movimento, bem como a intensidade com que este ocorrerá, pois verifica-se uma tendência de equilíbrio dos meios de maior para os de menor estado de energia. Isto explica, por exemplo, porque o movimento da água ocorre de meio mais úmidos (maior energia) para áreas mais secas (menor energia) (WEIL; BRADY, 2017).

Além disso, a textura do solo, associada com o aspecto do potencial da água, torna-se outro fator de influência para o fluxo não saturado. Na Figura 2 pode-se observar, por exemplo, que para maiores potenciais (maior umidade), a condutividade hidráulica é maior em areias do que em argilas, porém para potenciais menores, ocorre o oposto. Isto se explica pois nos solos de maiores partículas (*sandy loam* na Figura 2) os poros também são de maior dimensão o que resulta em maior preenchimento pela água, favorecendo assim o fluxo (maior permeabilidade). No entanto, quando esse potencial diminui (<-10 kPa na Figura 2), a maior parte dos poros desse solo mais grosso esvazia-se, enquanto que para o solo de menores partículas (*clay soil*), os micro-poros são capazes de reter água (pela força de capilaridade), participando no fluxo não saturado de forma mais significativa que o solo mais grosso.

Figura 2. Relação entre o potencial matricial e condutividade hidráulica para dois solos de diferentes texturas.

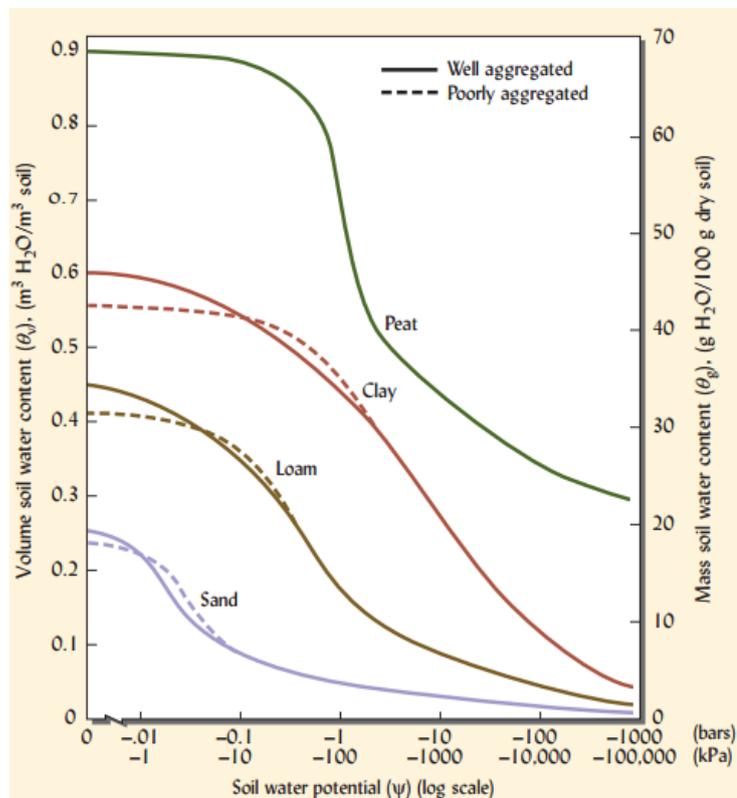


Fonte: Weil e Brady (2017).

3.3.2 Curva de retenção (curva característica)

Para auxiliar no entendimento dos mecanismos que governam o fluxo não saturado, é comum representar graficamente os dois parâmetros que mais o influenciam (potencial e umidade). Esses gráficos, que relacionam o potencial da água no solo com sua umidade (sendo em geral a umidade volumétrica), são denominados de curvas características. Um exemplo de curvas características pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3. Exemplos de curvas características de diferentes tipos de solos.



Fonte: Weil e Brady (2017).

A partir da Figura 3, pode-se observar que o solo argiloso (*clay*) retém muito mais água para determinado potencial do que o silte (*loam*) ou a areia (*sand*), o que corrobora com a discussão realizada para a Figura 2, de que a textura do solo exerce grande influência na retenção de água. Outra forma de interpretação é que para uma mesma umidade, solos mais finos apresentam potencial muito menor, de forma a favorecerem o fluxo em sua matriz até que haja um equilíbrio de energia. Ademais, a estrutura do solo também influencia na capacidade de retenção do solo. De acordo com Weil e Brady (2017), um solo bem graduado possui mais espaços porosos e, conseqüentemente, maior é sua capacidade de retenção quando comparado com os solos mal-graduados ou com os que foram compactados. De fato, na

Figura 3 as linhas tracejadas representam a condição de compactação, onde observa-se comportamento ligeiramente distinto da curva até determinado ponto.

Ainda acerca da curva característica, Almeida (2011) complementa que o comportamento do solo durante os fenômenos de infiltração e evaporação de água são controlados principalmente pela curva característica. A autora cita que tal curva pode ser dividida em três estágios de drenagem: (1) zona de efeito de borda ou efeito limite, caracterizada pelo estágio onde praticamente todos os poros estão preenchidos de água; (2) zona de transição, onde verifica-se a entrada de ar na matriz do solo até ponto de umidade residual; e, (3) zona residual, onde a continuidade da água nos vazios é bastante reduzida.

3.4 Barreiras Capilares

Uma barreira capilar é formada por duas camadas sobrepostas, sendo a superior de granulometria mais fina que a inferior, ambas com acentuado contraste de sucção e condutividade hidráulica (BIZARRETA; CAMPOS, 2017). De acordo com Izzo, Mahler e Rose (2013), a camada superior é denominada camada capilar e a inferior camada de bloqueio capilar.

Tal sistema pode ser explicado tendo em vista as características apresentadas acerca do fluxo não saturado em solos. Quando a água se move neste regime ocorre um efeito de impedimento da percolação no sentido vertical diante de uma mudança abrupta na dimensão dos poros do solo. Os macroporos da camada de bloqueio oferecem menor "atratividade" para a água do que os microporos do material da própria camada capilar. Isto porque a camada inferior apresenta maior potencial e, conforme discutido anteriormente, o fluxo tende para as zonas de menor potencial, neste caso, representado pelos microporos da camada capilar. Por este motivo, a frente de umedecimento não ocorre diretamente para a camada de bloqueio. O fluxo avança nesse sentido apenas após um determinado período, pelo qual a água esteve acumulando-se na interface entre os materiais, de maneira a saturar a camada inicial, ou seja, fazendo com que o potencial matricial do solo neste substrato aproxime-se de zero (aumenta) e o fluxo passe para a camada subjacente (WEIL; BRADY, 2017).

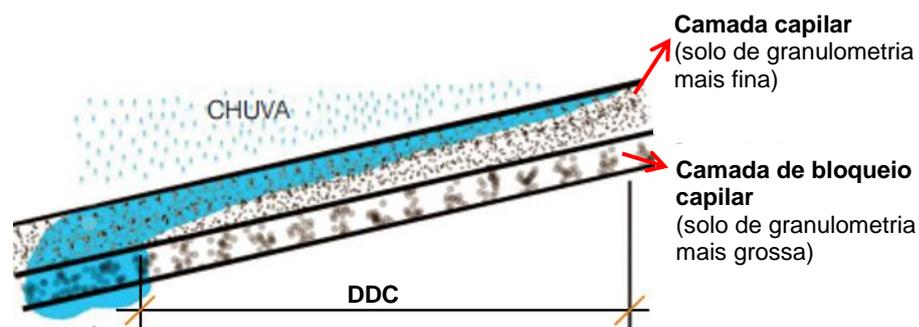
Izzo, Mahler e Rose (2013) complementam que o teor de umidade se difere consideravelmente entre os dois substratos do SBC, sendo mais elevado na camada capilar, de modo que sua permeabilidade hidráulica não saturada também é maior. Isso significa que pode ocorrer um fluxo de água nesta camada, mesmo que na camada de bloqueio não haja nenhum fluxo.

Cabe ainda ressaltar, que como as barreiras capilares trabalham em regime não saturado de fluxo, os parâmetros mais influentes para tal, isto é, a curva característica, a textura e a estrutura do solo são determinantes para o funcionamento deste sistema. Ademais, diversos autores afirmam em seus trabalhos que outro parâmetro de extrema importância a ser levado em consideração nesses sistemas é sua inclinação (KÄMPF; MONTENEGRO, 1997; IZZO; MAHLER; ROSE, 2013; NG et al., 2015).

3.4.1 Barreiras capilares inclinadas

Como dito anteriormente, um parâmetro de extrema importância a ser levado em conta nos sistemas de barreiras capilares para aterros é sua inclinação, uma vez que na maior parte dos casos os aterros possuem um determinado declive. Neste caso, como resultado tem-se um fluxo descendente na mesma direção da inclinação da barreira, pois a água armazenada na camada capilar tende a escoar paralelamente à barreira capilar, na interface entre as camadas que a constituem. Tal fenômeno ocorre até que a camada capilar atinja sua capacidade de retenção máxima (potencial torna-se positivo) o que faz com que o mecanismo de capilaridade deixe de atuar, resultando na quebra do efeito do SBC. Essa distância, geralmente tratada como um ponto, onde ocorre quebra do efeito da barreira é denominada de distância de desvio capilar (DDC), conforme retratada na Figura 4.

Figura 4. Representação de barreira capilar.



Fonte: Adaptado de IZZO, MAHLER e ROSE (2013).

Kämpf e Montenegro (1997) ressaltam que a inclinação contribui para um funcionamento mais eficaz dos SBCs e Aubertin et al. (2009) citam que o conhecimento deste aspecto das barreiras capilares é de interesse, uma vez que é desejável que o sistema de cobertura administre um volume maior do que aquele que excederia a capacidade de desvio da barreira, isto é, que causaria quebra de seu efeito.

Contribuições interessantes acerca desse tema são apresentadas por Aubertin et al. (2009), que realizaram extensas simulações numéricas para estudar a influência da intensidade dos eventos de precipitação e do coeficiente de permeabilidade e espessura da camada capilar na DDC de barreiras inclinadas. Os referidos autores encontraram que há uma taxa crítica de precipitação acima da qual a DDC passa a diminuir rapidamente; também que para materiais com $K_{sat} < 1E-5$ cm/s o efeito de redução da DDC diante de precipitações intensas ou prolongadas é bem menor; e, quanto maior a espessura da camada capilar, melhor o desempenho do SBC, ou seja, a DDC é maior, porém existe um limite de espessura a partir do qual o ganho na eficiência no sistema não é mais significativo.

3.4.2 Barreiras capilares com material coesivo

As primeiras aplicações do sistema de barreira capilar para cobertura final de aterros de resíduos sólidos urbanos datam da década de 1990, onde eram empregados, fundamentalmente, solos granulares (KÄMPF; MONTENEGRO, 1997). Esses mesmos autores estudaram, por exemplo, o caso de uma barreira capilar constituída por areia média como camada capilar e pedrisco como camada de bloqueio. Na mesma época, Khire, Benson e Bosscher (2000) analisaram SBCs com aplicação de silte no substrato superior e areia ou pedrisco no substrato inferior.

Contudo, estes mesmos autores (KHIRE; BENSON; BOSSCHER, 2000) foram responsáveis por introduzir a aplicação de um solo argiloso na camada capilar de SBC e os resultados obtidos pelos autores foram satisfatórios, pois apontavam para maior capacidade de retenção na camada capilar resultando em menor percolação para a camada de bloqueio. Desde então outros autores passaram a se interessar pelo tema. Krisdani, Rahardjo e Leong (2005), por exemplo, aplicaram um solo residual sobre solo arenoso e relatam que o efeito de barreira capilar de fato foi observado, no entanto com ressalvas, devido à evapotranspiração mais lenta da camada de solo coesiva, o que faz com que o desempenho do SBC diminua diante de eventos de precipitação muito próximos entre si. Outras possíveis desvantagens dos solos coesivos seriam a redução na percolação lateral na interface das camadas, devido à baixa permeabilidade desses solos e a manifestação de trincas por ressecamento (BIZARRETA; CAMPOS, 2017).

Ainda assim, estes mesmos autores apontam para o potencial de aplicação desses materiais e a necessidade de estudos mais aprofundados para tanto. Mais recentemente, por exemplo, Ng et al. (2015) propuseram um sistema de barreira capilar com três camadas distintas de solo, sendo uma delas de solo coesivo. Essa camada (de solo coesivo) não estaria exposta

diretamente, sendo usada na parte mais inferior da composição de camadas, e funcionou também como barreira hidráulica do sistema.

3.4.3 Barreiras capilares em climas úmidos

Juntamente com a aplicação inicial de materiais granulares para os SBC, verificou-se na literatura que tal técnica difundiu-se rapidamente para cenários de climas áridos e semi-áridos, que caracterizam-se por baixo índice pluviométrico anual (<500 mm). Nestas regiões de climas mais secos, a preocupação com a entrada de água exacerbada para os resíduos não é tão notável, pois o volume quase total da precipitação é armazenado no solo e evapora rapidamente após cessar a chuva (KHIRE; BENSON; BOSSCHER, 2000).

Por outro lado, em regiões de climas mais úmidos (tropicais e subtropicais), onde os índices pluviométricos extrapolam os 1000 mm anuais, a quebra do efeito de barreira capilar ocorre muito mais rapidamente e faz-se necessário adotar medidas ou abordagens distintas para fazer com que o sistema passe a funcionar (HARNAS et al., 2014). Apesar de ainda não ser um campo de estudo amplamente explorado, diversos autores vêm apresentando alternativas para possibilitar o uso do SBC sob climas úmidos, pois o SBC se trata de uma abordagem interessante para as coberturas finais, uma vez que independe da aplicação de um material específico. O que realmente determinará seu funcionamento é a combinação adequada entre os materiais que serão aplicados em cada camada (a capilar e a de bloqueio).

Nesse sentido, uma das estratégias encontradas na literatura foi o conceito de barreira capilar dupla, onde o sistema conta com quatro camadas que correspondem, respectivamente, a capilar-bloqueio-capilar-bloqueio. Nas primeiras duas camadas, o efeito de bloqueio quebra-se rapidamente e a primeira camada de bloqueio passa a atuar também como região preferencial para escoamento lateral do fluxo. Assim, as camadas subjacentes, que possuem a segunda barreira capilar podem trabalhar mais eficientemente conforme a teoria de fluxo não saturado (HARNAS et al., 2014).

Outra solução semelhante foi apresentada por Ng et al. (2015) que, em seu trabalho, exploraram a aplicação combinada de solos de diferentes faixas granulométricas para criar um SBC de três camadas, sendo a superior de silte, a intermediária (de bloqueio) de areia e uma terceira com material coesivo (argila). Os autores obtiveram resultados interessantes, pois o efeito de barreira capilar entre a camada siltosa e arenosa rompeu-se rapidamente entrando em ação a camada argilosa, que funcionou como barreira hidráulica, favorecendo o escoamento lateral do fluxo sobre ela.

No entanto, ressalta-se como um aspecto deficiente do trabalho de Ng et al. (2015), que esses materiais (silte, areia e argila) dificilmente estariam disponíveis juntos num mesmo ambiente para que este sistema seja viável técnica e economicamente, além de aplicável em larga escala. Nesse contexto torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas que explorem o potencial de aplicação de materiais alternativos, que sejam de ampla disponibilidade na região de estudo.

3.5 Resíduos de Construção e Demolição

3.5.1 Panorama geral da gestão de RCD no Brasil e região de estudo

Os resíduos de construção e demolição merecem especial atenção no panorama atual do país. Assim como os resíduos sólidos urbanos (RSU), a geração de RCD também apresentou considerável aumento nos últimos anos no país. Dados da ABRELPE indicam que a quantidade desse material coletado em 2007 foi de 72,6 mil ton/dia (ABRELPE, 2007) e em 2017 os valores registrados foram de 123,4 mil ton/dia (ABRELPE, 2017), ou seja, houve um aumento de aproximadamente 41,2% em apenas dez anos de análise. Ressalta-se que a quantidade gerada desses resíduos pode ser ainda maior do que o que os registros apontam, uma vez que os municípios coletam apenas RCDs lançados em logradouros públicos e os dados não informam os volumes coletados por meios particulares, i.e., diretamente com empresas de disposição privada (ABRELPE, 2013).

Este aumento expressivo na quantidade de resíduo é notável e isso reflete diretamente em problemas de disposição e de financiamento da coleta como um todo. Segundo o último relatório emitido pela ABRELPE (ABRELPE, 2017), os mais de 45 milhões de toneladas de RCD coletados no período pelo poder público, somados a todos os serviços de limpeza urbana que são de responsabilidade das prefeituras, trouxeram para os cofres do Governo um ônus de cerca de R\$ 10,37/hab/mês, valor este de grande impacto, uma vez que o orçamento da maior parte das prefeituras está sob condições limitadas.

No local de desenvolvimento do trabalho, Foz do Iguaçu-PR, os RCD não são dispostos em aterros de inertes, conforme recomendado pelas regulamentações ambientais, mas sim no próprio aterro de resíduos sólidos urbanos (ARSU). Tal fato é extremamente prejudicial no caso de aterros sanitários, uma vez que o lixiviado do RCD pode colmatar o sistema de filtros de base do aterro, impedindo a coleta do lixiviado e causando seu acúmulo na massa de resíduos, o que instabiliza o aterro sanitário.

Segundo Duarte (2018), a produção média mensal de RCD no município de Foz do Iguaçu é de aproximadamente 7000 toneladas, valor equivalente aos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na cidade, caracterizando assim um problema considerável para gestão de resíduos do município.

3.5.2 Utilização de RCD como material alternativo

Levando em consideração, a junção do problema financeiro com o problema de geração e/ou disposição dos grandes volumes de RCD produzidos no Brasil, diversos estudos vem sendo realizados para buscar alternativas de utilização deste resíduo. Os temas mais explorados na literatura atual são a utilização do RCD como agregados graúdos para concreto e como material constituinte de bases e sub-bases de pavimentos (AFFONSO, 2005; CARDOSO et al., 2016). Além disso, também se encontram na literatura (MENDOZA; ALTABELLA; IZQUIERDO, 2017), sugestões para aplicação de RCD em obras geotécnicas, tais como “mini barragens”, poços de drenagem de gás e canais de drenagem, sendo estes tipos de obra os que possuem um maior potencial de atenuação da quantidade de resíduos dispostos, uma vez que o volume necessário para executar projetos geotécnicos é muito maior quando comparado ao utilizado nas soluções de produção de concretos não estruturais.

