



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DAIANE DO CARMO RIOS

**APLICAÇÃO DE DOIS MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO PARA ESTUDO DE
CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO SOLO E
RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)**

FEIRA DE SANTANA
SETEMBRO/2016

DAIANE DO CARMO RIOS

**APLICAÇÃO DE DOIS MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO PARA ESTUDO DE
CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO SOLO E
RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadora: Prof^a D.Sc. Maria do Socorro Costa São Mateus

FEIRA DE SANTANA

SETEMBRO/2016

Ficha catalográfica

Rios, Daiane do Carmo

Aplicação de dois modelos de balanço hídrico para estudo de Camada de cobertura de aterro sanitário utilizando solo e Resíduo da construção civil (RCC) / Daiane do Carmo Rios. – Feira de Santana, 2016.

138f. : il.

Orientadora: Maria do Socorro Costa São Mateus

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Estadual de Feira de Santana, 2016.

1. Balanço hídrico. 2. Camada de cobertura final. 3. Aterro sanitário. 4. Resíduo da construção civil. I. São Mateus, Maria do Socorro Costa, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

DAIANE DO CARMO RIOS

**APLICAÇÃO DE DOIS MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO PARA ESTUDO DE
CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO SOLO E
RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Feira de Santana, 14 de setembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Maria do Socorro Costa São Mateus, D.Sc.
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof^a Iara Brandão de Oliveira, D.Sc.
(Universidade Federal da Bahia)

Prof. Sandro Lemos Machado, D.Sc.
(Universidade Federal da Bahia)

Prof^a Patrícia dos Santos Nascimento, D.Sc.
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Ao meu noivo e companheiro de
todas as horas, Anderson Borges,
por todo o amor, carinho e
incentivo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao maior Engenheiro do mundo, que criou os céus e a terra e tudo o que neles há: JEOVÁ DEUS. Sem Ti eu nada seria Senhor, obrigada pela vida, pela saúde, por tantas oportunidades e conquistas até hoje obtidas e por aquela que virão.

Aos meus pais, Antonio e Juzete, que tanto amo, por terem me planejado e concebido com todo amor e dedicação. Obrigada por todas as palavras de conforto e otimismo que foram fundamentais para a conclusão deste mestrado.

À minha irmã, Amanda, por ter sido meu refúgio. Não faltam conversas, distrações e muito amor entre nós.

Ao meu Amor, noivo, companheiro e amigo, Anderson, por todos os conselhos, sermões, consolo, carinho, incentivo, compreensão e por todo o amor dedicado a mim. Pelas ajudas indescritíveis em todas as áreas da minha vida. Eu te amo!

À Maria do Socorro, minha orientadora e, agora, também amiga, pela paciência que teve em todo este período, pelos conselhos e ensinamentos a mim fornecidos. Tens meu respeito e minha admiração.

Ao técnico do Laboratório de Solos, Jorge Luiz e à aluna de iniciação científica Rosane, pela enorme contribuição nos ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento, Adriano e Leilane, pela ajuda com o ensaio de solubilização do RCC.

Aos amigos Rodrigo e Gabriel pela enorme contribuição na coleta do material da pesquisa.

A toda a equipe do PPGECEA, professores e funcionários, que contribuíram para a minha formação de mestre.

Aos colegas de mestrado, em especial Juliana, pela grande parceira, por muitos estudos e risadas.

À FAPESB, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de mestrado acadêmico concedida.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**APLICAÇÃO DE DOIS MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO PARA ESTUDO DE
CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO SOLO E
RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)**

DAIANE DO CARMO RIOS

Setembro/2016

Orientadora: Prof^ª. D.Sc. Maria do Socorro Costa São Mateus

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

O balanço hídrico é parte importante no processo de elaboração de um projeto de aterro sanitário, visto que a escolha do material para a camada de cobertura influenciará na geração de líquidos percolados. Tendo em vista a necessidade da utilização de materiais para a composição das diversas camadas dos sistemas de cobertura, torna-se indispensável o estudo de materiais alternativos para a substituição dos materiais usados originalmente. Para tanto, este trabalho comparou o resíduo da construção civil (RCC) com o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA utilizados como camada de cobertura para aterro sanitário, utilizando os modelos de balanço hídrico de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012). Os resultados mostraram que, pelo método de Fenn et al. (1975), ambos os materiais possuem comportamento semelhante, sendo que o RCC infiltrou menor quantidade de água para o resíduo sólido urbano (RSU) do que o solo. Pelo método de São Mateus et al. (2012), o RCC e o solo permitem a passagem de água para o RSU em comportamentos distintos, sendo que o solo promoveu maior infiltração de líquidos, cerca de 95,5% maior do que o RCC. Quando comparados os métodos, São Mateus et al. (2012) apresentou maior infiltração de água para o RSU na simulação com o solo, com relação ao método de Fenn et al. (1975), e menor com o RCC, isto ocorre devido à distinção dos parâmetros de entrada para os materiais, destacando-se a influência do coeficiente de permeabilidade no balanço hídrico.