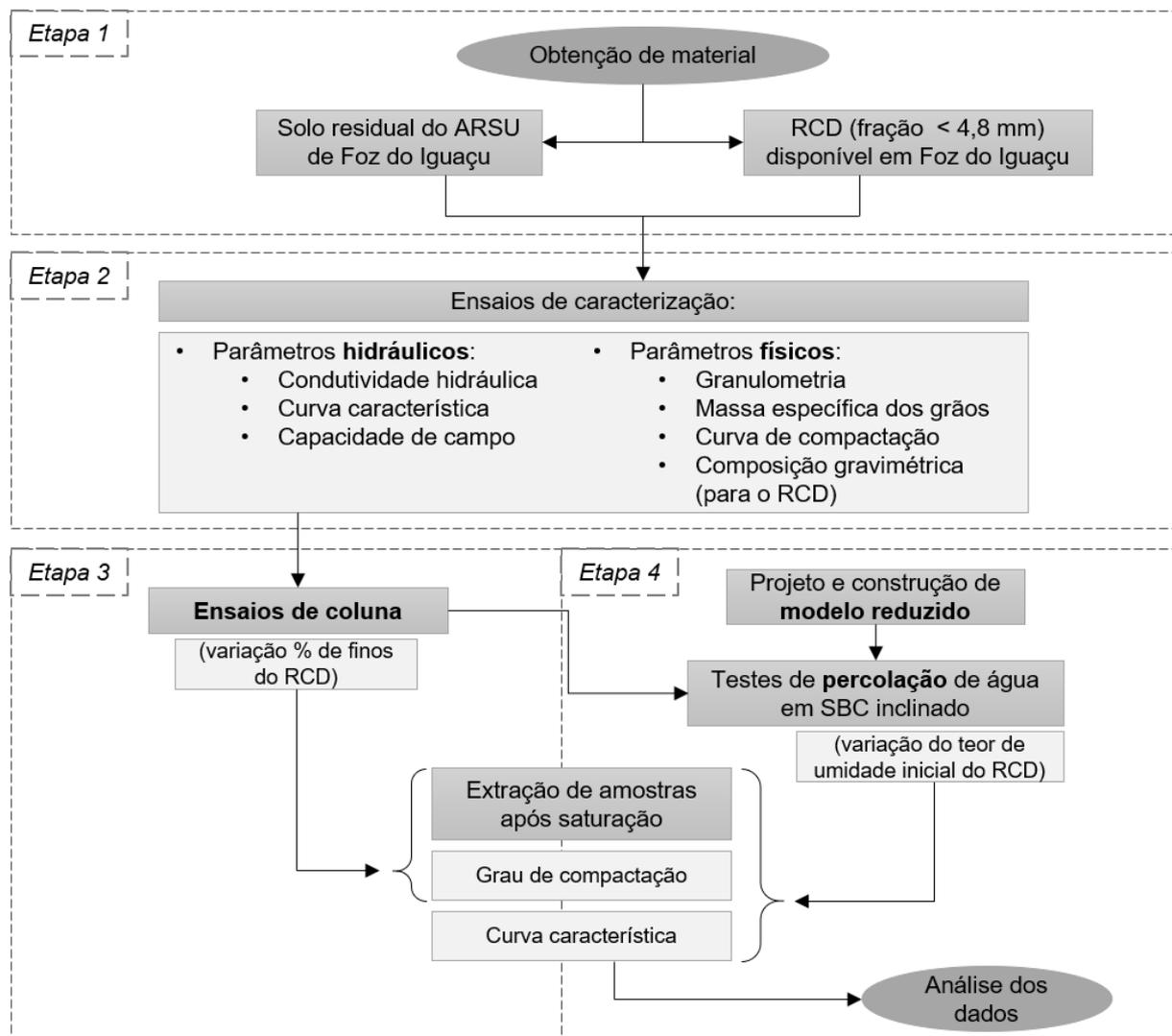
Ademais, encontram-se na literatura outros tipos de utilização de RCD, como é o caso do trabalho de Locastro e Angelis (2016) e do de Oliveira e Braga (2017) que destacam a grande vantagem da aplicação do resíduo em camadas de drenagem de aterros, visto que se utilizam de materiais disponíveis na maior parte das vezes no próprio local, ou então de obras e/ou construtoras próximas, sem o custo adicional de transporte.

Além destes, alguns trabalhos (BARROS, 2005; BIZARRETA, CAMPOS, 2017) propõem a utilização da fração fina (< 4,8 mm) do RCD como técnica alternativa para coberturas finais de aterros, explorando suas propriedades não saturadas para sistemas de barreiras capilares. No entanto os trabalhos avaliam as propriedades isoladas do material, que apontam para seu potencial de aplicação em SBC, deixando em aberto a necessidade de avaliar-se o sistema como um todo, ou seja, o fluxo que percorre suas camadas constituintes.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido em quatro etapas principais: (1) obtenção dos materiais utilizados para a pesquisa, sendo estes o solo da região utilizado no ARSU e a fração fina (< 4,8 mm) de resíduos de construção e demolição (RCD), em quantidade suficiente para todos os experimentos; (2) realização de ensaios de caracterização dos parâmetros hidráulicos e físicos dos materiais; (3) realização de testes de coluna, para verificação da influência do teor de finos do RCD no funcionamento da barreira capilar; (4) ensaios em modelo reduzido para análises da percolação de água em sistema de barreira capilar inclinada, verificando influência do teor de umidade inicial do RCD. Tal processo está esquematizado na Figura 5.

Figura 5. Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: Acervo do autor.

4.1 Obtenção e preparo dos materiais

Os materiais utilizados para o trabalho foram coletados no ARSU de Foz do Iguaçu-PR em bolsas de tecido. Coletou-se cerca de 120 L de cada material (6 bolsas de 20 L). O solo residual da região é o mesmo utilizado nos procedimentos de coberturas diárias e final do aterro e foi coletado diretamente do local. O RCD, por outro lado, é disposto sem separação entre a fração graúda e a fina, motivo pelo qual o material foi retirado de pontos estratégicos (com maior concentração de material fino), sendo estes nas regiões mais baixas das pilhas de disposição do resíduo, por onde provavelmente ocorre a passagem dos caminhões caçamba, ocasionando trituração do material. Além disso, fez-se necessária a realização de peneiramento *in loco* para coleta do RCD, em peneira de malha #4 (4,8 mm). Por fim, coletou-se uma bolsa extra de RCD (sem peneiramento, i.e, incluindo a fração graúda), para caracterização do material quanto à granulometria completa e à gravimetria por meio de procedimento visual. Na Figura 6 pode-se observar os locais de coleta dos materiais.

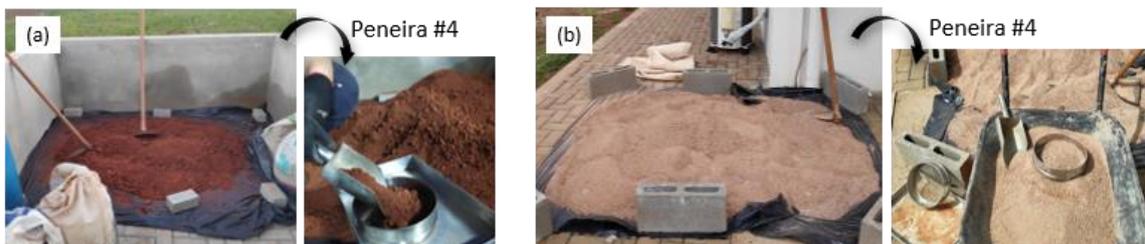
Figura 6. Coleta dos materiais utilizados para o trabalho no ARSU de Foz do Iguaçu.



Fonte: Acervo do autor.

Após transporte dos materiais para o laboratório estes passaram por processo de homogeneização, de maneira a evitar variações nos resultados dos ensaios. Assim, o conteúdo de todas as bolsas (de solo ou RCD) foi mesclado. O solo foi destorroado até que todos os grãos passassem na peneira #4 (4,8 mm) e, do RCD também tomou-se a fração passante na #4 (caracterizando fração fina).

Figura 7. Coleta dos materiais utilizados para o trabalho no ARSU de Foz do Iguaçu. (a) Solo. (b) RCD.



Fonte: Acervo do autor.

Em seguida, o material foi armazenado com umidade higroscópica em cestos de plástico e bolsas em câmara climatizada, com temperatura de 20 a 24°C.

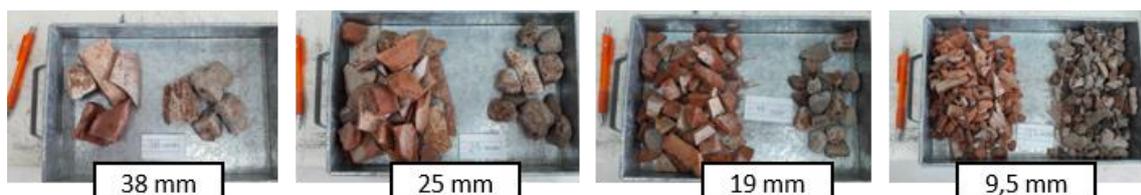
4.2 Caracterização dos materiais

Para caracterização dos materiais foram seguidos os procedimentos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como recomendações encontradas na literatura consultada. As amostras para ensaios de massa específica dos grãos, granulometria, compactação, limites de Atterberg e permeabilidade foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

Inicialmente realizou-se o ensaio de composição gravimétrica do RCD, por meio de separação tátil-visual de amostra lavada na peneira #4 e seca em estufa, conforme preconizado pela NBR 15116 (ABNT, 2004). De acordo com esta normativa o material deve ser separado em grupos, sendo eles: (1) fragmentos que apresentam pasta de cimento em mais de 50% de seu volume; (2) fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% de seu volume; (3) fragmentos de cerâmica em mais de 50% de seu volume; (4) fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica. Assim, determina-se a porcentagem de cada grupo, em massa, o que permite classificar o RCD em agregado reciclado de concreto (ARC), quando os grupos 1 e 2 representam 90% ou mais da massa de toda a amostra, ou agregado reciclado misto (ARM), caso contrário.

Em particular para este trabalho, o grupo 4 foi desconsiderado, portanto os fragmentos pertencentes a ele foram descartados anteriormente à separação da amostra ensaiada. Procedeu-se com a separação dos grupos em cada fração utilizada no peneiramento grosso (ou seja, peneiras 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm) de maneira a facilitar a identificação dos diferentes tipos de material (i.e., grupos). A fração 4,8 mm não foi utilizada neste processo, pois a separação manual para esta granulometria se mostrou inviável. Este processo está ilustrado na Figura 8. Nota-se que a amostra foi dividida em duas partes: fragmentos dos grupos 1 e 2 (de pasta de cimento ou rocha) e 3 (cerâmicos).

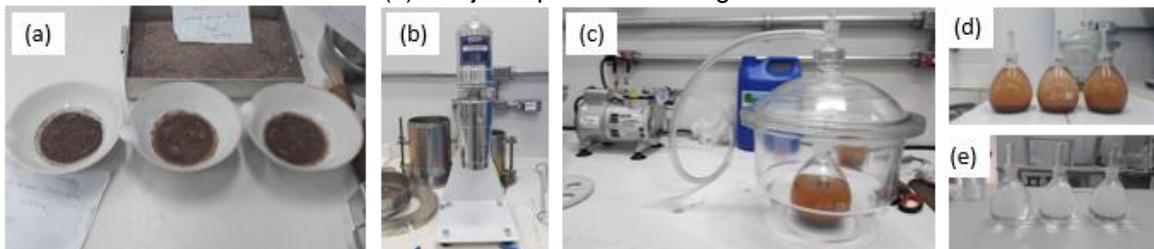
Figura 8. Determinação da composição gravimétrica do RCD por separação tátil-visual.



Fonte: Acervo do autor.

Para a massa específica dos grãos utilizou-se o método do picnômetro com bomba de vácuo, conforme recomendações da NBR 6508 (ABNT, 1984), com algumas adaptações devido a limitações de aparelhagem. Por exemplo, a aplicação do vácuo foi realizada em dessecador, com o picnômetro armazenado em seu interior e ocorreu em três etapas, sendo cada uma com duração de 15 min, com intensidade entre 65 e 70 kPa. Na Figura 9 é possível observar algumas das etapas do ensaio.

Figura 9. Ensaio de determinação da massa específica dos grãos do solo e do RCD. (a) Imersão prévia das amostras por 12 h. (b) Agitação em dispersor de partículas por 15 min. (c) Etapa de aplicação do vácuo, bomba conectada a dessecador. (d) Conjunto picnômetro + água destilada + amostra. (e) Conjunto picnômetro + água destilada.



Fonte: Acervo do autor.

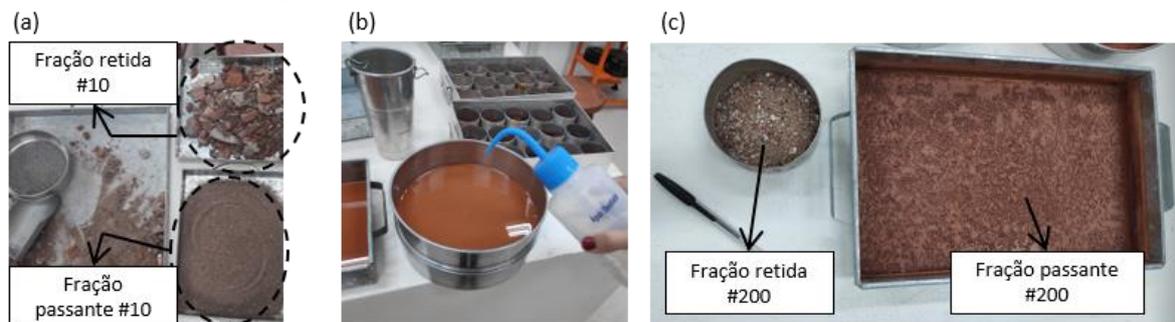
Foram realizadas cinco repetições do ensaio para cada material, visando resultados com variações menores a $0,02 \text{ g/cm}^3$ entre si. Ressalta-se que em todas as etapas do processo tomou-se o cuidado de não perder material (que pudesse ficar aderido aos instrumentos utilizados, como funis, cápsulas, copo dispersor, etc.), no entanto, devido a limitações de aparelhagem, como a balança com precisão menor do que a requerida (de $0,01 \text{ g}$) e bomba de vácuo que não teve capacidade de atingir a intensidade recomendada pela norma (de 88 kPa), os resultados apresentaram variação maior do que o desejável. Desta forma, utilizou-se também um segundo método para confirmação dos resultados, sendo este o método de *le chatelier*, descrito pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

Procedeu-se com o ensaio de granulometria, onde foram seguidas as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016) para as etapas de peneiramento grosso e fino (partículas retidas na peneira #200, i.e., $0,075 \text{ mm}$). Para a construção da curva para as partículas menores do que $0,075 \text{ mm}$ utilizou-se granulômetro a laser Acil Weber Cilas 1190, devido à indisponibilidade dos densímetros utilizados na técnica de sedimentação (recomendada pela normativa).

Desta forma, as amostras (passantes na #10) foram submetidas à imersão por período mínimo de 12h em solução de hexametáfosfato de sódio, com concentração de $45,7 \text{ g/L}$; após esse período o material foi lavado em peneira #200, sendo as duas partes, tanto a fração retida como a passante, secas em estufa. A fração retida foi submetida ao peneiramento e a passante à análise por laser. No caso do RCD, também realizou-se peneiramento grosso com

material lavado em peneira de 2,0 mm (#10) e seco em estufa. Na Figura 10 pode-se observar este processo para a amostra de RCD. Para o solo as etapas são análogas, excetuando-se a de peneiramento grosso, que não se aplicou, pois o material passa integralmente na peneira 2,0 mm.

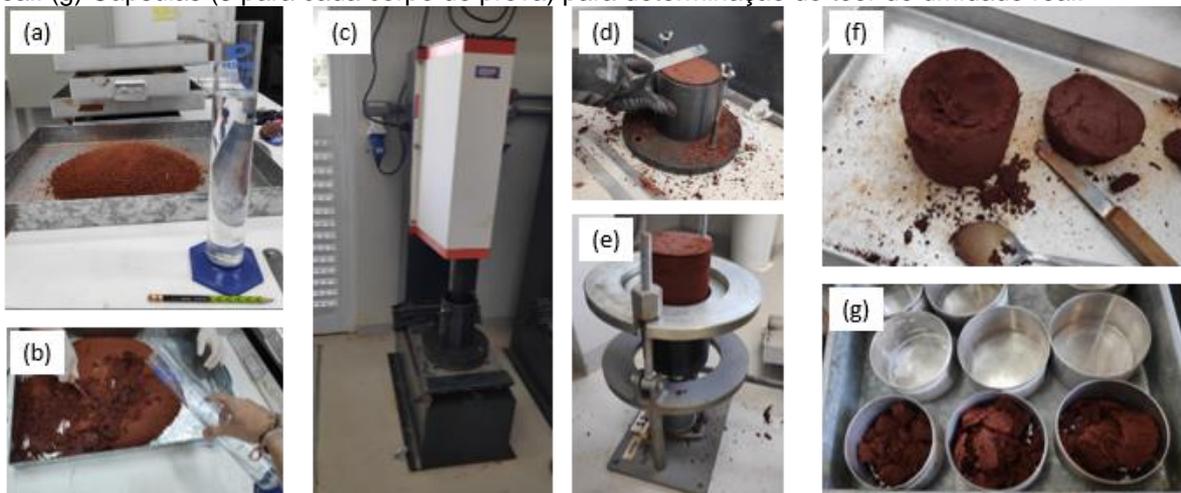
Figura 10. Ensaio de granulometria do RCD. (a) Separação na peneira #10, em que fração retida é destinada à lavagem para peneiramento grosso e fração passante destinada à (b) lavagem para (c) peneiramento fino da fração retida na #200 e laser para a passante na #200.



Fonte: Acervo do autor.

Em relação ao ensaio de compactação adotou-se o procedimento normativo da NBR 7182 (ABNT, 2016), com uso de soquete Proctor automático da AMC. Utilizou-se energia normal, cilindro pequeno para o solo e grande para o RCD. O ensaio foi realizado com e sem reuso de material, para verificar possibilidade de sua reutilização na etapa do ensaio do modelo reduzido para SBC. Na Figura 11 pode-se observar as etapas do ensaio, para a amostra de solo sem reuso.

Figura 11. Ensaio de compactação. (a) Separação das porções de solo para 5 pontos distintos de umidade. (b) Umedecimento e homogeneização da amostra para 1 ponto da curva. (c) Equipamento de soquete automático. (d) Rasamento da superfície do corpo de prova, para pesagem. (e) Extração do corpo de prova do cilindro, para (e) retirada de amostras para determinação do teor de umidade real. (g) Cápsulas (3 para cada corpo de prova) para determinação do teor de umidade real.



Fonte: Acervo do autor.

Ainda acerca da caracterização física dos materiais, foram realizados ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme preconizado pelas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente, para sua identificação quanto ao sistema unificado de classificação dos solos (SUCS).

Para a caracterização dos parâmetros hidráulicos das amostras foram realizados os ensaios de curva característica e condutividade hidráulica saturada.