Palavras-chave: Balanço hídrico; camada de cobertura final; aterro sanitário; resíduo da construção civil.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

**APPLICATION OF TWO MODELS OF WATER BALANCE FOR LANDFILL
COVER LAYER USING SOIL AND CONSTRUCTION CIVIL WASTE (CCW)**

DAIANE DO CARMO RIOS

September/2016

Advisor: Prof^a. D.Sc. Maria do Socorro Costa São Mateus

Department: Civil and Environmental Engineering

The water balance is an important aspect on development of a landfill project, and the choice of material for the cover layer will influence the generation of percolated liquids. Considering the composition and characteristics of cover layers, it becomes necessary the conventional material substitution. Therefore, this study compared the construction civil waste (CCW) to the soil from the university campus - UEFS in Feira de Santana/BA as used in evapotranspiration cover layer for landfill, using the water balance models Fenn et al. (1975) and São Mateus et al. (2012). The results showed that both materials have the same behavior for the Fenn et al. (1975) method, where the CCW generates less liquid than MSW to the ground. By the method of São Mateus et al. (2012), the CCW and the soil allow the passage of water to the MSW in different behaviors, and the soil promoted greater liquid infiltration, about 95.5% higher than the CCW. When the methods were compared, São Mateus et al. (2012) presented higher water infiltration to the MSW in the simulation with the soil, in relation to the method of Fenn et al. (1975), and smaller with the CCW, this occurs due to the distinction of the input parameters for the materials, highlighting the influence of the permeability coefficient in the water balance.

Keywords: Water balance; final cover layer; landfill; construction civil waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de um aterro sanitário.....	19
Figura 2 – Camadas de um sistema de cobertura final convencional.....	21
Figura 3 – Componentes do balanço hídrico em aterro sanitário.....	29
Figura 4 - Esquema representativo da umidade no perfil de solo durante a infiltração.	40
Figura 5 – (a) Sistema não saturado tetrafásico rigoroso do solo; (b) Diagrama simplificado trifásico.	44
Figura 6 – Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total.....	45
Figura 7 – Principais componentes de uma curva de retenção de umidade.	46
Figura 8 – Curva de retenção de umidade para diferentes tipos de solo: (a) Solo arenoso; (b) Solo siltoso; (c) Solo argiloso.....	47
Figura 9 - Equipamento para determinação da curva de retenção de umidade do solo por equilíbrio de pressão – GEOAMB/UFBA.....	48
Figura 10 - a) e b) Homogeneização do RCC; c) e d) Quarteamento do RCC	67
Figura 11 – Curvas granulométricas do RCC.....	69
Figura 12 – Ensaio de capacidade de campo do RCC: Variação de massa em função do tempo	70
Figura 13 - Ensaio de capacidade de campo do RCC: Variação do teor de umidade e do grau de saturação em função do tempo.....	70
Figura 14 – Curva de retenção de umidade para o RCC	71
Figura 15 – Curva granulométrica para um solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA.....	72
Figura 16 – Curva de retenção de umidade para o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA.....	73
Figura 17 – (a) Separação de amostras para ensaio de solubilização; (b) Amostras em agitação magnética.....	76
Figura 18 – Filtração das amostras	77
Figura 19 – Leituras das amostras	77
Figura 20 – Corpos de prova em saturação no tanque.....	80
Figura 21 – Corpos de prova em fase de drenagem no laboratório de solos.....	81
Figura 22 – Corpo de prova de evaporação saturando.	83
Figura 23 – Experimento de evaporação no solo e na água.	84
Figura 24 – Curva de compactação para o solo do campus universitário da UEFS.....	86

Figura 25 – Ensaio de capacidade de campo com o solo: Variação de massa em função do tempo	87
Figura 26 - Ensaio de capacidade de campo do solo: Variação do teor de umidade dos CPs em função do tempo	88
Figura 27 - Ensaio de capacidade de campo do solo: Variação do grau de saturação dos CPs em função do tempo	88
Figura 28 – Ensaio de evaporação: Relação de massa de água evaporada acumulada do CP de solo e do béquer com água.	91
Figura 29 – Ensaio de evaporação: Variação do teor de umidade gravimétrica e do grau de saturação do CP de solo em função do tempo	92
Figura 30 – Extração de amostras do CP do ensaio de evaporação	93
Figura 31 - Taxa de evaporação diária medida para o CP de solo	93
Figura 32 – Relação ER/EP e umidade volumétrica	94
Figura 33 – Precipitação pluviométrica diária jan/2014 – dez/2015	96
Figura 34 - Evaporação potencial mensal jan/2014 – dez/2015	96
Figura 35 – BH na camada de solo: Valores mensais de precipitação pluviométrica, evaporação potencial e real, para o período de jan/2014 – dez/2015.....	97
Figura 36 – BH na camada de RCC: Valores mensais de precipitação pluviométrica, evaporação potencial e real, para o período de jan/2014 – dez/2015.....	98
Figura 37 – SOLO e RCC: Evaporação real mensal por São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975)	99
Figura 38 – SOLO e RCC: Evaporação real mensal acumulada por São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975).....	100
Figura 39 – SOLO e RCC: Escoamento superficial mensal acumulado por São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975)	101
Figura 40 – SOLO: BH na camada de cobertura para os modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012).....	102
Figura 41 - RCC: BH na camada de cobertura para os modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012).....	103
Figura 42 – SOLO: Valores acumulados para precipitação pluviométrica, infiltração no solo e no RSU - Modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012).....	104
Figura 43 – RCC: Valores acumulados para precipitação pluviométrica, infiltração no RCC e no RSU - Modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012).....	105

Figura 44 - SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de Fenn et al. (1975)	106
Figura 45 – SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de São Mateus et al. (2012)	107
Figura 46 – SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de Fenn et al. (1975)	108
Figura 47 – SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de São Mateus et al. (2012)	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Materiais alternativos utilizados no projeto do aterro sustentável de Catas Altas/MG.	20
Quadro 2 – Funções primárias dos componentes de um sistema de cobertura convencional de aterro.	22
Quadro 3 – Principais características das coberturas convencionais utilizadas por Dwyer (2003) em seus experimentos.	23
Quadro 4 – Principais fatores a serem considerados em um projeto de sistema de cobertura final de aterros de resíduos sólidos.	23
Quadro 5 - Principais características das coberturas alternativas utilizadas por Dwyer (2003) em seus experimentos.	25
Quadro 6 – Características das coberturas estudadas por Blight et al. (2003).	26
Quadro 7 – Resultado das taxas de percolação para as coberturas alternativas estudadas por Albright (2003).	27
Quadro 8 – Parâmetros avaliados por Catapreta, Simões e Silveira (2011).	28
Quadro 9 – Resultados da infiltração anual (ano de 2010).	28
Quadro 10 – Principais fatores que influenciam diretamente o balanço hídrico.	31
Quadro 11 – Resumo dos resultados do balanço hídrico para os dois projetos propostos.	33
Quadro 12 – Valores do coeficiente de escoamento superficial (C').	38
Quadro 13 – Valores obtidos na literatura para umidade volumétrica na capacidade de campo por tipo de solo.	43
Quadro 14 – Métodos para determinação ou controle da sucção.	48
Quadro 15 - Variação de K com o peso específico do material estudado.	51
Quadro 16 – Dados de entrada do modelo de Fenn et al. (1975).	52
Quadro 17 – Dados de entrada do modelo de Koerner e Daniel (1997).	54
Quadro 18 – Resumo de alguns trabalhos que estudaram o RCC (continua).	62
Quadro 19 – Características e utilização do RCC nos componentes de um sistema de cobertura de aterro.	66
Quadro 20 – Modo de obtenção dos parâmetros para aplicação no modelo de São Mateus et al. (2012).	75
Quadro 21 – Modo de obtenção dos parâmetros utilizados no modelo de infiltração de Philip (1957).	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Roteiro de cálculo dos parâmetros do modelo de Fenn et al. (1975).	53
Tabela 2 - Umidade no solo (mm de água/m de profundidade de solo).	53
Tabela 3 – Roteiro de cálculo dos parâmetros do modelo de Koerner e Daniel (1997).	55
Tabela 4 – Dados de coleta de RCC comparados a RSU.	61
Tabela 5 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados em laboratório para o RCC.	68
Tabela 6 – Resultados dos ensaios realizados em laboratório para o solo.	72
Tabela 7 – Dados do ensaio de compactação Proctor Normal.	78
Tabela 8 – Características físicas dos equipamentos utilizados.	80
Tabela 9 – Dados para a compactação do CP no ensaio de capacidade de campo.	80
Tabela 10 – Características físicas do permeâmetro utilizado no ensaio de evaporação.	82
Tabela 11 – Dados para o cálculo do nº de golpes aplicados em cada camada – ensaio de evaporação.	83
Tabela 12 – Concentração de metais no RCC – Ensaio de solubilização.	85
Tabela 13 – Resultados do ensaio de compactação para o solo do campus universitário da UEFS	86
Tabela 14 – Taxas de drenagem média do ensaio de capacidade de campo.	87
Tabela 15 – Teor de umidade gravimétrica de cada etapa do ensaio de capacidade de campo.	87
Tabela 16 – Valores obtidos para a umidade volumétrica na capacidade de campo pela curva de retenção de umidade para o solo de Feira de Santana/BA.	89
Tabela 17 – Teores de umidade gravimétrica e volumétrica para os ensaios de CRU, permeabilidade e capacidade de campo.	90
Tabela 18 – Índices físicos do CP de solo em 3 fases do ensaio de evaporação.	92
Tabela 19 - Parâmetros de entrada para o BH da cobertura realizado pelo método de Fenn et al. (1975).	94
Tabela 20 - Parâmetros de entrada do solo e do RCC, obtidos por ensaios de laboratório, para o BH da cobertura: Modelo de São Mateus et al. (2012)	95
Tabela 21 – Variação de parâmetros do BH.	109
Tabela 22 - Resumo do comportamento hidráulico do solo e do RCC, para os dois métodos utilizados no balanço hídrico	112