Em relação à curva característica dos materiais utilizou-se o método do papel filtro, detalhado por (VILLAR, 2002; BIZARRETA, 2009), cujo funcionamento se dá devido ao princípio de que dois materiais porosos isolados e em contato trocam água entre si até chegarem a um ponto de equilíbrio. Desta forma, ao serem isolados em conjunto, o papel e o solo (ou RCD) atingem a mesma umidade após determinado período. Em seguida mede-se tal umidade e, por meio de curvas de calibração para o papel filtro é possível calcular a sucção correspondente da amostra de solo, em função da umidade. As relações mais difundidas são (Chandler; et al., 1992):

$$\text{Para } w \leq 47\% \text{ (do papel filtro), } \Psi = 10^{4,842-0,0622 \cdot w} \quad (2)$$

$$\text{Para } w > 47\% \text{ (do papel filtro), } \Psi = 10^{6,050-2,48 \cdot \log(w)} \quad (3)$$

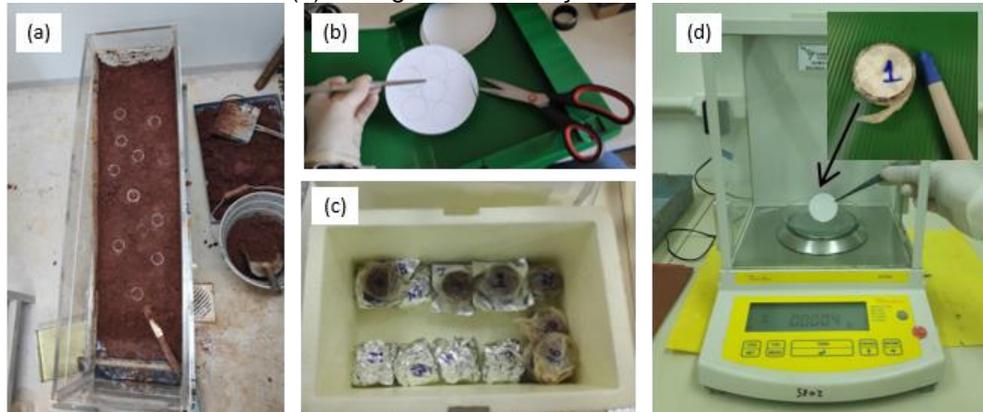
Tais relações são utilizadas para o papel Whatman's 42, papel utilizado neste trabalho.

As amostras de solo e de RCD foram coletadas do modelo reduzido (a ser descrito no item 4.4), para garantir que tivessem o mesmo grau de compactação utilizado nos experimentos de BC. Foram coletadas 7 amostras de cada material, em anéis metálicos biselados. Cada uma destas amostras foi embalada em filme plástico com diferente teor de umidade (estimados em função da umidade de saturação do material) e mantidas em caixa isopor por dois dias, para evitar variações de temperatura bruscas. Após este período inseriu-se o papel filtro nas duas faces da amostra e estas foram embaladas novamente em filme plástico e em folha alumínio, sendo armazenadas na caixa de isopor por mais sete dias. Finalmente mediu-se a umidade do papel filtro de cada uma das amostras, bem como a umidade da amostra. Para este ensaio fez-se necessário uso de balança analítica (precisão 0,0001 g).

Ressalta-se que para medição das massas (úmida e seca) do papel filtro tomou-se o cuidado de realizar os registros na balança em intervalo curto de tempo após retirada do papel do contato com a interface do solo e depois da retirada da estufa. Relatos da literatura indicam que este papel é muito sensível e causa variações nos resultados do ensaio quando exposto

por tempos maiores a 10 segundos antes do registro de massa pela balança. A execução do ensaio está ilustrada na Figura 12.

Figura 12. Ensaio da curva característica. (a) Extração das amostras do modelo reduzido. (b) Manuseio do papel filtro por meio de pinça, para evitar alterações de sua umidade. (c) Armazenamento das amostras, para equilíbrio da umidade entre papel filtro e solo (ou RCD). (d) Pesagem em balança analítica.



Fonte: Acervo do autor.

O ensaio de condutividade hidráulica do solo argiloso para determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizado conforme recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000) e, para o RCD, seguiu-se as recomendações da NBR 13292 (ABNT 1995). Na Figura 13 pode-se observar um esquema de cada um destes ensaios.

Figura 13. Ensaio de permeabilidade. (a) carga constante, para o RCD. (b) Carga variável, para o solo argiloso.



Fonte: Acervo do autor.

Cabe ressaltar que para estes dois ensaios foram adotadas as mesmas condições de grau de compactação (GC) utilizadas nos ensaios de coluna e modelo reduzido, para o solo e RCD.

4.3 Ensaios de coluna

Com o objetivo de avaliar a influência do teor de finos dos RCD no funcionamento da barreira capilar foram realizados testes de coluna, onde foi possível registrar a velocidade de percolação da água em cada uma das camadas (capilar e de bloqueio) e o tempo de permanência da água na interface dos materiais, até quebra da barreira capilar formada entre eles (i.e., o solo argiloso e o RCD). Para tanto, utilizou-se permeâmetro de acrílico transparente, o qual permite a visualização do fluxo de água.

A montagem do ensaio deu-se pela colocação de tela metálica, geotêxtil e papel filtro na base do permeâmetro, com posterior preenchimento por RCD e solo, respectivamente. Sobre os materiais novamente dispôs-se o conjunto de papel filtro, geotêxtil e tela metálica e, por fim, a tampa do permeâmetro, ligada a um reservatório de água por meio de uma mangueira. Para funcionamento do sistema, os registros do reservatório, da tampa e da base do permeâmetro ficaram abertos, para garantir passagem do fluxo de água, enquanto os registros da coluna transparente de acrílico foram fechados. Para evitar obstrução dos registros da coluna por partículas de solo ou RCD, estes foram protegidos com maço de algodão. Um esquema da montagem do experimento pode ser observado na Figura 14.

Figura 14. Montagem do ensaio de coluna. (a) Tela metálica, geotêxtil e papel filtro. (b) Maço de algodão para proteção dos registros da coluna acrílica. (c) Disposição dos materiais (solo e RCD) para SBC. (d) Reservatório d'água ligado por mangueira ao permeâmetro.



Fonte: Acervo do autor.

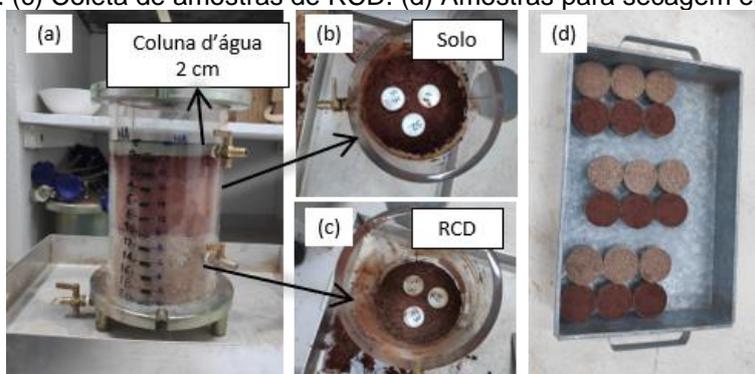
Para realização do ensaio foram feitas marcas com caneta permanente no permeâmetro a cada 2 cm. Os materiais foram dispostos em camadas de 10 cm cada e durante todo o ensaio manteve-se uma carga hidráulica constante por meio de lâmina d'água de 2 cm acima da camada capilar (i.e., do solo). Para todos os ensaios o solo foi compactado visando-se GC de 80% do Proctor normal. Por outro lado, o RCD recebeu diferentes tipos de tratamento para cada ensaio, conforme pode-se observar no Quadro 2. Ressalta-se que o uso de GC de 80% para o solo está de acordo com outros trabalhos de testes experimentais de barreira capilar, como (COSTA; et al., 2018; MACIEL; JUCÁ, 2011).

Quadro 2. Resumo das características dos materiais dos ensaios de coluna.

Ensaio	Solo	RCD
1	GC=80% do Proctor normal	Umidade higroscópica ($\approx 2,2\%$); Sem extração de finos; Compactação manual, sem controle da energia.
2	GC=80% do Proctor normal	Umidade higroscópica ($\approx 2,2\%$); Extração de 10% de material por peneiramento (material passante na #50=0,3 mm); Compactação manual, sem controle da energia.
3	GC=80% do Proctor normal	Umidade higroscópica ($\approx 2,2\%$); Extração de 20% de material por peneiramento (material passante na #50=0,3 mm); Compactação manual, sem controle da energia.
4	GC=80% do Proctor normal	Umidade higroscópica ($\approx 2,2\%$); Extração de 20% de material por lavagem (material passante na #200=0,075 mm); Compactação manual, sem controle da energia.
5	GC=80% do Proctor normal	Umidade higroscópica ($\approx 2,2\%$); Material de usina de processamento de Cascavel-PR; Compactação manual, sem controle da energia.

De cada um dos ensaios foram coletadas amostras em cápsulas de alumínio de volume conhecido, para cálculo da densidade seca e, conseqüentemente, do grau de compactação atingido (Figura 15).

Figura 15. Ensaio de coluna e coleta de amostras. (a) Ensaio em andamento. (b) Coleta de amostras de solo. (c) Coleta de amostras de RCD. (d) Amostras para secagem em estufa.

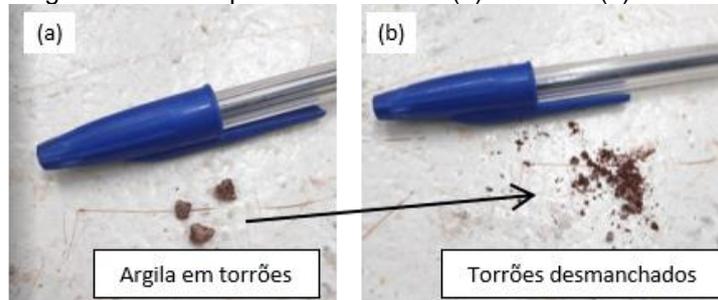


Fonte: Acervo do autor.

No Quadro 2 é possível observar que ao todo foram realizados 5 ensaios de coluna. As diferentes abordagens entre peneiramento do RCD em malha #50 e lavagem em malha #200 deu-se devido à identificação de argila em torrões na amostra (Figura 16), fator atribuído ao método de coleta do material. Desta forma visou-se avaliar se a presença dos torrões de argila teria influência na eficiência da BC. Ademais, realizou-se um ensaio com RCD de diferente origem, que recebeu o devido tratamento para os diversos usos da indústria da construção (ensaio 5). Mesmo para tal RCD, também identificou-se pequena quantidade de argila em

torrões, provavelmente porque determinados elementos quando demolidos apresentam solo agregado a ele (como baldrame).

Figura 16. Argila em torrões presente no RCD. (a) Torrões. (b) Torrões desfeitos.



Fonte: Acervo do autor.

Assim, ao realizar-se os ensaios 1, 2 e 3 (com peneiramento), fez-se um comparativo das curvas granulométricas do material somente com peneiramento, sem eliminação dos torrões, versus peneiramento após lavagem na #200. Tais curvas foram denominadas na discussão dos resultados como curvas granulométricas “falsas” e “verdadeiras”, respectivamente.

Por fim, após realização deste ensaio, selecionou-se a disposição/configuração que apresentou maior tempo de permanência de interface das camadas (maior eficiência da barreira capilar) para utilização no modelo reduzido, detalhado no próximo tópico.

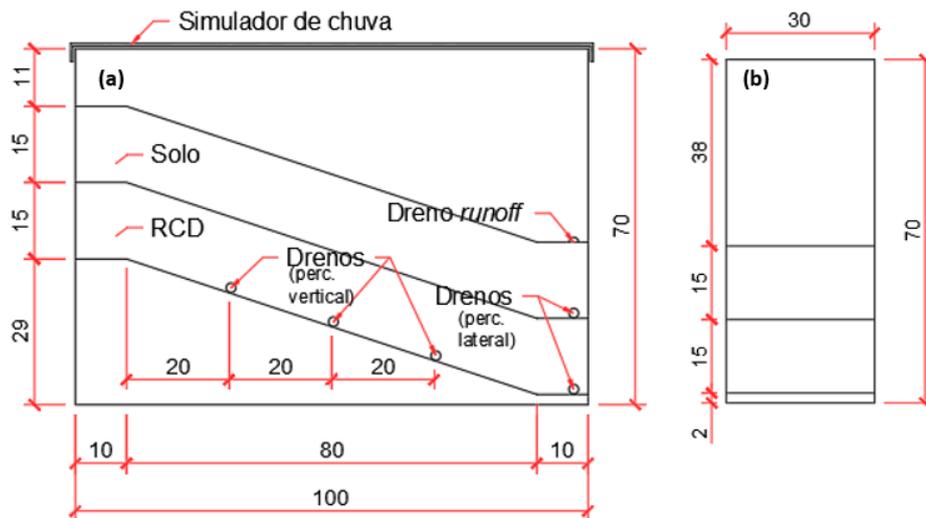
4.4 Modelo reduzido

Tendo em vista que as células de aterros sanitários em geral são executadas com inclinação, elaborou-se um modelo físico reduzido para avaliar o desempenho do SBC com RCD em tais condições (i.e., com inclinação), bem como analisar a influência da umidade inicial de compactação do RCD para funcionamento do sistema.

Apesar de não ser uma metodologia normatizada, a técnica dos modelos reduzidos laboratoriais vem sendo utilizada por diversos autores (KÄMP; MONTENEGRO, 1997; KÄMPF; HOLFELDER; MONTENEGRO, 2003; ALMEIDA, 2011; IZZO; MAHLER; ROSE, 2013; NG et al., 2015) para o estudo de SBCs. A ideia geral desta técnica consiste em executar as camadas do SBC dentro de uma caixa, simular precipitações e realizar medições do volume de água percolado no sistema, ao longo do tempo, por meio de drenos inseridos em diferentes posições na caixa. Conhecendo-se o volume de entrada de água (ao simular a precipitação) e o volume de saída ao longo do tempo (coletado pelos drenos) é possível verificar a eficiência do sistema.

Inicialmente fez-se um projeto das dimensões do modelo reduzido, em planta, com base nas limitações de espaço do laboratório disponível, chegando-se a uma caixa de 0,3 x 1,0 m. Em seguida, fixou-se uma altura limite para a caixa, de 0,7 m, de maneira que fosse possível acessar seu fundo para montagem do dreno no pé da camada de bloqueio. Na Figura 17 pode-se observar o projeto da caixa.

Figura 17. Projeto do modelo reduzido. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

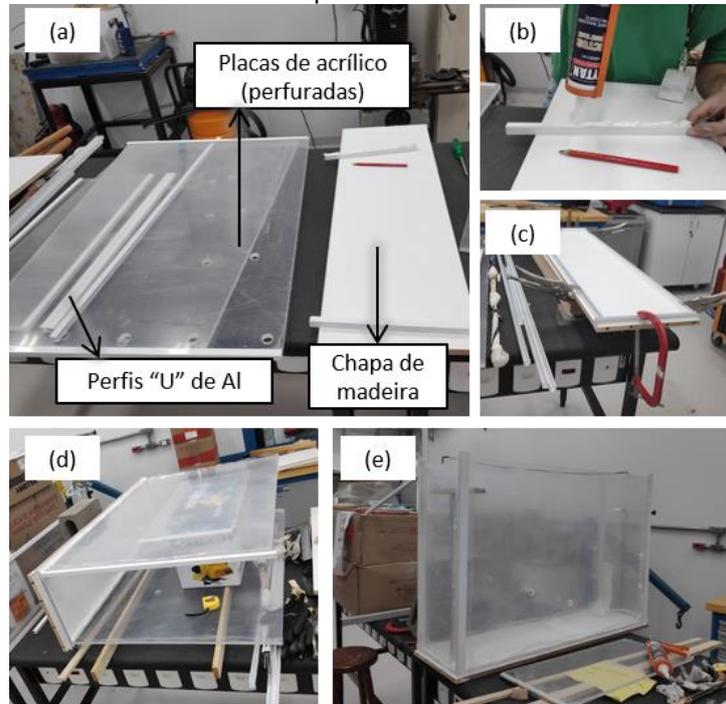


Abaixo da camada de RCD (indicada) usou-se areia como material de preenchimento, para proporcionar a inclinação necessária (de 18°).

Fonte: Acervo do autor.

Para montagem da caixa utilizou-se acrílico 10 mm para as faces laterais e chapa de madeira 12 mm para o fundo. As chapas de acrílico e de madeira foram fixadas entre si por meio de perfis "U" de alumínio (Al) e adesivo elástico branco à base de polímero MS (silyl modified) (Figura 18). Destaca-se que a chapa de acrílico foi perfurada nos pontos de passagem dos drenos previamente à colagem das faces da caixa.

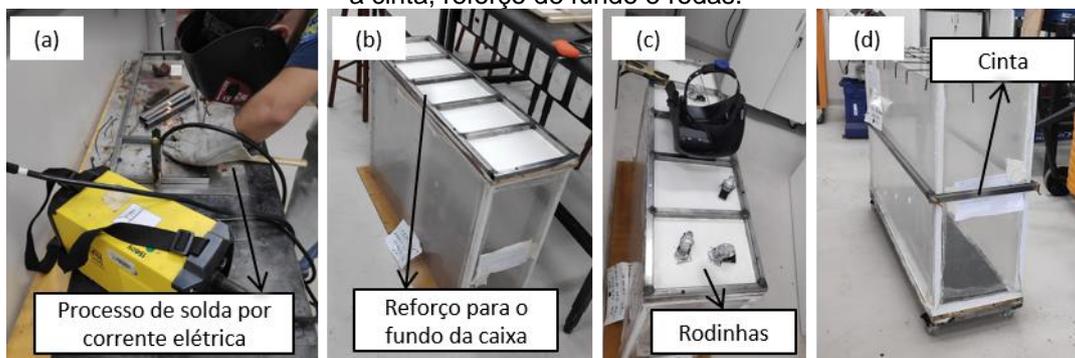
Figura 18. Montagem da caixa (modelo reduzido). (a) Materiais utilizados. (b) Colagem do perfil “U” na chapa de madeira (fundo), com o adesivo elástico. (c) Processo de cura do adesivo no contato entre os perfis e chapa de madeira. (d) Colagem das placas acrílicas laterais. (e) Colagem das placas acrílicas da parte de trás e frontal.



Fonte: Acervo do autor.

Para evitar o arqueamento excessivo das faces laterais da caixa diante de seu preenchimento com os materiais da barreira capilar (solo e RCD) fez-se uma cinta com perfil de ferro 30 mm soldado, posicionada na metade da altura da caixa. Ademais, o mesmo tipo de perfil de ferro foi utilizado para reforçar o fundo de madeira da caixa, para evitar que este cedesse diante da compactação de material nas etapas futuras (descritas adiante). Também foram fixadas 4 rodas nas esquinas da caixa, para facilitar sua locomoção quando necessário, em etapas prévias à simulação da chuva no experimento (Figura 19).

Figura 19. Montagem dos reforços em perfil metálico 30 mm para a caixa. (a) Processo de soldagem do perfil. (b) Reforço para o fundo da caixa. (c) Soldagem das rodas no fundo da caixa. (d) Caixa com a cinta, reforço de fundo e rodas.



Fonte: Acervo do autor.

Após montagem da caixa, a chapa de madeira do fundo foi impermeabilizada com emulsão asfáltica e, após cura da emulsão, a caixa foi preenchida com areia, para moldagem da inclinação das camadas da barreira capilar. Usou-se inclinação de 1:3 (H:V), aproximadamente 18°, por ser usual para taludes de aterros. Acima da camada de areia utilizou-se chapas de madeira, para isolar este material. O contato entre madeira e acrílico foi vedado com silicone acético e as chapas de madeira também receberam uma fina película de silicone (para impermeabilizá-las). Para este caso não foi utilizada emulsão asfáltica, pois esta reage com o silicone acético, tendo seu processo de cura impedido.

Figura 20. Término da montagem da caixa. (a) Impermeabilização do fundo com emulsão asfáltica. (b) Ilustração da reação entre o silicone acético e emulsão asfáltica. (c) Preenchimento da caixa com areia, na inclinação 1:3. (d) Inserção de chapas de madeira sobre a camada de areia. (e) Vedação do contato chapa de madeira-acrílico e aplicação de película sobre as chapas com silicone acético.



Fonte: Acervo do autor.

Procedeu-se com a execução dos drenos do sistema, a partir de tubo PVC 20 mm perfurados ao longo do comprimento de coleta de água. Conforme evidenciado no projeto (Figura 17) foram executados 6 drenos para o sistema, 3 deles para drenagem de percolação vertical na camada de bloqueio (RCD), 2 para percolação horizontal (no pé de cada uma das camadas, capilar e de bloqueio) e 1 de escoamento superficial, *runoff* (em específico para este dreno fez-se uma abertura completa ao longo de seu comprimento, devido ao maior volume de água a ser coletado). Para direcionamento da água para recipientes coletores utilizou-se conexão do tipo joelho 1/2" associado a uma mangueira flexível. De maneira a garantir imobilização dos drenos, estes transpassaram as duas faces laterais da caixa, sendo a altura dos orifícios em cada face da caixa com uma pequena diferença para garantir caimento da água para um dos lados ($i=1\%$) (Figura 21).

Figura 21. Drenos utilizados no modelo reduzido. (a) Confeção dos drenos. (b) Detalhe do dreno de runoff, aberto ao longo de todo seu comprimento. (c) Dreno transpassando as duas faces laterais da caixa. (d) Mangueira associada ao dreno, direcionando a água para os coletores.

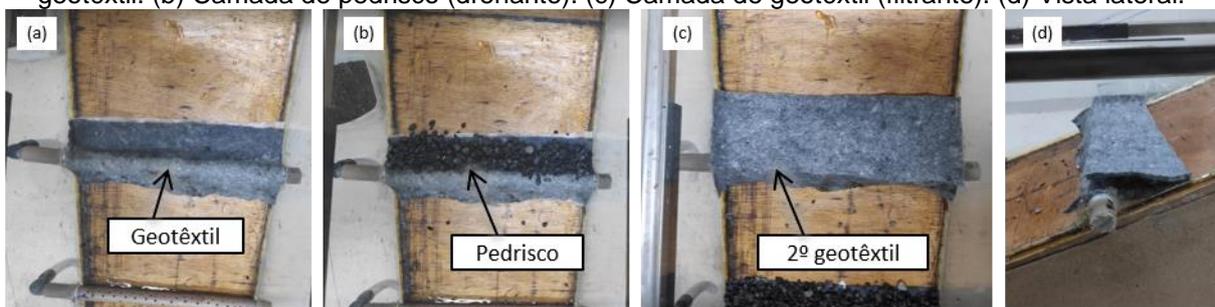


Fonte: Acervo do autor.

Ao inserir os drenos na caixa (os inferiores, de percolação vertical e lateral da camada de RCD) verificou-se uma pequena distância entre o dreno e a chapa de madeira. Para garantir que estes realmente coletassem a água (i.e., que essa não escorresse por baixo do dreno), aplicou-se uma barreira de silicone abaixo do dreno.

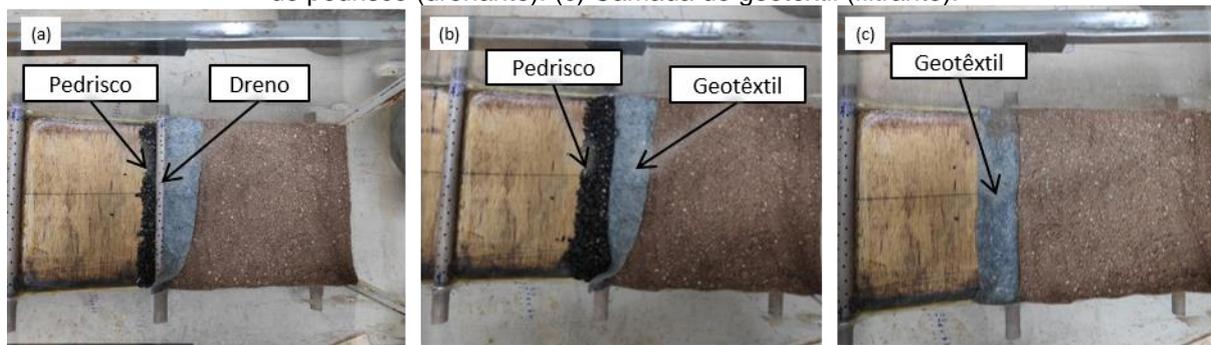
No primeiro teste do modelo reduzido, os drenos foram envoltos em geotêxtil (para evitar que o pedrisco, camada drenante, que viria logo em seguida obstruísse os orifícios do dreno), aplicou-se camada de pedrisco e novamente outra de geotêxtil (camada filtrante) (Figura 22). Foram realizados testes para verificar funcionamento dos drenos e possíveis vazamentos. Nos pontos necessários aplicou-se nova demão de silicone. Nos demais ensaios do modelo reduzido, aplicou-se camada de pedrisco diretamente sobre o dreno, envolta posteriormente em geotêxtil (Figura 23).

Figura 22. Disposição dos drenos inferiores do modelo reduzido, proposta 1. (a) Camada inicial de geotêxtil. (b) Camada de pedrisco (drenante). (c) Camada de geotêxtil (filtrante). (d) Vista lateral.



Fonte: Acervo do autor.

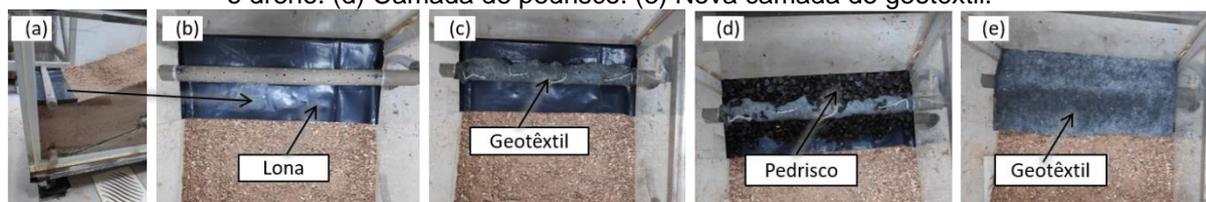
Figura 23. Disposição dos drenos inferiores do modelo reduzido, proposta 2. (a) e (b) Camada inicial de pedrisco (drenante). (c) Camada de geotêxtil (filtrante).



Fonte: Acervo do autor.

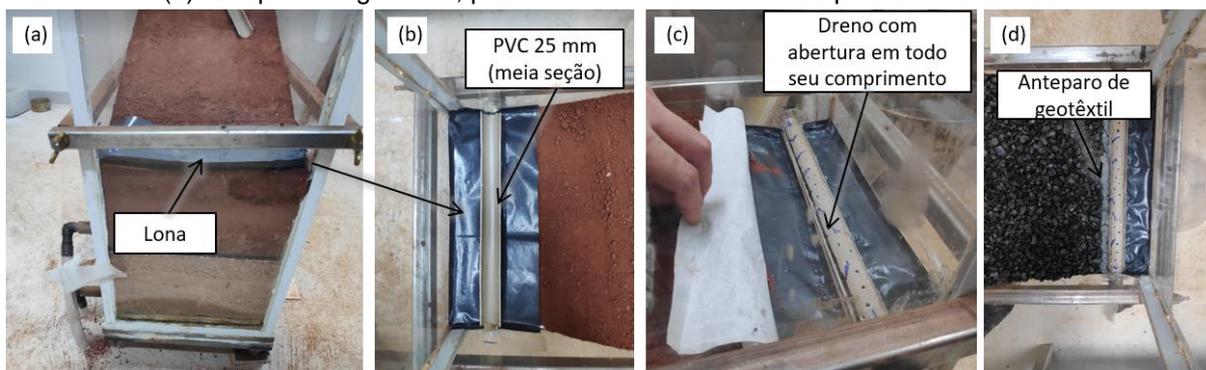
Para os drenos superiores (percolação lateral da camada de solo e *runoff*), empregou-se material impermeável abaixo do dreno, para evitar que a água acumulada nestes pontos fluísse para as camadas inferiores sem ocorrer a coleta apropriada. No primeiro teste usou-se lona fixada com fita adesiva transparente e silicone (Figura 24 e Figura 25).

Figura 24. Dreno lateral da camada de solo. (a) e (b) lona abaixo do dreno. (c) Geotêxtil envolvendo o dreno. (d) Camada de pedrisco. (e) Nova camada de geotêxtil.



Fonte: Acervo do autor.

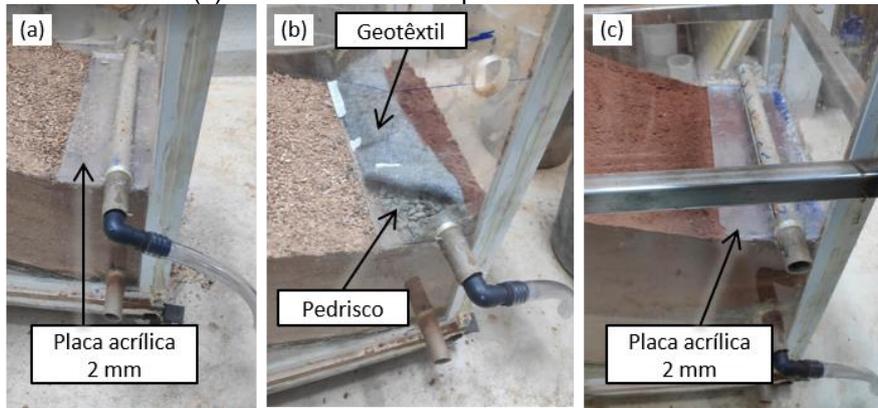
Figura 25. Dreno *runoff*. (a) Lona. (b) Tubo de PVC meia seção (sob o dreno). (c) Dreno. (d) Anteparo de geotêxtil, para evitar entrada de solo ou pedrisco no dreno.



Fonte: Acervo do autor.

Nos demais testes usou-se placa acrílica 2 mm fixada com silicone (sendo esta última técnica mais eficiente). Ademais, a parte inferior do dreno *runoff* foi tampada com tubo PVC (meia seção) de 25 mm (Figura 26).

Figura 26. Drenos de percolação lateral da camada capilar e *runoff*. (a) Dreno de percolação lateral do solo sobre placa acrílica 2 mm. (b) Uso de pedrisco e geotêxtil para envolver o tubo de PVC. (c) Dreno *runoff* sobre placa acrílica 2 mm.

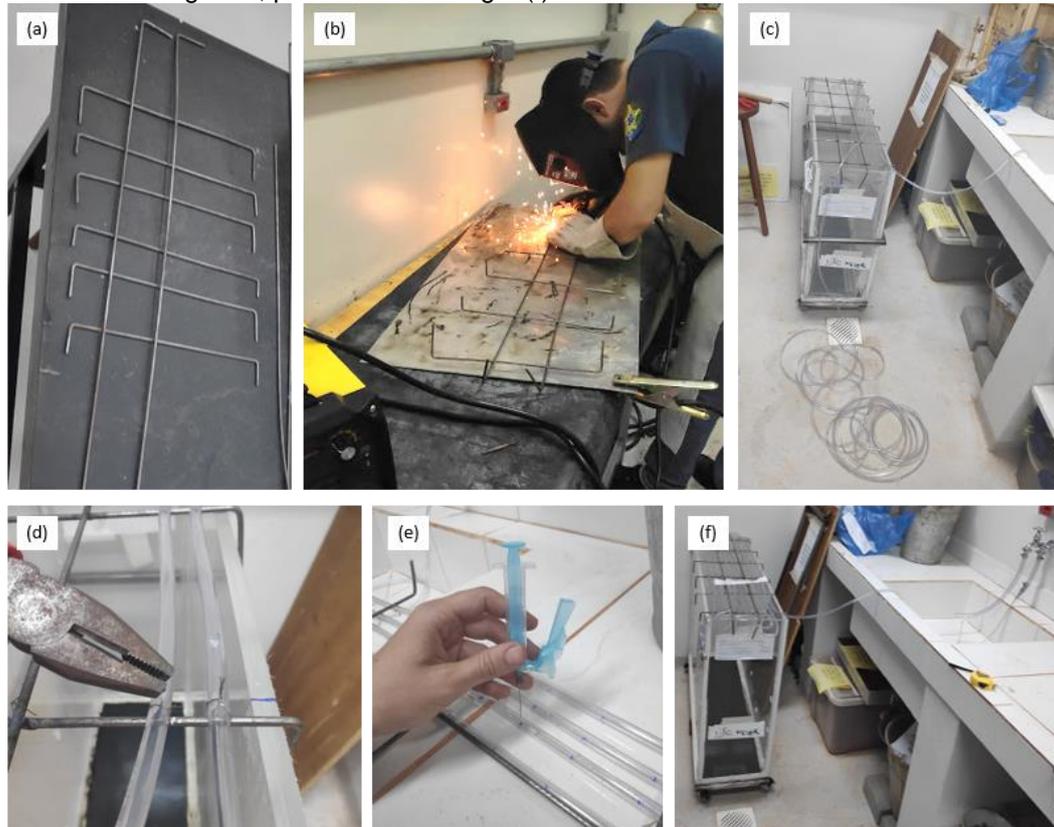


Fonte: Acervo do autor.

Para o simulador de chuva, optou-se pela utilização de uma mangueira 1/4" perfurada, de modo a favorecer o direcionamento da chuva para a área da caixa. Outra possibilidade seria a utilização de bicos aspersores, no entanto estes direcionariam a água para as paredes da caixa (laterais) e não diretamente para as camadas da BC. Ademais, relatos de Izzo (2008) indicam que a opção por bicos aspersores facilitaria a infiltração de água no contato acrílico-solo, prejudicando o ensaio.

Para montagem do sistema de simulação de chuva, executou-se uma grelha de vergalhão 4,8 mm soldada, e a mangueira foi fixada à grelha com o auxílio de arames. Somente após esta etapa foram executados os furos na mangueira, cobrindo 85% do trecho inicial da caixa, devido à relatos de Almeida (2011), de que a ocorrência de chuva em 100% da área da caixa camuflaria os resultados dos drenos (*runoff* e percolação lateral). Para evitar que a vazão/pressão da água fosse muito superior no trecho inicial da mangueira, em comparação com o trecho final, e também que a chuva não fosse extremamente torrencial, os furos foram realizados com agulha de seringa (pequeno diâmetro). Um esquema da montagem pode ser observado na Figura 27.

Figura 27. Simulador de chuva. (a) Vergalhão 4,8 mm. (b) Soldagem dos vergalhões. (c) Mangueira 1/4". (d) Fixação da mangueira à grelha por meio de arames. (e) Realização de furos de pequeno diâmetro na mangueira, por meio de seringa. (f) Sistema abastecido diretamente da torneira.



Fonte: Acervo do autor.

O simulador de chuva foi abastecido diretamente da torneira. Desta forma, para determinação do tempo de chuva mediu-se a vazão do simulador (em bandejas metálicas acima do modelo reduzido) instantes antes do início do ensaio (para evitar grandes discrepâncias devido a variações do sistema de abastecimento hidráulico do laboratório). Conhecendo-se tal vazão, calculou-se o tempo de chuva necessário para atingir um volume que representasse um evento de precipitação de 90 mm. Tal valor foi selecionado com base em um levantamento de dados históricos de precipitação dos últimos 20 anos (i.e., desde jan/1998 a dez/2018) em Foz do Iguaçu-PR (Tabela 1). Como os dados históricos de precipitação foram fornecidos (pelo SIMEPAR (2019)) em volume total diário, adotou-se a classificação de intensidade de chuva proposta por Moreira (2002), que considera, para um período de 24 h, precipitações até 5 mm fracas, de 5,1 mm a 25 mm moderadas; de 25,1 mm a 50,0 mm fortes e a partir de 50,1 mm muito fortes.

Tabela 1. Dados de precipitação no município de Foz do Iguaçu-PR de jan/1998 a dez/2018. (Fonte: elaborada a partir de dados do SIMEPAR (2019)).

	Dias	Ocorrência de precipitações (%)
Total do intervalo (jan/1998 a dez/2018)	7618	---
Total do intervalo com ocorrência de precipitações	2459	100,0%
Precipitações até 5 mm (fracas)	1134	46,1%
Precipitações de 5,1 a 25 mm (moderadas)	813	33,1%
Precipitações de 25,1 a 50 mm (fortes)	366	14,9%
Precipitações a partir de 50,1 mm (muito fortes)	146	5,9%

Dentre os eventos de precipitação, optou-se por simular a ocorrência dos mais severos (i.e., muito fortes), que representam os casos mais extremos. Portanto fez-se uma segunda análise dos dados históricos, considerando somente os eventos a partir de 50,1 mm até o máximo registrado no intervalo (de 182 mm em 18/05/2002) (Tabela 2). Neste novo levantamento observou-se que a partir do intervalo 80,1 mm a 90,0 mm os eventos tornam-se mais esporádicos e, portanto, selecionou-se o valor de 90 mm.

Tabela 2. Ocorrência de precipitações fortes (acima de 50,1 mm) no município de Foz do Iguaçu-PR de jan/1998 a dez/2018. (Fonte: elaborada a partir de dados do SIMEPAR (2019)).

Volume (mm)	Ocorrência (%) em relação aos eventos muito fortes	Ocorrência (%) em relação ao total de eventos
50,1 a 60 mm	42,47%	2,52%
60,1 a 70 mm	17,12%	1,02%
70,1 a 80 mm	14,38%	0,85%
80,1 a 90 mm	6,85%	0,41%
90,1 a 100 mm	5,48%	0,33%
100,1 a 110 mm	5,48%	0,33%
110,1 a 120 mm	1,37%	0,08%
120,1 a 130 mm	2,74%	0,16%
130,1 a 140 mm	0,68%	0,04%
140,1 a 150 mm	0,68%	0,04%
150,1 a 160 mm	2,05%	0,12%
160,1 a 170 mm	0,00%	0,00%
170,1 a 180 mm	0,00%	0,00%
180,1 a 190 mm	0,68%	0,04%

Ao executar as camadas da barreira capilar no modelo reduzido buscou-se manter as mesmas condições de compactação utilizadas nos ensaios de coluna (compactação manual, sem controle da energia para o RCD e 80% do Proctor normal para o solo). Assim, foram confeccionados dispositivos compactadores 10 x 10 cm de madeira para os trechos reto e inclinado da caixa (Figura 28). No caso da camada de solo, determinou-se a quantidade de golpes necessários, a partir da massa do compactador, visando energia de compactação Proctor normal ($\approx 5,7 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$). Fixou-se altura de queda em 40 cm e compactação em três

camadas, de forma que o número de golpes correspondeu a 100 golpes para o trecho reto e 420 para o trecho inclinado. No caso da camada de RCD, não houve controle rigoroso da compactação (assim como descrito para o ensaio de coluna). Para esta camada também foram utilizados os compactadores de madeira (material mais leve), porém sem os elementos de incremento de peso indicados na Figura 28, visando reduzir o efeito de quebra das partículas do RCD.