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	OBJETIVOS	18
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1.	SISTEMAS DE COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO.....	19
3.1.1.	Sistemas de Coberturas Alternativas.....	24
3.2.	BALANÇO HÍDRICO (BH) DE ATERRO DE RSU.....	29
3.2.1.	Componentes do Balanço Hídrico (BH)	34
a)	Precipitação pluviométrica	34
b)	Evaporação/ Evapotranspiração.....	35
c)	Escoamento Superficial	37
d)	Infiltração de água no solo.....	38
e)	Armazenamento de água no solo.....	41
f)	Capacidade de campo	42
3.3.	SOLOS NÃO SATURADOS	43
3.3.1.	Curva de retenção de umidade do solo	45
3.3.2.	Condutividade hidráulica	49
3.4.	MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO.....	51
3.4.1.	Método Suíço.....	51
3.4.2.	Método de Fenn et al. (1975) ou Método do Balanço Hídrico	52
3.4.3.	Modelo de Koerner e Daniel (1997)	54
3.4.4.	Modelo de Blight e Fourie (1999)	56
3.4.5.	Modelo proposto por São Mateus et al. (2012).....	57
3.5.	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC): DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	58

3.5.1. Emprego de RCC em diversas finalidades	60
4. ANTECEDENTES.....	67
5. METODOLOGIA.....	74
5.1. RCC: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO	76
5.2. SOLO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UEFS EM FEIRA DE SANTANA/BA: ENSAIOS COMPLEMENTARES DE LABORATÓRIO	77
5.2.1. Ensaio de Compactação	78
5.2.2. Ensaio para Determinação da Capacidade de Campo.....	79
5.2.3. Ensaio de Evaporação	82
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
6.1. RCC: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO	85
6.2. SOLO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UEFS EM FEIRA DE SANTANA/BA: ENSAIOS COMPLEMENTARES DE LABORATÓRIO	85
6.3. SIMULAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO	94
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	116
REFERÊNCIAS	117
ANEXOS.....	126
Anexo A - Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada [$\sum \text{neg}(I-EP)$] (FENN et al, 1975).....	127
Anexo B – Parâmetros climatológicos (2014 – 2015).....	134

1. INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos é uma das grandes preocupações da humanidade, impondo a estes a necessidade de um manejo sustentável. Nos últimos anos, esses resíduos têm se apresentado como um dos principais problemas nas áreas urbanas, pois sua geração, descarte e disposição final inadequados provocam diversos impactos ambientais, sociais, econômicos e de saúde pública.

A forma de disposição final no solo mais adequada para aqueles resíduos que já não podem mais ser reaproveitados ou reciclados, é o aterro sanitário. Este modelo de disposição requer uma série de critérios operacionais e geotécnicos, bastante complexos, devido aos mecanismos físicos, químicos e biológicos envolvidos, que acontecem nos resíduos sólidos e que influenciam diretamente o comportamento geral dos aterros.

Os aterros sanitários são uma obra em permanente construção, onde basicamente dois tipos de materiais são utilizados: resíduos sólidos e solo. Os resíduos sólidos urbanos (RSU) possuem um processo de decomposição, dentro de uma célula de aterro, devido à variação nas condições de temperatura, pressão e umidade, e vêm sendo estudados através da adaptação das leis da Mecânica dos Solos e, da adaptação de metodologias de análises físico-químicas desenvolvidas para outros materiais.

Dentre os aspectos analisados em um projeto de aterro sanitário, podem ser citadas as formas de disposição (número de passadas do equipamento compactador, altura das camadas de resíduos, inclinação das rampas de aterragem), composição dos resíduos, tipo de material empregado nas camadas de cobertura intermediárias e final, configuração dos sistemas de drenagem superficial para o afastamento das águas das chuvas, de drenagem interna para a coleta do lixiviado, assim como o seu tratamento, de drenagem dos gases liberados durante o processo de bioestabilização da matéria orgânica, além de impermeabilização de fundo e das laterais (CASTILHOS JR, 2003; SÃO MATEUS, 2008).

Em um projeto de aterro sanitário, um dos fatores que deve ser levado em consideração, em se tratando de proteção ambiental, é o balanço hídrico do local do aterro, visto que ele permite monitorar o volume de líquido armazenado e, a geração de efluentes líquidos e gasosos que está associada à entrada de líquidos no aterro, seja por meio do teor de umidade dos resíduos ou pela infiltração de água no aterro.