Figura 28. Dispositivos compactadores. O peso dos compactadores (1,3 kg) mais elementos de incremento (2,4 kg) totalizou cerca de 3,7 kg.



Fonte: Acervo do autor.

Para montagem do experimento, ou seja, a compactação dos materiais, mediu-se a umidade destes e no caso do solo, adicionou-se água até que atingisse umidade para $GC=80\%$, que corresponde a 8%. No caso do RCD, o primeiro ensaio foi realizado com umidade higroscópica do material (na ocasião 1,5%); no segundo ensaio utilizou-se umidade que correspondesse a grau de saturação de 10% (tal umidade foi de 3,5%) e; no terceiro, umidade visando saturação de 20% (i.e., $w= 5,9\%$). Ademais realizou-se um quarto ensaio somente com o solo, de maneira a simular uma camada monolítica, realidade atual do ARSU de Foz do Iguaçu.

Assim, ao todo foram realizados 4 ensaios no modelo reduzido, cujos parâmetros podem ser observados no Quadro 3. Ressalta-se que apesar da definição de volume de chuva de 90mm, para os casos em que ao atingir este valor ainda não fosse verificada a saída de água do dreno de percolação lateral do RCD, manteve-se a chuva até funcionamento do dreno.

Quadro 3. Resumo das características dos materiais dos ensaios do modelo reduzido.

Ensaio	Solo	RCD	Precipitação*
E1	GC=80% do Proctor normal (correspondendo a $\gamma_d=1,5$ kg/dm ³ e w=8%).	Compactação manual, sem controle da energia; Umidade higroscópica ($\approx 1,5\%$).	Vazão do simulador de chuva na data do ensaio: 0,24 L/min (54,5 mm/h) Tempo para 90 mm: 99,2 min Tempo real: 137,7 min Vol. real: 125 mm (33,1 L)
E2	GC=80% do Proctor normal (correspondendo a $\gamma_d=1,5$ kg/dm ³ e w=8%).	Compactação manual, sem controle da energia; Umidade w=3,5%, correspondendo a grau de saturação de 10%.	Vazão do simulador de chuva na data do ensaio: 0,38 L/min (87,5 mm/h) Tempo para 90 mm: 61,7 min Tempo real: 123,0 min Vol. real: 180 mm (46,7 L)
E3	GC=80% do Proctor normal (correspondendo a $\gamma_d=1,5$ kg/dm ³ e w=8%).	Compactação manual, sem controle da energia; Umidade w=5,9%, correspondendo a grau de saturação de 20%.	Vazão do simulador de chuva na data do ensaio: 0,36 L/min (84,4 mm/h) Tempo para 90 mm: 64,0 min Tempo real: 80,0 min Vol. real: 112,5 mm (28,8 L)
E4	GC=80% do Proctor normal (correspondendo a $\gamma_d=1,5$ kg/dm ³ e w=8%).	(Volume preenchido também pelo solo, nas mesmas condições descritas ao lado).	Vazão do simulador de chuva na data do ensaio: 0,38 L/min (87,5 mm/h) Tempo para 90 mm: 61,7 min Tempo real: 70,0 min Vol. real: 102,1 mm (26,6 L)

*Cálculos considerando área interna da caixa que recebe a precipitação ($A=0,2587$ m²) e relação mm=L/m², assim $i = (Q \cdot 60)/A$, onde i: intensidade em mm/h e Q: vazão em L/min.

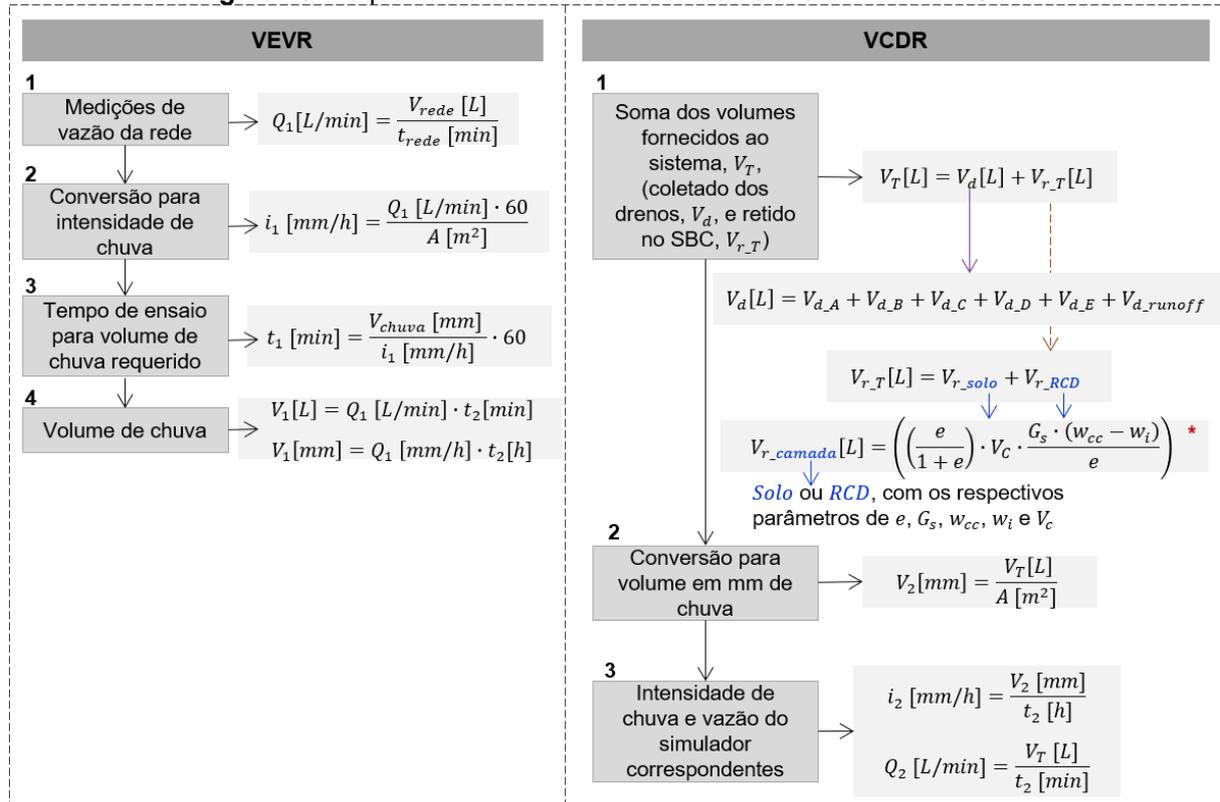
Durante a realização do ensaio foram registrados os tempos de percolação da água nas camadas de solo e RCD, permanência na BC e início do funcionamento dos drenos. Além disso, foram realizadas medições do volume coletado por cada dreno a cada 10 min. após início de seu funcionamento, por um período de 2 h. Posteriormente mediu-se o volume de coleta de cada dreno após 4 h, 8 h e 24h em relação ao início do ensaio, onde verificou-se que somente o dreno D, no pé da camada de RCD continuou operando após finalização do evento de precipitação.

Por fim, após esses registros, foram extraídas amostras do centro da camada (de solo ou RCD) para ensaio da curva de retenção (descrito no item 4.2) e verificação da densidade (e consequentemente do GC). Outro parâmetro verificado foi a capacidade de campo. Para tanto, após finalização do evento de precipitação retirou-se o simulador de chuva da parte superior da caixa e aplicou-se filme plástico, para evitar saída de água por evaporação do sistema.

Ao analisar os valores de volume de água coletado por cada dreno notou-se uma inconsistência no volume de chuva estimado a partir das medições de vazão da rede (Quadro 3), pois somente o volume coletado pelo dreno *runoff* foi maior que esse volume total estimado. Desta forma, a partir dos dados de coleta de cada dreno e de capacidade de campo,

calculou-se um novo valor de volume e intensidade de chuva, para compará-los com os anteriores. Aos valores estimados a partir das medições de vazão da rede, será utilizada a identificação VEVr (valores estimados da vazão da rede) e, aos valores calculados a partir da conferência do volume coletado pelos drenos e retido no material, será utilizada a identificação VCDR (valores conferidos dos drenos mais retenção), ao apresentá-los na discussão dos resultados. Na Figura 29 pode ser observado um esquema do processo de cálculo utilizado em cada um desses casos.

Figura 29. Esquema de cálculo dos volumes de chuva VEVr e VCDR.



* Formulação obtida das relações volumétricas e gravimétricas da mecânica dos solos

Q_1 : vazão do simulador de chuva VEVr
 V_{rede} : volume medido da rede em intervalo específico de tempo (t_{rede}) para estimar Q_1
 t_{rede} : tempo de coleta de V_{rede}
 i_1 : intensidade de chuva VEVr
 t_1 : tempo necessário de ensaio para volume de chuva objetivado
 V_{chuva} : volume de chuva objetivado (90 mm)
 V_1 : volume de chuva VEVr
 t_2 : tempo real de execução do ensaio

$V_{d,ida}$: volume coletado do dreno (A, B, C, D, E ou runoff)
 $V_{r,camada}$: volume retido na camada do SBC (solo ou RCD)
 e : índice de vazios
 G_s : massa específica dos grãos
 w_{cc} : umidade de capacidade de campo
 w_i : umidade inicial de compactação
 V_C : volume total da camada
 V_2 : volume de chuva VCDR
 i_2 : intensidade de chuva VCDR
 Q_2 : vazão do simulador de chuva VCDR

Fonte: Acervo do autor.

Destaca-se que devido a falhas na impermeabilização da caixa e no funcionamento dos drenos para o ensaio E4, não foi possível realizar um comparativo completo deste com os

demais ensaios, motivo pelo qual somente alguns aspectos específicos em relação ao E4 serão levantados na discussão dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos materiais

Os resultados obtidos para o ensaio de gravimetria do RCD indicam que este é constituído majoritariamente por materiais de origem cerâmica (sendo predominante a cerâmica vermelha), conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do ensaio de gravimetria.

Peneira (mm)	% cerâmico	% concreto
38	57,2	42,8
25	71,5	28,5
19	74,0	26,0
9,5	53,3	46,7
Média	64,0	36,0

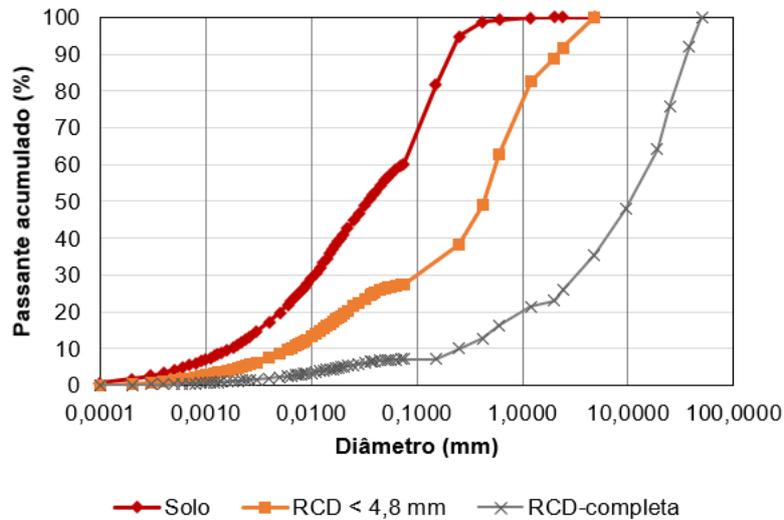
A gravimetria é uma característica particular de cada região de geração dos RCD, desta forma resultados obtidos em diferentes trabalhos podem diferir consideravelmente. Por exemplo, (BIZARRETA; CAMPOS, 2017) utilizaram RCD do município do Rio de Janeiro-RJ com cerca de 76% de materiais oriundos de concreto e 24% cerâmicos (considerando somente a fração graúda), enquanto (BERNARDES; et al., 2008) obtiveram, no município de Passo Fundo-RS, resultados de RCD com 54% de cerâmicos contra 46% de concreto.

Em relação à massa específica dos grãos, obteve-se o valor de 2,71 g/cm³ para o solo e 2,70 g/cm³ para o RCD. Na Tabela 4 pode-se observar os resultados dos diferentes métodos utilizados. Os resultados aproximam-se dos valores encontrados por (BIZARRETA; CAMPOS, 2017) de 2,77 g/cm³ para o solo e 2,64 g/cm³ para o RCD.

Tabela 4. Resultados de massa específica dos grãos.

	Método da bomba de vácuo					Método le chatelier	
Solo	2,69	2,71	2,75	2,67	2,76	2,69	2,69
RCD	2,68	2,74	2,73	2,73	--	2,66	2,65

As curvas granulométricas dos materiais podem ser observadas na Figura 30. Para o RCD são apresentadas 2 curvas, uma completa e outra considerando somente a fração menor do que 4,8 mm (efetivamente utilizada neste trabalho).

Figura 30. Curvas granulométricas dos materiais estudados.

Fonte: Acervo do autor.

Na Tabela 5 observa-se que o RCD miúdo (<4,8 mm) possui alto teor de material fino (passante #200, i.e., silte e argila), o que poderia desfavorecer seu uso em conjunto com o solo para barreira capilar, uma vez que o contraste granulométrico é necessário para funcionamento desta técnica. Por este motivo foram realizados testes da influência do teor de finos do RCD no funcionamento da BC, por meio de ensaios de coluna (cujos resultados serão descritos no próximo tópico).

Tabela 5. Distribuição granulométrica dos materiais conforme ABNT.

	Argila	Silte	Areia	Pedregulho
Solo	11,2	46,0	42,8	0,0
RCD miúdo	4,8	22,1	61,9	11,2

Tendo em vista os resultados dos limites de Atterberg para o solo, de LL=31%, LP=18% e IP=13%, este pode ser classificado segundo o SUCS como uma argila de baixa plasticidade arenosa, CL. Para o RCD miúdo, a classificação unificada indica uma areia bem graduada, SW, tendo em vista que os coeficientes uniforme e de curvatura da curva granulométrica são, respectivamente, $C_u=92,3$ e $C_c=2,56$.

Na Figura 31 são apresentadas as curvas de compactação para energia Proctor normal dos materiais estudados, considerando as situações com e sem reuso de material. Ao lado, na Tabela 6, podem ser observados os parâmetros obtidos destas curvas.

Figura 31. Curvas de compactação do solo e do RCD miúdo.

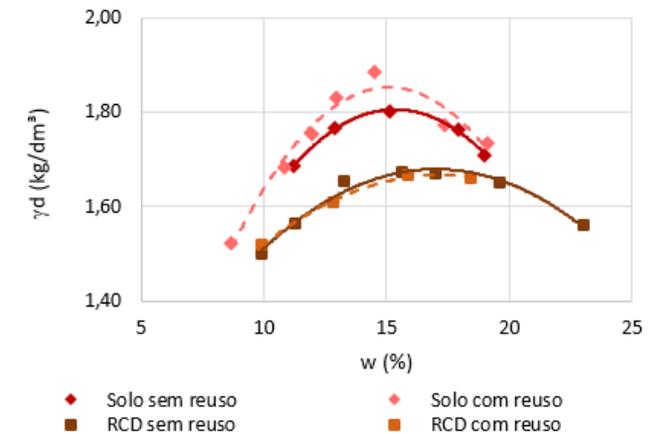


Tabela 6. Parâmetros das curvas de compactação (sem reuso).

	γ_d máx (kg/dm ³)	$W_{ótima}$ (%)
Solo	1,80	15
RCD miúdo	1,68	17

Fonte: Acervo do autor.

Observa-se que a curva para o solo argiloso possui formato de sino, o que está de acordo com Das e Sobhan (2017), que relatam que solos argilosos tipicamente possuem curvas neste formato. O RCD, por outro lado, apresentou os parâmetros de massa específica seca máxima (γ_d máx) e umidade ótima ($W_{ótima}$) próximos dos valores para areias, considerando resultados expostos pelos mesmos autores (DAS; SOBHAN, 2017). Ademais, quase não houve alteração da curva em função do reuso no caso do RCD, no entanto isso não significa que não haja alteração da composição granulométrica do material devido à quebra dos grãos. Para confirmar tal observação seria necessário realizar novamente o ensaio granulométrico após compactação do material.

Em comparação com outros trabalhos com RCD, observa-se grande variação das curvas para este tipo de material. (BIZARRETA; CAMPOS, 2017) por exemplo obtiveram γ_d máx=1,88 kg/cm³ e $W_{ótima}$ =12% e Silva Junior (2010) encontrou γ_d máx=1,60 kg/cm³ e $W_{ótima}$ =21%, o que evidencia novamente a grande variabilidade deste tipo de material, conforme local de obtenção e forma de processamento.

Em relação aos parâmetros hidráulicos dos materiais, os resultados para o solo diferem um pouco de outros encontrados na literatura, para um mesmo tipo de solo (CL), possivelmente devido ao grau de compactação utilizado (80%), que ocasiona maior índice de vazios nas amostras (em comparação com material compactado com GC 100%, usual no preparo de amostras para ensaios de permeabilidade). Tal observação corrobora com Das e Sobhan (2017) que indicam que o índice de vazios influencia na condutividade hidráulica do material. Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade dos materiais à temperatura de 20°C.

Tabela 7. Coeficiente de permeabilidade dos materiais estudados (em cm/s).

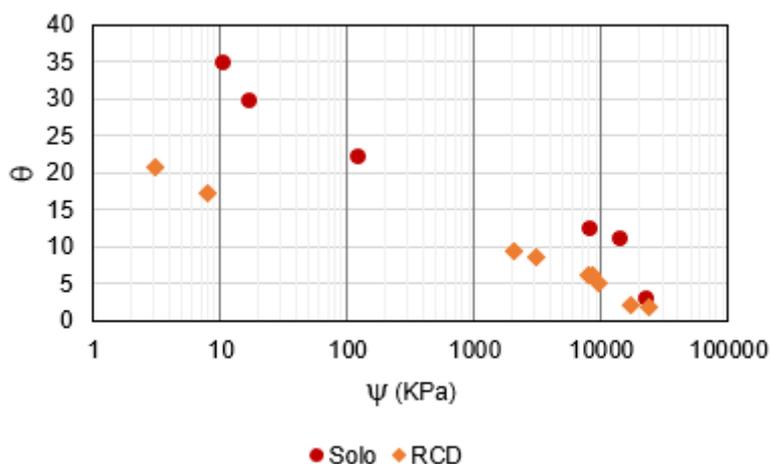
	Solo	RCD miúdo
K_{20° (cm/s)	1,64E-04	1,85E-02

Pinheiro, et al. (2017) apresenta resultados na ordem de $1,0E-06$ cm/s, para um solo CL, porém em seu trabalho utilizou outra técnica de medição (*in situ*) e não indica qual o GC das amostras. Além disso a amostra utilizada neste trabalho possui considerável porcentagem de areia, conforme evidenciado na Tabela 5. Este resultado também evidencia a problemática da utilização das coberturas finais monolíticas para aterros sanitários, da dificuldade de atingir permeabilidades baixas (menores a $1E-07$ cm/s) para o solo.

O RCD, por sua vez, apresentou novamente resultado que se assemelha aos valores encontrados para areias na literatura (DAS; SOBHAN, 2017). Tal resultado também foi próximo aos encontrados por Barros (2005) para amostras de RCD não compactadas, na ordem de $1,0E-03$ cm/s. No entanto, para amostras compactadas o mesmo autor apresentou resultados de até $1,0E-07$ cm/s. (BIZARRETA; CAMPOS, 2017) encontraram $1,0E-06$ cm/s, o que evidencia outra vez a questão da grande variabilidade nos resultados encontrados para RCD de diferentes origens/tratamentos.

Quando observados os resultados de curva característica (Figura 32), nota-se que o solo possui maior capacidade de retenção de água quando comparado ao RCD, pois para um mesmo potencial (por exemplo 10000 kPa), o solo apresenta maior teor de umidade que o RCD. Ademais, o solo apresenta maiores valores de sucção para uma mesma umidade; por exemplo, para $\theta=10$ o solo possui sucção de aproximadamente 20000 kPa, enquanto o RCD 2000 kPa, o que indica a potencial formação de barreira capilar entre os dois materiais (considerando uso de solo como camada capilar e RCD como bloqueio), pois em condições não saturadas o fluxo seria favorecido na camada de solo (a capilar), devido à menor energia no material. Ressalta-se que a amostra de RCD utilizada corresponde ao tratamento com 20% de peneiramento em malha #50 (mesmo tratamento do E3 do ensaio de coluna e dos ensaios no modelo reduzido).

Figura 32. Curva de retenção dos materiais estudados.



Fonte: Acervo do autor.

Ao observar outros resultados da literatura, para solos argilosos, apresentam-se variações nas curvas obtidas para diferentes autores (KRISDANI; RAHARDJO; LEONG, 2005; BIZARRETA; CAMPOS, 2017), porém para esclarecer tal questão seria necessário um estudo da microestrutura do material.

No que concerne o RCD, apesar deste apresentar granulometria e parâmetros de grau de compactação e permeabilidade que se assemelham às areias, possui um formato um pouco distinto de curva característica, com maior capacidade de retenção de água do que areias, o que está de acordo com os resultados observados também por (BIZARRETA; CAMPOS, 2017). Isso ocorre, possivelmente, devido à microporosidade de suas partículas, isto é, as partículas também retêm água internamente e não somente ao seu redor. Porém, para conhecer em maiores detalhes este fenômeno, mais estudos seriam necessários.

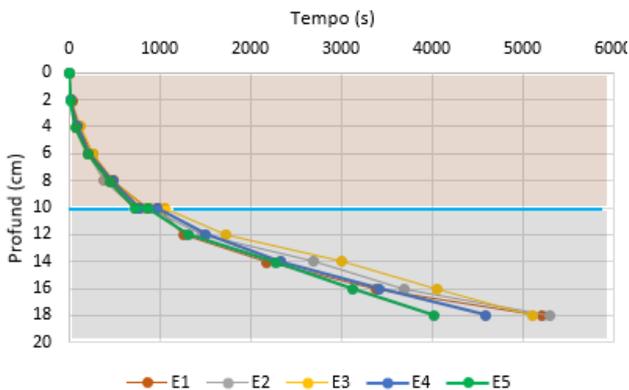
5.2 Ensaio de coluna

Por meio dos ensaios de coluna foi possível medir as velocidades de percolação da água nas camadas capilar (solo argiloso) e de bloqueio (RCD), bem como o tempo até quebra da barreira capilar na interface dos materiais. Na Tabela 8 é possível observar estes resultados, bem como a massa específica seca medida após realização do ensaio para conferência do grau de compactação. O grau de compactação somente é apresentado no caso do solo, pois para o RCD não houve um controle da energia visando GC específico.

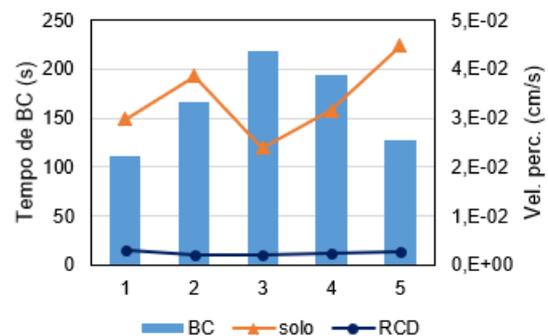
Tabela 8. Resultados dos ensaios de coluna.

	Vel. perc. (cm/s)		Permanência na BC (s)	γ_d (kg/dm ³)		GC
	solo	RCD		solo	RCD	
E1	2,98E-02	3,07E-03	112	1,496	1,320	83,1%
E2	3,86E-02	2,09E-03	166	1,412	1,447	78,4%
E3	2,39E-02	2,09E-03	219	1,419	1,245	78,8%
E4	3,16E-02	2,42E-03	194	1,419	1,356	78,8%
E5	4,48E-02	2,77E-03	128	1,348	1,383	74,9%

Observa-se que apesar de haver variações nas velocidades de percolação entre os diferentes ensaios realizados, estas apresentam-se na mesma escala para cada material, entre 2,39E-02 cm/s e 4,48E-02 cm/s para o solo e, entre 2,09E-03 cm/s e 3,07E-03 cm/s para o RCD e os GC obtidos nos diferentes ensaios também foram próximos entre si. Ademais, para o RCD a velocidade de percolação apresentou-se mais uniforme ao longo da coluna, em comparação ao solo, o que pode ser observado na Figura 33 com o formato da curva que relaciona o tempo com a profundidade de percolação (solo= 0 a 10 cm e RCD=10 a 20 cm). Os resultados de velocidade de percolação, por sua vez, juntamente com o tempo de funcionamento da BC, estão ilustrados na Figura 34.

Figura 33. Curvas que relacionam tempo e profundidade de percolação, para os diferentes ensaios de coluna.

Fonte: Acervo do autor.

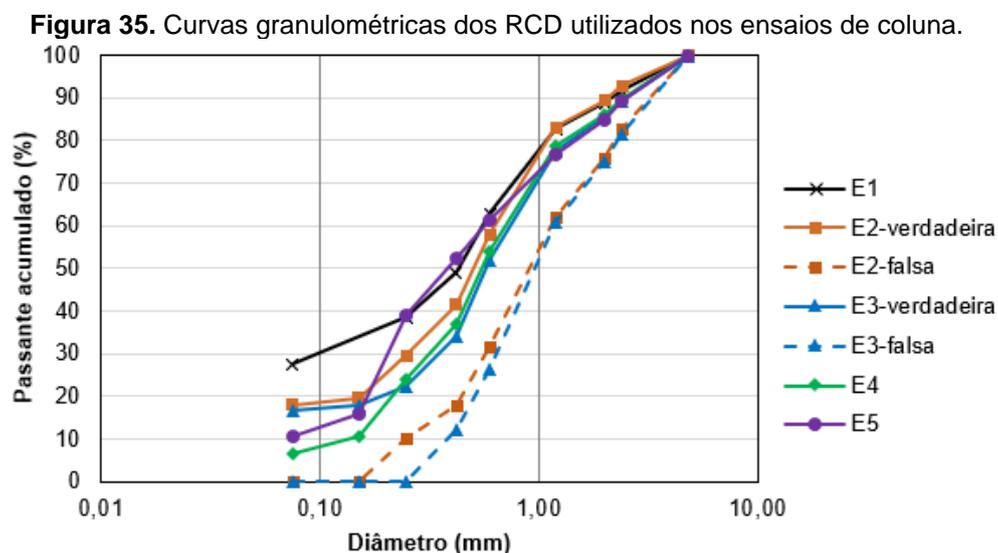
Figura 34. Tempo de permanência do fluxo na BC e velocidades médias de percolação no solo e no RCD.

Fonte: Acervo do autor.

Considerando o tempo de permanência do fluxo na interface dos materiais (solo e RCD) os resultados indicam que quanto menor a quantidade de partículas mais finas no RCD, melhor o funcionamento da barreira capilar. Observa-se que para o RCD sem tratamento (E1) o tempo na BC foi de somente 112 s e ao remover 10% (E2) e 20% (E3) das partículas passantes na #50 esse tempo aumentou cerca de 50% e 95%, respectivamente, em relação ao material de referência (E1). Tal fato está de acordo com o esperado, em que o

funcionamento adequado das BC depende do contraste granulométrico entre os materiais utilizados.

Ressalta-se que a opção pela peneira #50 deu-se devido à presença de argila em torrões no RCD (conforme relatado na metodologia, Figura 16), que somente são eliminados diante do processo de lavagem (utilizado para caracterização granulométrica). Assim, ao realizar o ensaio de granulometria detectou-se presença de 27% de material passante na #200, porém não é possível remover tal quantidade de material por peneiramento nesta mesma malha, pois as partículas encontram-se aglomeradas. Na realidade apenas seria possível remover 4% de material com a #200. Na Figura 35 são apresentadas as curvas granulométricas verdadeiras (obtidas por processo de lavagem, que elimina os torrões) e as falsas (obtidas somente por peneiramento, sem lavagem prévia).



Fonte: Acervo do autor.

Observa-se que para o RCD utilizado no E2 a porcentagem real de finos é de 18% e, para o E3, de 16% (Figura 35), enquanto que para a amostra submetida ao processo de lavagem (E4), esse valor cai para 7%. Apesar disto, o tratamento do RCD por lavagem na #200 (E4), visando a eliminação dos torrões de argila não alterou de forma considerável os resultados, do ponto de vista do funcionamento da barreira capilar. Ou seja, o tempo de permanência na BC, comparando E3 (peneiramento) e E4 (lavagem) são semelhantes, podendo-se sugerir que, neste caso, a presença de argila em torrões na amostra não alterou significativamente os resultados, talvez porque não houve controle rigoroso de compactação deste material, o que diminuiu o fenômeno de quebra destes torrões.

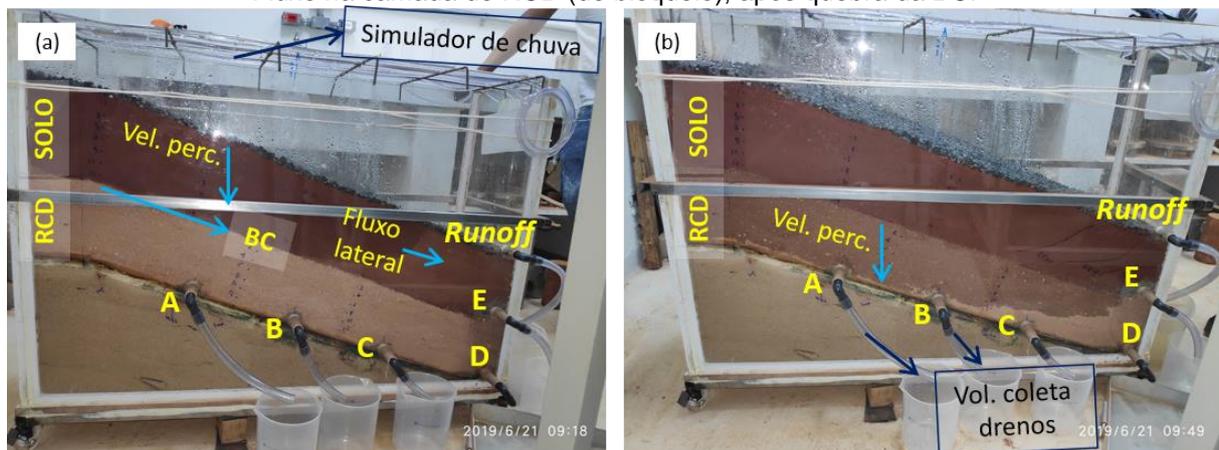
Em relação à última amostra analisada (E5), um RCD oriundo de usina de processamento (com presença de argila em torrões quase nula), nota-se eficiência da BC inferior

(considerando tempo de permanência na interface dos materiais) quando comparada aos demais resultados do RCD com tratamento por peneiramento ou lavagem. Comparando com E3 (tratamento por peneiramento), o tempo de permanência na BC em E5 é cerca de 40% inferior e, em relação à E4 (tratamento por lavagem), 35% inferior. Desta maneira selecionou-se o mesmo tratamento do E3 para utilização do RCD no modelo reduzido.

5.3 Modelo reduzido

A partir dos ensaios realizados no modelo reduzido verificou-se a influência da umidade inicial (de compactação) para o RCD. Para interpretação dos resultados foram registrados os valores de velocidade de percolação vertical do fluxo nas duas camadas (capilar e de bloqueio), tempo de funcionamento da barreira capilar formada entre os dois materiais, volumes de água coletados pelos drenos e avanço lateral do fluxo (ensaios E2 e E3). Na Figura 36 pode-se observar um esquema geral do ensaio.

Figura 36. Esquema geral do ensaio no modelo reduzido. (a) Fluxo na camada capilar (solo). (b) Fluxo na camada de RCD (de bloqueio), após quebra da BC.



Fonte: Acervo do autor.

Na Tabela 9 são apresentados alguns destes resultados. Além disso, após realização de cada ensaio, foram coletadas amostras em cápsulas metálicas para estimativa da capacidade de campo de cada material e verificação das densidades, cujos valores também estão na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados dos ensaios do modelo reduzido.

	Vel. perc. (cm/s)		Permanência na BC (s)	γ_d (kg/dm ³)		GC	W _{capcampo} (%)	
	solo	RCD		solo	RCD		solo	solo
E1 w=1,5%	9,29E-03	2,86E-03	178	1,51	1,4	83,8%	23,9	15,7
E2 w=3,5%	1,43E-02	2,87E-03	179	1,48	1,38	82,2%	22,5	17,0
E3 w=5,9%	1,38E-02	7,24E-03	95	1,47	1,38	81,7%	23,5	16,3

5.3.1 Velocidades de percolação e tempo de permanência na BC

As velocidades de percolação no solo foram próximas entre si, o que era esperado, uma vez que todos os ensaios foram preparados com as mesmas condições (de grau de compactação) para tal camada. No entanto, em comparação com os ensaios de coluna, observa-se que no modelo reduzido os valores de velocidade de percolação para o solo foram menores ($\approx 2,7$ vezes menores quando comparados a um valor médio dos ensaios de coluna de $3,37E-02$ cm/s), possivelmente devido à ocorrência de fluxo também no sentido lateral (e não somente verticalmente, como nas colunas). Diz-se que ocorreu um fluxo lateral, pois o simulador de chuva contempla a área total da caixa, conforme explicitado na metodologia, no entanto no decorrer do ensaio pôde-se observar o fluxo de água em toda a camada de solo. Na Figura 37 podem ser visualizadas imagens do fenômeno de avanço lateral do fluxo observado, na camada de solo argiloso.

Figura 37. Avanço lateral do fluxo na camada capilar.



Fonte: Acervo do autor.

Tendo em vista esse fenômeno, mediu-se o tempo do avanço desse fluxo lateral, para determinadas distancias, o que permitiu o cálculo da velocidade de percolação lateral, cujo valor foi de $2,94E-02$ cm/s para o E2, $2,28E-02$ cm/s para o E3 e $2,22E-02$ cm/s para o E4. No primeiro teste realizado, tal fenômeno não foi notado a tempo de serem feitos registros, no

entanto as observações em E2, E3 e E4 indicam que o dreno *runoff* somente passa a operar após chegada do fluxo lateralmente, sob o dreno.

Reforça-se o comentário da seção de materiais e métodos de que o ensaio E4 apresentou problemas na impermeabilização e nos drenos, motivo pelo qual ele não foi apresentado na Tabela 9, pois somente alguns pontos específicos deste ensaio serão abordados.

Ainda em relação a Tabela 9, os resultados indicam que quanto maior a umidade inicial de compactação do RCD (e conseqüentemente seu grau de saturação), maior a velocidade de percolação por este material, pois os poros possuem maior volume de água, não tendo a necessidade de serem preenchidos (questão da microporosidade citada acima). No entanto os resultados entre E1 e E2 foram próximos e somente com E3 fez-se essa observação, o que indica a necessidade da realização de mais ensaios com diferentes teores de umidade para confirmar tal afirmação.

Os resultados de tempo de permanência na BC também apresentam valores próximos para E1 e E2, sendo E3 mais contrastante, o que poderia indicar que quanto maior a umidade inicial de compactação da camada de bloqueio, menor o tempo de funcionamento da barreira capilar. Porém novamente seria indicada a realização de outros ensaios com diferentes teores de umidade, para corroborar esta observação.

Outra possibilidade de interpretação para estes resultados é que os valores de velocidade de percolação e tempo de funcionamento da barreira capilar se mantem constantes para menores umidades iniciais de compactação (por exemplo, até 3,5%) e para maiores umidades (próximos a 6%) tais valores se modificam (a velocidade de percolação aumenta e tempo de BC diminui).

Ademais, pôde-se fazer uma comparação entre os tempos de BC do modelo reduzido E1 com a coluna E3 (condições de $w\%$ do RCD bem semelhantes), sendo o tempo da barreira inclinada levemente menor do que a barreira da coluna, diferentemente do que era esperado, de que a presença de inclinação melhoraria o funcionamento da BC, devido à possibilidade de fluxo lateral na interface dos materiais (mesmo que em pequena escala). Autores como (KRISDANI; RAHARDJO; LEONG, 2005; BIZARRETA; CAMPOS, 2017) também relatam em suas pesquisas de que o uso de material coesivo em barreiras capilares não proporciona valores apreciáveis de percolação lateral na interface dos materiais. No entanto, devido capilaridade mais acentuada proporcionada por este tipo de material, possuem a vantagem de apresentar o fluxo lateral antes da chegada na interface das camadas (conforme ilustrado na Figura 37).

5.3.2 Capacidade de campo

Com relação à capacidade de campo, ambos os materiais apresentaram resultados consideráveis, ou seja, manifestaram boa capacidade de armazenamento de água. Para o solo obteve-se cerca de 23,3% ($\theta_{cc} \approx 35$), valor este superior ao do RCD, que foi de 16,3% ($\theta_{cc} \approx 23$), o que está em concordância com os resultados de curva característica, onde observou-se que o solo tem maior capacidade de reter água. Além disso, diz-se que o RCD também apresenta considerável capacidade de campo (θ_{cc}), pois o resultado encontrado é superior a valores consultados na literatura (COSTA, et al; 2013) para areias (solo com as menores θ_{cc} , variando de 16 a 19).