A estimativa do balanço hídrico em aterros sanitários é a chave para o projeto de sistemas de cobertura final e de impermeabilização de fundo. Significa, também, entender a variação de umidade no interior da massa de resíduos com o tempo, que tem importância

fundamental na análise dos processos de degradação dos resíduos e na avaliação de propriedades geotécnicas dos mesmos, o que permite a avaliação da estabilidade estrutural dos aterros sanitários.

No balanço hídrico de um aterro, geralmente a fonte de entrada de água mais importante no sistema se dá através da face superior da célula, através da percolação pela camada de cobertura. Por este motivo, é de suma importância o conhecimento das características climatológicas da área do aterro, não apenas a precipitação pluviométrica, mas também a temperatura, a evaporação e a duração da luz solar.

Nos aterros brasileiros, a precipitação pluviométrica é a forma principal de entrada de água. Por isso, é necessário o projeto e a construção de barreira efetiva, de vida útil longa, na superfície desses empreendimentos, denominada como camada de cobertura, cuja finalidade é controlar a entrada de água de chuva para a célula.

O solo, por ser um meio poroso, absorve a água da chuva que cai sobre ele até que as camadas superiores atinjam a saturação. A partir desse momento, o excesso não infiltrado começa a escoar pela superfície. A água infiltrada no solo sofre a ação da capilaridade e da gravidade, prosseguindo seu caminho até atingir a massa de resíduos, umedecendo-a de cima para baixo, alterando, assim, o perfil de umidade da célula. Em casos de coberturas com argila e manta de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), é muito mais difícil a água percolar até os resíduos, a menos que haja fissuras nas camadas ou que a manta esteja danificada. Porém, isto não quer dizer que o maciço de resíduos esteja isento de umidade, já que estudos mostram que, em algumas regiões, a quantidade de umidade do próprio resíduo é maior do que a umidade produzida a partir de infiltrações.

Tendo em vista a necessidade da utilização de materiais para a composição das diversas camadas dos sistemas de cobertura, torna-se indispensável o estudo de materiais alternativos para a substituição dos materiais usados originalmente, seja para a redução de custos, no caso de aterros de pequeno porte, ou visando apenas a preservação dos materiais naturais e o reaproveitamento de resíduos. Para tanto, pesquisadores têm estudado as propriedades dos resíduos da construção civil (RCC) com o intuito de utilizá-lo como parte integrante dos sistemas de cobertura.

A aplicação de RCC como camada de cobertura nos aterros sanitários é uma solução alternativa a uma grande problemática que atinge a sociedade, que é a questão da destinação final desses resíduos. A Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) obriga os municípios a darem um correto destino a esses resíduos, impedindo-os de os descartarem em locais não licenciados, além de obrigar que os resíduos de classe A,

sejam reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterros específicos.

A utilização do RCC como camada de cobertura final, em aterros sanitários de médio e pequeno portes, situados em regiões de clima árido e semiárido, apresenta-se como uma solução alternativa para o seu destino e para a redução de custos na operação do aterro. Considerando-se que, o alto custo para se construir um aterro sanitário, é uma das principais razões da grande maioria dos municípios brasileiros não aderirem à forma correta de disposição dos resíduos, é de grande valia o reaproveitamento de outros materiais, principalmente quando o destino destes é uma problemática para muitos municípios.

O estudo dos RCC, visando sua aplicação em cobertura final evapotranspirativa de aterros, para esta pesquisa, surgiu ao se perceber um possível descarte de um material com potencial para tal fim, pelo Laboratório de Materiais de Construção - DTEC/UEFS, por não ser interessante para as pesquisas sobre novos materiais da construção civil, como concretos e argamassas. Sendo assim, deu-se início às avaliações acerca do material, que possui granulometria inferior a 38,00 mm, tendo em vista o seu uso em coberturas finais de aterros sanitários.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Comparar dois modelos de balanço hídrico utilizando o RCC e o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA compondo dois tipos de camada de cobertura para aterro sanitário.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