Vale ressaltar que a capacidade de campo representa a umidade na qual o fluxo de água deixa de ocorrer devido às forças gravitacionais e, as forças mátricas tornam-se responsáveis pelo movimento da água na massa de solo (WEIL; BRADY, 2017), representando assim o volume máximo de água que a massa de solo é capaz de reter (sem que haja drenagem). Esta poderia ser outra vantagem do uso de solos com textura argilosa em barreiras capilares, isto é, sua maior capacidade de reter água, resultando em menores volumes para a camada de bloqueio, para chuvas que não excedam a capacidade de campo de ambas as camadas em conjunto.

Assim, calculou-se o volume de chuva (em mm) que seria retido em cada uma das camadas do SBC (considerando as espessuras utilizadas e umidade inicial dos materiais), chegando-se a valores médios de 32,8 mm na camada capilar (solo) e 28,3 mm, 27,0 mm e 20,8 mm na camada de bloqueio (RCD) para E1, E2 e E3, respectivamente, indicando que chuvas de até 61,2 mm podem ser completamente retidas no material, no caso de E1 (com as condições do ensaio).

Considera-se tal resultado satisfatório, pois o SBC proposto é capaz de reter eventos de precipitação considerados muito fortes (classificação de precipitação apresentada na metodologia) com 17% de ocorrência (dentre os eventos muito fortes, Tabela 2) e somente 1% de ocorrência (dentre todos os eventos). Vale ressaltar que na prática os materiais estariam expostos ao meio e, portanto, suscetíveis a outras umidades, dependendo das condições climáticas, o que acarretaria em diferentes resultados de volume de chuva retido nas camadas.

Além disso, também estimou-se a capacidade de retenção no caso da cobertura monolítica simulada com E4, que resultou em 65,6 mm (o dobro da camada capilar), sendo este resultado bem próximo ao da proposta com RCD, apesar da maior capacidade de retenção do solo,

indicando que, deste ponto de vista, a cobertura proposta neste trabalho é passível de utilização.

A partir dos dados de capacidade de campo, umidade inicial dos materiais e volume de água coletado por cada dreno, calculou-se o volume total de água fornecido pela precipitação e, considerando o tempo do ensaio, calculou-se novamente qual teria sido a intensidade e volume da chuva (cálculos VCDR), para confrontá-los com os valores estimados por meio de medições da vazão da rede de abastecimento (VEVR) e ambos são apresentados na Tabela 10. Observa-se que os valores VCDR são diferentes (superiores) aos VEVR, porém são próximos entre si considerando a intensidade da chuva, permitindo comparação entre os resultados dos diferentes ensaios no modelo reduzido.

Tabela 10. Comparação entre parâmetros VEVR e VCDR da simulação de chuva.

	VEVR					VCDR			
	Q_1 (L/min)	i_1 (mm/h)	t_2 (min)	V_1 (mm)	V_1 (L)	V_d (L)	$V_{r,T}$ (L)	V_T (mm)	i_2 (mm/h)
E1	0,24	54,50	137,70	125,08	33,05	38,34	16,17	210,70	91,81
E2	0,38	87,50	123,00	179,38	46,74	38,79	15,03	208,02	101,47
E3	0,36	84,40	80,00	112,53	28,80	17,43	13,97	121,37	91,03

A identificação das variáveis está indicada na Figura 29.

O volume de chuva real do ensaio (em mm) foi superior às condições idealizadas na metodologia, distanciando-se da realidade de Foz do Iguaçu, por outro lado o sistema foi testado para condições bem extremas de intensidade de chuva (entre 91,03 e 101,47 mm/h), podendo possuir melhor funcionamento para as condições rotineiras do município. Outro trabalho encontrado na literatura onde simulou-se evento de precipitação torrencial é o de (NG; et al., 2015), cuja intensidade adotada foi de 73,8 mm/h (probabilidade de ocorrência de 1%), por um período de 4 horas, totalizando 295,2 mm de chuva.

5.3.3 Coleta dos drenos

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de volume de água coletado por cada dreno (em litros e em mm), bem como o instante inicial de seu funcionamento. Os valores de precipitação total e tempo de duração do ensaio já foram apresentados acima na Tabela 10.

Tabela 11. Resultados de volume coletado por cada dreno no modelo reduzido.

		<i>Runoff</i>	A	B	C	D	E
E1 w=1,5%	V _F (L)	32,120	---	0,322	0,065	5,830	---
	V _F (mm)	124,159	---	0,251	1,245	22,536	---
	Ti (min)	25,00	---	131,83	124,33	100,83	---
E2 w=3,5%	V _F (L)	35,250	---	0,125	---	3,413	---
	V _F (mm)	136,258	---	0,483	---	13,193	---
		20,80	---	112,43	---	106,53	---
E3 w=5,9%	V _F (L)	7,700	1,584	1,212	1,871	4,950	0,110
	V _F (mm)	29,764	6,123	4,685	7,232	19,134	0,425
	Ti (min)	28,00	52,70	55,63	58,67	68,30	68,02

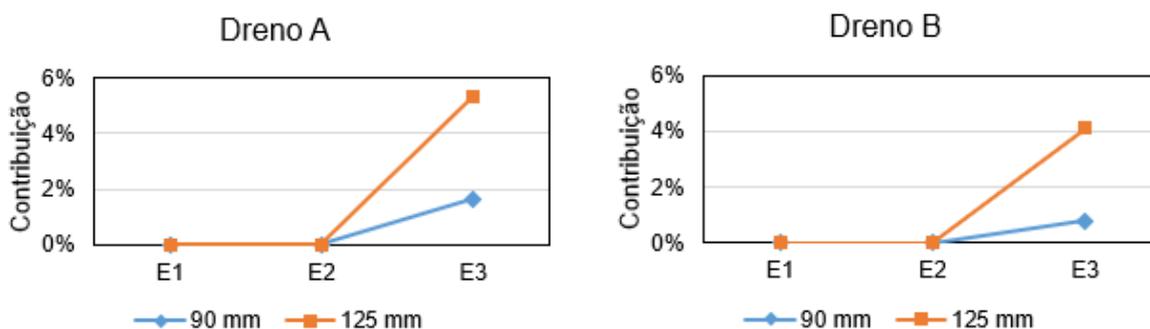
V_F: volume final; Ti: instante inicial de funcionamento do dreno.

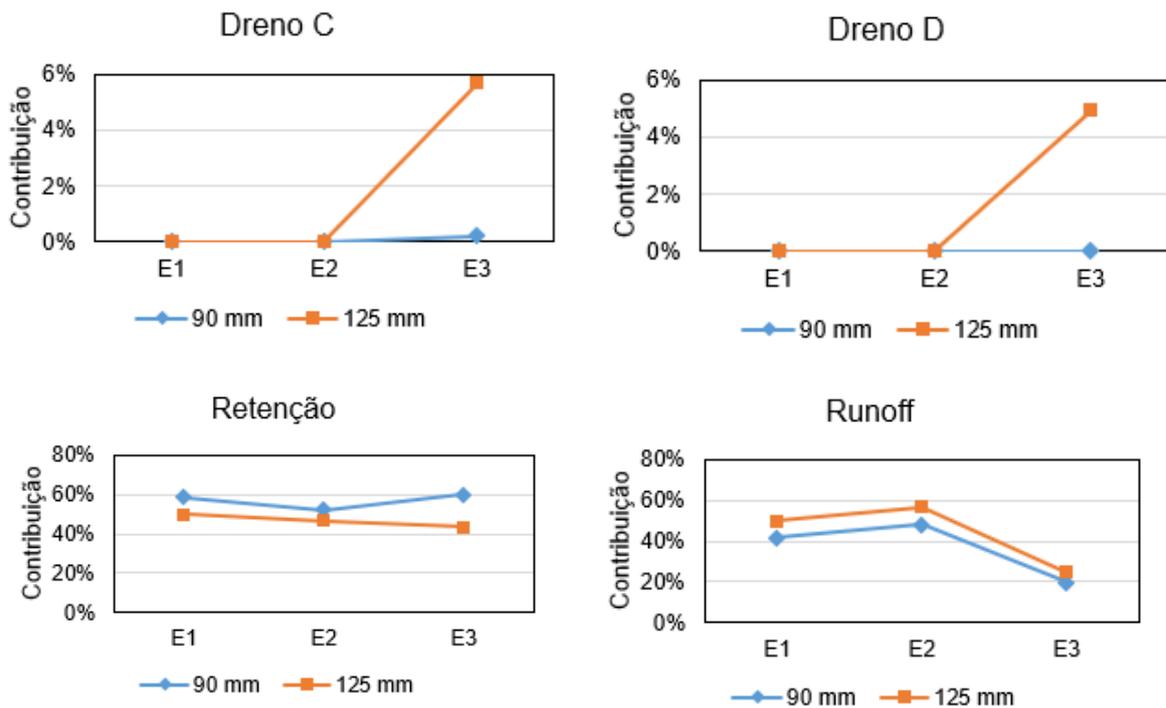
---: dados não coletados.

É possível observar que a maior parcela da precipitação é coletada pelo dreno *runoff* (80% da chuva em E2), sendo seu instante inicial de funcionamento entre 20 e 28 min. Possivelmente isto ocorreu devido à alta intensidade da chuva, o que causou um rápido acúmulo da água na superfície, com conseqüente escoamento. O segundo dreno com maiores volumes de coleta foi o D (percolação lateral do RCD), que corresponde ao ponto mais baixo do SBC. Comparando-se os três ensaios para o dreno *runoff*, nota-se que E3 difere-se dos outros dois. Uma possível explicação é a de que a água percolou em maior velocidade pelo sistema e os drenos inferiores passaram a operar mais rapidamente, a partir do início da simulação da chuva, tendo maior parcela de participação na coleta do volume de chuva. Além disso, este ensaio foi o único que não apresentou falhas nos drenos (ponto a ser discutido mais adiante).

A variação no volume de chuva fornecido ao sistema nos diferentes ensaios (de 121 mm em E3 a 210 mm em E1) dificultou a comparação dos resultados entre os modelos, assim, de maneira a possibilitar essa comparação, fez-se uma estimativa de coleta por dreno para chuvas de mesmo volume (foram adotados eventos de 90 mm e de 125 mm). Para tanto, assumiu-se uma relação linear entre o volume de chuva e o de coleta nos drenos e, do resultado obtido calculou-se a porcentagem de contribuição do dreno em relação ao volume de chuva de entrada (90 ou 125 mm). Os resultados são apresentados na Figura 38.

Figura 38. Porcentagem de contribuição dos drenos e de retenção em relação ao volume de chuva de entrada.





Fonte: Acervo do autor.

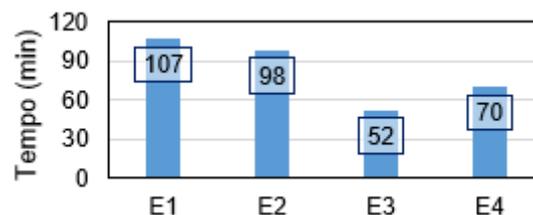
Observa-se novamente a influência da umidade inicial de compactação do RCD nos resultados, pois para E1 e E2 (umidade de até 3,5%) a contribuição dos drenos é nula, isto é, o evento de precipitação simulado não é suficiente para atravessar todo o SBC. Estes resultados são positivos considerando que seriam necessários eventos extremamente raros para que o fluxo atravessasse todo o SBC proposto, considerando as mesmas condições iniciais testadas neste trabalho. Esse resultado (de percolação nula) também foi relatado por outros autores, como (KRISDANI; RAHARDJO; LEONG, 2005; NG; et al., 2015), que em seus trabalhos utilizaram solos coesivos na composição das barreiras capilares.

Para o terceiro ensaio, de maior umidade inicial do RCD (E3 com 5,9%), por outro lado, passa-se a identificar percolação vertical, sendo a soma dos drenos A, B, C e D (que representam o volume que chegaria aos resíduos do aterro) de 2,7% do volume de precipitação, para eventos de 90 mm e, de 20% da precipitação para eventos de 125 mm. Não há um consenso ou normativa que indique uma faixa de valores aceitáveis para a porcentagem de precipitação que percola para os resíduos (KOERNER; DANIEL, 1997), no entanto HAUSER (2009) sugere valores máximos na ordem de 3% (anualmente). Assim, pode-se dizer que os resultados obtidos são satisfatórios para eventos de 90 mm. Outros autores, como Silva (2016) e Oliveira e Braga (2017) indicam que no Brasil chega-se a identificar nos aterros valores de até 50% (mais que o dobro do resultado encontrado para chuvas de 125 mm) de percolação em relação as precipitações médias anuais.

Este parâmetro (da % de precipitação que percola para os resíduos) é um dos parâmetros de maior interesse para projetos de coberturas finais de aterro, pois a partir dele é possível determinar a quantidade de lixiviados gerados (formulações apresentadas por Qian, et al. (2002)), sendo desejáveis valores tão baixos quanto possível, o que poderia auxiliar no contingenciamento da contaminação do solo e corpos hídricos nas proximidades do aterro, bem como em economias com sistemas de drenagem e tratamento ou de recirculação desses lixiviados.

Seria interessante a comparação desses valores de porcentagem de percolação entre E3 e E4 (caso de cobertura monolítica, semelhante ao cenário atual do ARSU de Foz), no entanto conforme mencionado, os drenos deste ensaio não funcionaram adequadamente e tais medições não foram factíveis. Uma das formas nas quais foi possível a análise de todos os ensaios em conjunto é apresentada na Figura 39, na qual são comparados os tempos (após início do evento de precipitação) para chegada do fluxo ao redor do primeiro dreno (o A).

Figura 39. Tempo (após início do ensaio) para chegada do fluxo ao redor do dreno A



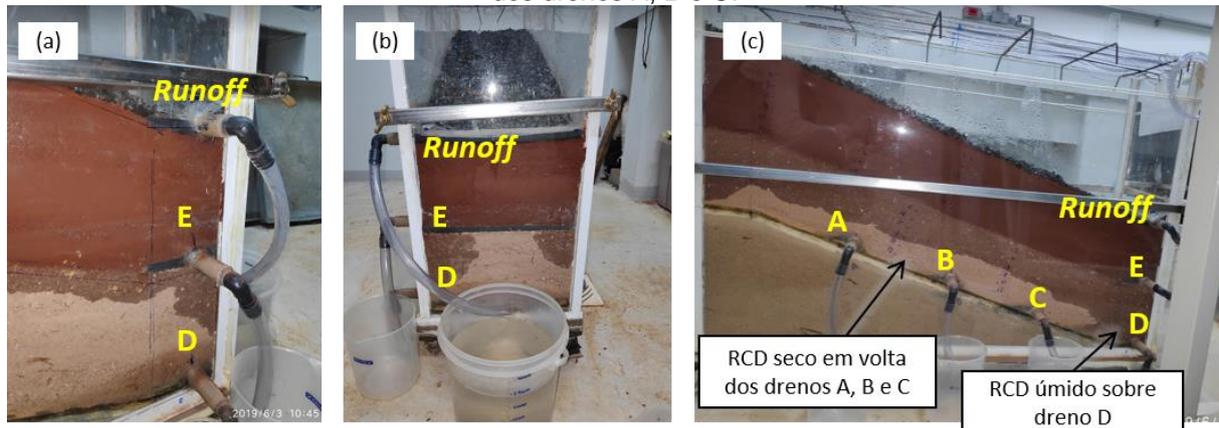
Fonte: Acervo do autor.

Por meio desta comparação, nota-se que o fluxo chega mais rapidamente ao final da camada de cobertura em E3, seguido por E4, o que não era esperado, pois devido às maiores velocidades de percolação registradas na camada de solo (considerando condições iniciais de ensaio) acreditava-se que uma cobertura constituída completamente por solo apresentaria menores tempos de passagem do fluxo. Isto pode indicar que a alternativa de cobertura proposta é mais eficiente do que as coberturas monolíticas para baixas umidades iniciais do RCD, existindo um ponto de umidade a partir do qual o SBC torna-se menos vantajoso quando comparado às coberturas monolíticas. No entanto seria importante confirmar tal observação com a realização de novos ensaios do mesmo tipo de E4 (corrigindo as falhas apresentadas nesta pesquisa). Ademais, para o teste simulando cobertura monolítica utilizou-se GC de 80%, porém na prática poderiam ser requeridos maiores GCs para este caso, o que caracteriza outro ponto para estudos futuros.

Ainda em relação a Tabela 11 se observa que para dois dos drenos (A e E) no E1 e três (A, C e E) no E2 não foram coletados dados. No ensaio E1 isto ocorreu devido à vazamentos sob os drenos *runoff* e E, o que contribuiu para maior volume de água percolando na região

diretamente acima do dreno D. Desta forma este passou a operar antes que o fluxo chegasse aos demais drenos da camada de RCD (A, B e C). Tampouco o dreno E operou, pois a camada de RCD logo abaixo deste (que estava na camada de solo argiloso) constituiu-se num caminho mais fácil para o fluxo. Os drenos B e C chegaram a operar, mas somente depois que a camada de RCD já estava completamente saturada, em período próximo a finalização do ensaio, e apresentaram valores bem reduzidos (de 60 a 300 mL) em comparação aos demais registrados. Na Figura 40 pode-se observar o vazamento sob o dreno E.

Figura 40. Ensaio E1. (a) e (b) Vazamento sob o dreno E. (c) Chegada do fluxo no dreno D, antes dos drenos A, B e C.



Fonte: Acervo do autor.

Além disso, conforme descrito na metodologia, para o E1 foram utilizadas duas camadas de geotêxtil, uma em volta do dreno e outra envolvendo a brita sobre o dreno, o que possivelmente dificultou a coleta do fluxo pelos drenos, sendo o dreno D o caminho mais fácil para o fluxo, como ponto mais baixo do sistema.

No caso de E2, o vazamento sobre o dreno E foi menos intenso. Na Figura 41 visualiza-se que de um dos lados da caixa (lado direito), o fluxo atingiu o dreno D antes de B e C e, do outro lado (lado esquerdo), o fluxo chegou aos drenos A e B primeiro, porém já estava próximo de C e D também, o que corresponde com os registros, onde de fato o início de coleta de água pelos drenos B e D deu-se em instantes próximos (diferindo apenas 6 min). Mesmo assim, por algum outro motivo os drenos A e C não operaram. Inicialmente levantou-se a hipótese de que ao compactar as camadas de RCD e argila, partículas teriam entrado por baixo do geotêxtil, entupindo os orifícios destes drenos. Porém ao retirar o material da caixa, após realização do ensaio, verificou-se que os drenos não estavam entupidos.

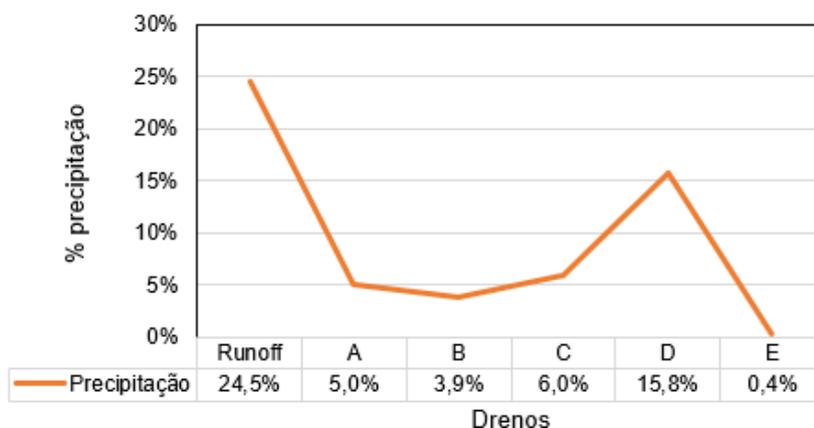
Figura 41. Ensaio E2. (a) Lateral direita da caixa. (b) Lateral esquerda da caixa. (c) Verificação do dreno após realização do ensaio.



Fonte: Acervo do autor.

Por fim, para o terceiro ensaio, E3, todos os drenos operaram conforme o esperado, desta forma apresenta-se um gráfico da contribuição de cada dreno para este ensaio em específico (Figura 42). Tais resultados indicam que os drenos A, B, C possuem certo equilíbrio (em média 5% de coleta), no entanto D apresenta maior valor, isto porque tal dreno continua operando, mesmo após término do período de simulação da chuva, até que toda a água retida nas camadas, excedente da capacidade de campo, seja drenada.

Figura 42. Contribuição dos drenos de E3 (em relação ao evento total, de 121,37 mm).



Fonte: Acervo do autor.

Ainda analisando a Figura 42, observa-se que o dreno E apresentou baixíssimos valores de volume e vazão, reforçando a discussão anterior de que material com textura argilosa como camada capilar não proporcionam valores apreciáveis de percolação lateral na interface dos materiais. Novos ensaios com intensidade de simulação da chuva mais realista, com entrada de água no sistema mais lenta seriam de interesse, para observar se o funcionamento do dreno E apresentaria comportamento distinto.

Tendo em vista os resultados dos volumes de água medidos (coleta em cada dreno, total de precipitação, retenção nas camadas do SBC) calculou-se a eficiência da barreira capilar (Ef), conforme proposta de Izzo (2008):

$$Ef = \frac{V_{cc} + V_r + V_{ret}}{V_p} \quad (4)$$

Em que V_{cc} : volume coletado da camada capilar (dreno E); V_r : volume coletado pelo dreno *runoff*; V_{ret} : volume retido no material; e V_p : volume total de precipitação.

Os dois primeiros ensaios (E1 e E2) apresentam eficiência superior, quando comparados ao terceiro (E3), o que está em conformidade com os dados apresentados até o momento, de que a percolação foi mais lenta nos dois primeiros ensaios (devido a umidade inicial inferior do RCD), ocasionando maiores volumes de coleta pelo dreno *runoff*, que constitui uma das variáveis para o cálculo da eficiência apresentado na Eq. 4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados de eficiência do SBC.

E1	E2	E3
89,6%	94,1%	75,3%

Apesar do indicativo de boa eficiência para o SBC nos ensaios realizados, cabe ressaltar que em termos práticos tal indicador pode apresentar valores inferiores, pois em períodos chuvosos não haveria tempo para que grande parte da água das camadas capilar e de bloqueio evaporasse. Desta forma, os materiais já estariam úmidos (o volume realmente retido nas camadas seria menor) e a maior umidade inicial do RCD diante de eventos de precipitação implicaria em maior velocidade de percolação vertical do fluxo, diminuindo o volume de *runoff*. Estes fatores em conjunto resultariam em menor eficiência do que a apresentada. Por este motivo reforça-se a necessidade de realização de novos ensaios, com diferentes teores de umidade inicial para o RCD e possivelmente para o solo, em estudos futuros.

5.3.4 Limitações experimentais

Cabe salientar que por constituir-se de uma metodologia experimental não normatizada, os ensaios apresentaram diversas limitações, sendo algumas delas passíveis de melhorias, de modo a aumentar a confiabilidade nos dados coletados. Dentre tais limitações estão: uso de chapa de madeira sobre a areia, para definir inclinação das camadas da caixa, pois tal material

absorveu umidade; determinação e controle do volume e intensidade da chuva; e, funcionamento adequado dos drenos.

Em relação a chapa madeira, esta não apresentou problemas no primeiro ensaio, no entanto para os outros três provavelmente ocorreu falha em alguns pontos da película de silicone (utilizada como impermeabilizante), o que ocasionou absorção de água e consequente expansão da madeira, com pequenos vazamentos para a zona abaixo das camadas do SBC. Para futuros ensaios, a madeira poderia ser substituída por placa de PVC de mesma espessura, pois este material possivelmente não apresentaria os problemas de absorção de água e expansão.

Quanto ao simulador chuva, conforme relatado nas discussões acima, os valores estimados de vazão e volume total da chuva não condisseram com os valores reais. Para testes futuros, seria interessante o uso de reservatórios (com volume pré-definido de água) e bomba, assim como Almeida (2011) adotou em seu estudo. Outra possibilidade é a utilização de um rotâmetro (medidor de vazão) acoplado à torneira que abastece o sistema, na ausência de reservatórios e bomba, de maneira que seria possível controlar o registro conforme variações na vazão da rede de abastecimento. Apesar destes impasses, a técnica adotada foi satisfatória do ponto de vista de boa distribuição da chuva.

Outra dificuldade foi o umedecimento homogêneo do solo para compactação. Inicialmente usou-se um borrifador, no entanto devido à grande quantidade de material requerida, esta técnica tornou-se inviável. Procedeu-se então com o uso de betoneira para a mistura do solo com água até a umidade necessária, porém esta segunda técnica ocasionou a formação de muitos aglomerados (torrões) de solo.

Figura 43. Processos de umedecimento do solo. (a) Uso de borrifador. (b) Uso de betoneira. (c) Formação de aglomerados de solo, diante do uso de betoneira.



Fonte: Acervo do autor.

Mesmo assim, a compactação do material foi satisfatória uma vez que os GCs atingidos (de 81,7 a 83,8%) para a camada de solo foram bem próximos dos idealizados na metodologia (de 80%).

Por fim, provavelmente a maior limitação do trabalho foi o inadequado funcionamento dos drenos. Uma sugestão para futuras pesquisas do mesmo tipo que esta é a realização de uma abertura ao longo de todo o comprimento do dreno (assim como apresentado nas Figura 21 e Figura 25 para o dreno *runoff*) e seu preenchimento com pedrisco e, sobre esta composição o geotêxtil (camada filtrante), de forma a facilitar a entrada de água no dreno, devido à sua maior abertura em comparação com a técnica utilizada (de pequeno orifícios).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho estudou-se a proposta de aplicação de RCD miúdo como camada de bloqueio em barreiras capilares, em conjunto com solo argiloso como camada capilar, para uso em coberturas finais de aterro sanitário, por meio de experimentos em coluna e em modelo físico reduzido. Em relação aos resultados obtidos no trabalho alguns pontos são ressaltados:

- As características físicas de granulometria, massa específica dos grãos e parâmetros de compactação do solo estão de acordo com resultados esperados para solos argilosos enquanto que o RCD apresentou características que o assemelham a areias. Além disso, ao consultar diferentes literaturas, identificou-se grande variabilidade do RCD quanto à sua caracterização, dependendo da região ou forma como este é obtido. O contraste granulométrico entre os dois materiais indicou seu potencial uso para comporem SBC conjuntamente.
- Quanto às características hidráulicas, o solo apresentou maior capacidade de retenção de água do que o RCD, ao analisar as curvas características dos materiais. Também identificou-se diferenças na sucção de cada um dos materiais (maiores magnitudes para o solo, considerando uma mesma umidade), indicando potencial uso dos materiais em conjunto para formação de BC. No entanto o RCD também apresentou valores consideráveis de capacidade de retenção, possivelmente devido à sua microestrutura (microporosidade).
- Os ensaios de coluna confirmaram a ocorrência do efeito de BC diante da aplicação do solo argiloso em conjunto com o RCD (camadas capilar e de bloqueio, respectivamente), onde observou-se uma relação inversa entre o teor de finos do RCD e o tempo de funcionamento da BC entre os materiais. Ademais diferentes métodos de tratamento para a amostra de RCD foram testados, no entanto no presente trabalho não notou-se diferença entre o método de peneiramento e o de lavagem.
- A partir dos ensaios no modelo reduzido observou-se que os melhores resultados (de tempo de funcionamento da BC, eficiência do sistema e % percolação em relação à precipitação) apresentam-se para pequenas umidades iniciais de compactação do RCD (até 3,5%). No entanto, mesmo para o caso de maior umidade inicial de compactação (5,9%) os resultados foram satisfatórios em relação à % de percolação do sistema para chuvas de até 90 mm (eventos raros, de ocorrência menor a 1%). Não foi possível uma comparação completa do sistema proposto no trabalho com o cenário atual do ARSU do município da pesquisa (Foz do Iguaçu), no entanto análises superficiais indicam que, para as condições impostas nos ensaios (de espessura das camadas, umidade inicial, compactação), o SBC com umidades de até 3,5% poderia

apresentar resultados melhores do que coberturas monolíticas argilosas (caso do ARSU de Foz).

De modo geral a proposta deste trabalho apresenta a vantagem de substituir 50% do volume de material natural (solo) utilizado nas coberturas finais de aterros sanitários por um material que possui a demanda por diferentes alternativas para disposição (RCD) e embora os resultados sejam favoráveis para a aplicabilidade do SBC com RCD, são necessários estudos mais detalhados, que levem em consideração aspectos de balanço hídrico, de maneira a verificar o comportamento do sistema em condições mais realistas.

Ao final, destaca-se também a problemática da grande variabilidade na composição e, conseqüentemente, das características do RCD. Tal fato dificultaria a simples aplicação deste material, ou então demandaria a implantação de método de tratamento/processamento para possibilitar o seu uso, o que seria um limitante para aplicação da proposta no município de Foz do Iguaçu atualmente, pois a cidade não conta com usina de processamento de resíduos da construção.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho apontam para a viabilidade técnica da solução proposta, no entanto como trata-se de um estudo exploratório muitos aspectos, todavia, carecem de análises mais detalhadas, de maneira a possibilitar futuramente a realização de projetos de barreiras capilares com RCD, conforme definição de determinados pré-requisitos e parâmetros. Desta forma, os seguintes pontos são sugeridos para estudos futuros:

- Ensaios de lixiviação do RCD, de maneira a estudar a possibilidade de colmatção dos drenos dos aterros devido a este material (ou no caso do modelo reduzido, a colmatção dos drenos do próprio modelo);
- Definição de limites granulométricos do RCD, buscando adequação quanto aos parâmetros físicos e hidráulicos requeridos para melhor funcionamento de um SBC;
- Estudos que levem em consideração o balanço hídrico, de maneira a simular condições mais realistas para a barreira capilar, como por exemplo, evento sucessivos de precipitação ou então como se dá a recuperação do SBC após ruptura da barreira;
- Análises da microestrutura do RCD visando melhor compreensão do mecanismo de retenção de água nas partículas de materiais cerâmicos e cimentícios;
- Técnicas mais eficientes de simulação de chuva, de maneira a obter controle mais rigoroso nos ensaios no modelo reduzido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT. **NBR 13292**: Determinação do coeficiente de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.
- ABNT. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b.
- ABNT. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016c.
- ABNT. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016d.
- ABNT. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016e.
- ABNT. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2007**. 2007. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. 2017. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- AFFONSO, F. A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- ALMEIDA, J. **Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos**. 2011. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ANDREAS, L.; DIENER, S.; LAGERKVIST, A. Steel slags in a landfill top cover - Experiences from a full-scale experiment. **Waste Management**, v. 34, 2014. p. 692-701. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.003>.

AUBERTIN, M.; CIFUENTES, E.; APITHY, S. A.; BUSSIÈRE, B.; MOLSON, J.; CHAPUIS, R. P. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. **Can. Geotech. J.**, v. 46, 2009. p. 1146-1164. doi:10.1139/T09-050

BARROS, M. C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, Á. G. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 3, 2008, p. 65-76.

BIZARRETA, J. O.; CAMPOS, T. P. Caracterização geotécnica de um RCD e uma argila visando sua utilização como barreira capilar. In: CARDOZO, E. L. **Geologia ambiental: Tecnologias para o desenvolvimento sustentável** - vol. 2. Ponta Grossa: Atena, 2017. p. 19-33.

BIZARRETA, J. C. O. **Avaliação do potencial de uso de um resíduo da indústria de papel em sistemas de barreiras capilares**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil)-Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Presidência da República**: Casa Civil, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 24 abr. 2018.

CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review. **Waste Management**, v. 49, 2016. p. 131-145. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**, v. 7, n. 2, 2011. p. 86-97. DOI:10.4013/ete.2011.72.02

Chandler RJ, Crilly MS, Montgomery-Smith G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise-buildings. *Proc Inst Civil Eng.* 1992;92:82-9.

COSTA, M. D.; MARIANO, M. O. H.; ARAUJO, L. B.; JUCÁ, J. F. T. Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. **Eng Sanit Ambient**, v. 23, n. 1, 2018, p. 77-90. DOI: 10.1590/S1413-41522018160393

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

DUARTE, E. R. **Entrevista concedida à Thays Car Feliciano de Oliveira**. Foz do Iguaçu, 11/junho/2018.

ELK, A. G. H. P. Redução de emissões na disposição final. In: SEGALA, K. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. cap. 3.

FERRI, G. L.; CHAVES, G. L. D.; RIBEIRO, M. Análise e localização de centros de armazenamento e triagem de resíduos sólidos urbanos para a rede de logística reversa: um estudo de caso no município de São Mateus, ES. **Production**, v. 25, n. 1, 2015. p. 27-42. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132014005000014>

GOUVEIA, N.; PRADO, R. Riscos à saúde em áreas próximas a aterros de resíduos sólidos urbanos. **Rev Saúde Pública**, v. 44, n. 5, 2010. p. 856-866.

HARNAS, F. R.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C.; WANG, J. Y. Experimental study on dual capillary barrier using recycled asphalt pavement materials. **Can. Geotech. J.**, v. 51, 2014. p. 1165-1177. DOI:dx.doi.org/10.1139/cgj-2013-0432

HAUSER, V. L. **Evapotranspiration Covers for Landfills and Waste Sites**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009.

IZZO, R. L. S.; MAHLER, C. F.; ROSE, L. Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente. **Eng Sanit e Ambient**, v. 18, n. 4, 2013. p. 303-312.

IZZO, R. L. S. **Comportamento de resíduos sólidos inertizados em barreira capilar**. 2008. 203 f. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil)—Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de Resíduos Sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, 2011. p. 135-158.

KÄMPF, M.; HOLFELDER, T.; MONTENEGRO, H. Identification and parameterization of flow processes in artificial capillary barriers. **Water Resources Research**, v. 39, n. 10, 2003. p. 1-9. DOI:[10.1029/2002WR001860](http://dx.doi.org/10.1029/2002WR001860)

KÄMPF, M.; MONTENEGRO, H. On the performance of capillary barriers as landfill cover. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, v. 4, 1997. p. 925-929.

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

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps**. ASCE, 1997.

KOVAČIĆ, D. Materials for the final cover of sanitary landfills. **Rudarsko-geološko-naftni zbornik**, v. 6, 1994. p. 11-15.

KRISDANI, H., RAHARDJO, H., & LEONG, E. C. Behaviour of capillary barrier system constructed using residual soil. **Waste Containment and Remediation**, 2005. p. 1-15.

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

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Capítulo 4 – Potenciais da água no solo. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 79-96.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale experimental cell in Brazil. **Waste Management**, v. 31, 2011, p. 966-977. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.01.030

MONCADA, M. H. (2008). **Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. DOI:<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.12304>

MOREIRA, J. L. B. **Estudo da Distribuição espacial das Chuvas em Belo Horizonte e em seu entorno**. 2002. Dissertação (Mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2002.

MENDOZA, F. J. C.; ALTABELLA, B.; IZQUIERDO, G. Application fo inert wastes in the construction, operation and closure of landfills: calculation tool. **Waste Management**, v. 59, 2017. p. 276-285. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.041>

MONTAÑO, M.; RANIERI, V. E. L.; SCHALCH, V.; FONTES, A. T.; CASTRO, M. C. A. A.; SOUZA, M. P. Integração de critérios técnicos, ambientais e sociais em estudos de alternativas locais para implantação de aterro sanitário. **Eng Sanit Ambient**, v. 17, n. 1, 2012. p. 61-70.

NG, C. W.; LIU, J.; CHEN, R.; XU, J. Physical and numerical modeling of an inclined three-layer (silt/gravelly sand/clay) capillary barrier cover system under extreme rainfall. **Waste Management**, 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.013>

OLIVEIRA, R. F.; BRAGA, R. M. Q. L. Sistema de cobertura final de um aterro sanitário para a RMB de Belém-PA com emprego de resíduos da construção civil. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 6, n. 3, 2017. p. 573-596. DOI:[10.19177/rgsa.v6e32017573-596](https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e32017573-596)

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; RAUBER, A. C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria – RS. **Geociências**, v. 36, n. 2, 2017, p. 347-363.

QIAN, X.; KOERNER, R.M.; GRAY, D.H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction**. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, Planta e Atmosfera - Conceitos, Processos e Aplicações. Barueri: Manole, 2004.

STARK, T. D.; CHOI, H.; LEE, C.; QUEEN, B. Compacted soil liner interface strength importance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 4, 2012. p. 544-550.

SIMON, F. G.; MÜLLER, W. W. Standard and alternative landfill capping design in Germany. **Environmental Science & Policy**, v. 7, 2004. p. 277-290. DOI:[10.1016/j.envsci.2004.04.002](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.04.002)

SILVA, K. T. **Projeto de um aterro sanitário de pequeno porte**. 2016. 81 f. Projeto (Graduação em engenharia civil)-Escola Politécnica, UFRJ, 2016.

SILVA JUNIOR, M. A. B. **Avaliação da potencialidade dos RCD's visando sua aplicação em cobertura final de aterros**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil)-Escola Politécnica de Pernambuco, UFPE, 2010.

SIMEPAR – Sistema Meteorológico Do Paraná. **Dados pluviométricos de estação em Foz do Iguaçu no intervalo de 31/12/1997 a 31/12/2018**. 2019.

TRAVAR, I.; ANDREAS, L.; KUMPIENE, J.; LAGERKVIST, A. Development of a drainage water quality from a landfill cover built with secondary construction materials. **Waste Management**, v. 35, 2015. p. 148-158. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.016>

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. 461 f. Tese (Doutorado em engenharia civil)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Property of Soils**. 15. ed. Harlow: Pearson, 2017.