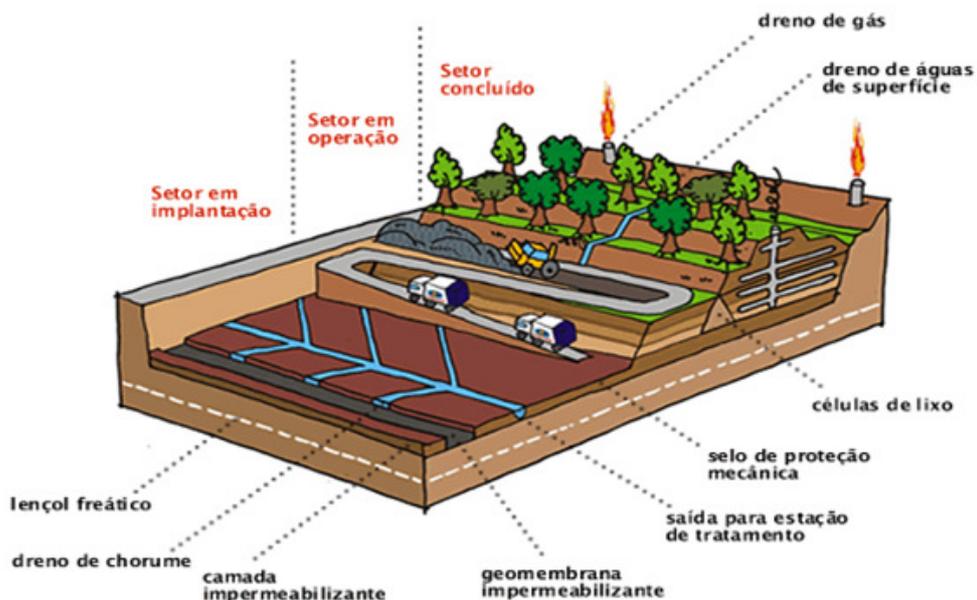
- Reunir e aplicar nos dois modelos de balanço hídrico os dados geotécnicos de caracterização, compactação, permeabilidade, evaporação e capacidade de campo do RCC, determinados em projeto existente.
- Reunir e aplicar nos dois modelos de balanço hídrico os dados geotécnicos de caracterização, compactação, permeabilidade e curva de retenção de umidade, para o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA.
- Realizar ensaios de solubilização com o RCC.
- Realizar ensaios de evaporação e capacidade de campo com o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA.
- Realizar simulação de balanço hídrico na cobertura, utilizando dois modelos escolhidos, e camadas de cobertura compostas por diferentes materiais: RCC e solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SISTEMAS DE COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO

O modelo de aterro sanitário é a forma de disposição final no solo mais adequada que se tem atualmente. Sua base deve ser constituída, como indicado na Figura 1, por um sistema de drenagem de líquido lixiviado acima de uma camada impermeabilizante com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), sobre uma camada de solo compactado para evitar o vazamento do efluente para o solo, evitando a contaminação do subsolo e das águas subterrâneas. Sobre a geomembrana, deverá existir uma camada de baixa permeabilidade, para proteção mecânica. Deve possuir, também, um sistema de drenagem de gases, que possibilite a coleta do biogás, o qual é constituído por metano, gás carbônico (CO₂) e água (vapor), entre outros, como resultado da decomposição da matéria orgânica proveniente dos resíduos. Os gases podem ser queimados na atmosfera ou aproveitados para geração de energia.

Figura 1 – Desenho esquemático de um aterro sanitário.



FONTE: Ambiental (2014).

Os aterros sanitários deverão receber coberturas diárias, dependendo da sua operação, e cobertura final no encerramento das células. A cobertura evita a fuga dos resíduos leves, como sacos plásticos, emissão de odores, gases e, também, a entrada de água de chuva, que aumenta a quantidade de líquidos lixiviados.

De forma mais simplificada, têm-se os aterros de pequeno porte, onde algumas das técnicas aplicadas aos de grande porte podem ser desprezadas, ou adaptadas, visando uma redução de custos.

Um exemplo de aterros de pequeno porte que funcionaram, é o resultado da pesquisa de Lange et al. (2002), na cidade de Catas Altas /MG, onde foi elaborado um projeto básico de um aterro sustentável, que foi implantado e operado pelo próprio município, após as devidas orientações para todas as fases de construção e operação. Para este aterro, foram realizados diversos estudos para verificar a possibilidade da substituição de alguns materiais mais onerosos, por outros mais viáveis, economicamente falando, listados no Quadro 1.

Quadro 1 – Materiais alternativos utilizados no projeto do aterro sustentável de Catas Altas/MG.

	Material convencional	Material alternativo
Sistema de impermeabilização	Geossintéticos	Camada de solo natural compactado manualmente
Drenagem de gases e lixiviados	Tubos de PEAD; elemento em concreto armado ou não	Tubos de PVC; garrafas PET perfuradas
Monitoramento	Poços de monitoramento	Tubos de PVC para a coleta de amostras de lixiviado e solo
Cobertura final	Solo de baixa permeabilidade; n° de camadas varia com o clima local	Uma camada de 50 cm de argila compactada
Cobertura temporária	-	Estrutura montada com bambu e eucalipto

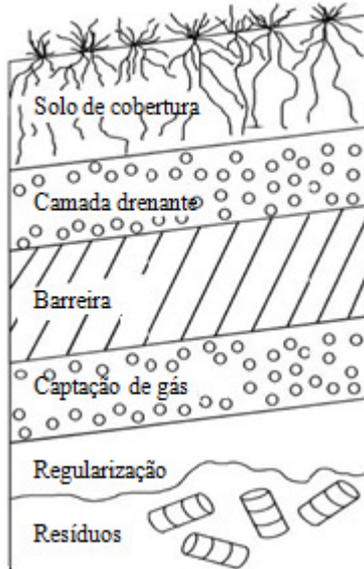
FONTE: Adaptado de Lange et al. (2002).

A utilização de materiais de baixo custo em aterros de pequeno porte, reduz consideravelmente o valor da obra, possibilitando a implantação do mesmo, e a utilização de mão de obra local devidamente qualificada, facilita a sua manutenção e operação, evitando, assim, que as práticas ideais sejam abandonadas, tornando-se apenas um depósito de lixo à céu aberto.

O sistema de cobertura final de aterros de resíduos sólidos urbanos, aterros de resíduos perigosos e os projetos de ações corretivas (incluindo os depósitos de resíduos abandonados)

possuem um número muito similar de componentes, em todas estas condições. Conforme ilustrado na Figura 2, existem cinco componentes básicos em um sistema de cobertura final que serão dispostos acima do resíduo, que são, de baixo para cima, a camada de regularização, captação de gás, barreira, camada drenante e o solo de cobertura.

Figura 2 – Camadas de um sistema de cobertura final convencional.



FONTE: Rose (2009).

Cada uma das camadas (Figura 2) possui uma determinada função e, conseqüentemente, deve ser constituída de um material cujas características possibilitem o desempenho de tal função. O Quadro 2 indica as funções primárias dos elementos de um sistema de cobertura convencional de aterro, e os materiais mais utilizados para compô-los.

Quadro 2 – Funções primárias dos componentes de um sistema de cobertura convencional de aterro.

Camada	Função Primária	Composição Típica
Solo de Cobertura	Controle de erosão provocada pela água e pelo vento	Solo
	Suporte para vegetação	
	Armazenamento de água	Brita ou seixos
	Proteção contra ciclos de congelamento-descongelamento	
Camada Drenante	Rápida remoção da infiltração	Areia e/ou brita
	Proteção da barreira contra os danos causados pelos ciclos de congelamento-descongelamento	Georedes ou geodrenos
	Manutenção da estabilidade	Geocompostos
Barreira	Interromper o fluxo de água	Argila compactada
		Geomembranas
	Controlar o fluxo de gás proveniente dos resíduos	GCLs
Captação de gás	Direcionamento do gás para os pontos de coleta e remoção	Geocompostos
		Areia e/ou brita
Regularização	Separar a cobertura do resíduo	Solo
	Propiciar a correta inclinação do talude	Geofiltros

FONTE: Rose (2009).

De acordo com Barros (2005), nem todos os componentes são necessários em todos os tipos de sistema de cobertura final. A camada de drenagem, por exemplo, pode não ser necessária em sistemas de cobertura final de regiões áridas. Da mesma forma, a camada de coleta de gás pode ser exigida para algumas coberturas, mas não para outras. Isto dependerá se o resíduo ou o material contaminado produzem gases, que necessitem de coleta e gerenciamento.

Dwyer (2001, 2003) estudou coberturas convencionais baseando-se na política de resíduos sólidos dos Estados Unidos (Resource Conservation and Recovering Act - RCRA) cujas características estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Principais características das coberturas convencionais utilizadas por Dwyer (2003) em seus experimentos.

Cobertura	Requisitos mínimos*	Experimentos**	Fluxo anual médio (mm/ano)
Convencional 1 - RCRA Subtítulo D	Solo superficial: $e \geq 15$ cm; barreira: $e \geq 45$ cm e $k_{sat} \leq 10^{-5}$ cm/s	Solo superficial: $e = 15$ cm; barreira: $e = 45$ cm	1,39
Convencional 2 - RCRA Subtítulo C	Solo superficial: $e \geq 60$ cm; camada drenante: $e \geq 30$ cm e $k_{sat} \geq 10^{-2}$ cm/s; geomembrana sobreposta; camada de solo compactado: $e \geq 60$ cm e $k_{sat} \leq 10^{-7}$ cm/s.	Solo superficial: $e = 60$ cm; camada drenante de areia: $e = 30$ cm; geomembrana; camada de argila compactada: $e = 60$ cm (substituição em 6% do peso de argila por bentonita).	0,04
*Requisitos mínimos exigidos pela RCRA. **Perfil de cobertura visto de cima para baixo. e = espessura da camada; k_{sat} = condutividade hidráulica saturada.			

FONTE: Adaptado e traduzido de Dwyer (2003).

Dados os fluxos anuais médios encontrados para cada cobertura, no Quadro 3, Dwyer (2003) os compara com o fluxo máximo permitido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency - EPA), que é de 1 mm/ano, constatando assim, que a cobertura convencional 1 não é aceitável para locais com clima árido ou semiárido, devido à abertura de fissuras no material, facilitando a infiltração.

As camadas de cobertura final, convencionalmente utilizadas no Brasil, são compostas por uma camada de argila sobre o Resíduo Sólido Urbano (RSU), com 60 cm de espessura, sobreposta pela manta de PEAD, a qual é protegida no topo por uma camada de solo, utilizada para o plantio de grama. Este sistema tem o objetivo de impermeabilizar o topo das células.

Em um projeto de sistema de cobertura final de aterros de resíduos sólidos devem ser considerados e avaliados vários fatores. Dentre eles, pode-se citar os listados no Quadro 4.

Quadro 4 – Principais fatores a serem considerados em um projeto de sistema de cobertura final de aterros de resíduos sólidos.

Principais Fatores	Observação
Tipo do resíduo	Resíduo sólido urbano, resíduo perigoso
Classe do resíduo	
Balanço hídrico local	Determina o tipo de solo da cobertura
Clima do local	Determina o tipo de solo da cobertura; influencia no dimensionamento da espessura da camada da cobertura

Erodibilidade do solo	Influencia na inclinação dos taludes; adequação do sistema de drenagem
Resistência ao cisalhamento do solo	
Recuperação da área do aterro	O destino a ser dado à área após a finalização do aterro

FONTE: Adaptado de Barros (2005).

As camadas de cobertura de aterros sanitários de RSU poderão ser constituídas por materiais de características diferentes das argilas convencionalmente utilizadas. Nesse caso, o material não funcionará como barreira impermeável, mas terá a função de armazenar a água de chuva para perder por evaporação posteriormente. Pode ser uma alternativa interessante para reduzir custos e reutilizar alguns tipos de resíduos sólidos, a exemplo do RCC. Essas coberturas são denominadas como alternativas.

3.1.1. Sistemas de Coberturas Alternativas

Em função dos vários fatores que são avaliados em um projeto de cobertura final, em particular aqueles que estão relacionados ao balanço hídrico e ao clima local, tem sido incentivada a pesquisa e a descoberta de materiais alternativos para coberturas, bem como de coberturas com diferentes camadas e espessuras. As coberturas alternativas são subdivididas em: Evapotranspirativas (monolítica), barreira capilar, barreira anisotrópica, metanotrófica, cobertura de argila geossintética.

As coberturas evapotranspirativas possuem um princípio de funcionamento distinto do convencional utilizado para coberturas. Neste modelo, o objetivo não é impedir a entrada da água da chuva, mas sim, montar um sistema de camadas de solo capaz de armazená-la até a ocorrência da evapotranspiração, através de espécies vegetais implantadas em sua superfície.

Segundo Huse (2007), dois aspectos devem ser destacados: as camadas de solo precisam armazenar toda a água infiltrada, mesmo que a chuva seja intensa; e o solo de restituição deve ser compatível com a vegetação nativa a ser cultivada, verificando a sua extensão e densidade, para se obter uma maximização da transpiração.

A partir disto, os projetos têm como objetivo ajustar a capacidade de armazenamento da cobertura até que a taxa de infiltração esteja em um nível aceitável. Esta capacidade varia em função da espessura da camada de solo usada para o armazenamento hídrico (JOAQUIM JÚNIOR, 2015).

Dwyer (2001, 2003), em sua pesquisa em Albuquerque (Novo México), comparou o desempenho de coberturas alternativas de aterro, com diferentes custos e complexidade, para a estabilização provisória ou encerramento definitivo, em ambientes árido e semiárido. Estão apresentadas no Quadro 5, as principais características das coberturas estudadas por Dwyer (2003).

Quadro 5 - Principais características das coberturas alternativas utilizadas por Dwyer (2003) em seus experimentos.

Cobertura	Experimentos*	Observação	Fluxo anual médio (mm/ano)
Alternativa 1 - Cobertura de argila geossintética (GCL)	Solo superficial: e = 60 cm; filtro de geotêxtil; camada drenante com areia: e = 45 cm; geomembrana; camada de argila geossintética (GCL)	O GCL é composto por dois “não-tecidos”, formando uma espécie de sanduíche com uma fina camada de bentonita. Tem uma $k_{sat} = 5.10^{-9}$ cm/s	0,48
Alternativa 2 - Barreira capilar	Solo superficial: e = 30 cm; camada drenante com areia: e = 15 cm; camada drenante com pedregulho (10 mm): e = 22 cm; barreira de solo: e = 45 cm ($k_{sat} = 5,14.10^{-4}$ cm/s); camada drenante com areia (1 mm): e = 30 cm	Característica de impedância entre as camadas de diferentes permeabilidades dificultam a passagem de líquidos da camada menos permeável para a mais permeável	0,16
Alternativa 3 - Barreira anisotrópica	Solo superficial (substituição de 25 % do peso do solo por pedregulho): e = 15 cm; solo compactado: e = 60 cm ($k_{sat} = 4.10^{-4}$ cm/s); fina camada de areia: e = 15 cm; camada de pedregulho: e = 15 cm	Associação de duas barreiras capilares: camadas de solo nativo e areia fina (primeira barreira); camadas de areia fina e pedregulho (segunda barreira)	0,04
Alternativa 4 - Evapotranspirativa	Solo superficial: e = 15 cm; solo local compactado: e = 90 cm ($k_{sat} = 4,3.10^{-5}$ cm/s)	Camada monolítica; colocou-se uma fina camada de pedregulho (2 a 4 cm) na superfície da cobertura, com o objetivo de estimular a vegetação e minimizar a erosão	0,05
*Perfil de cobertura visto de cima para baixo. e = espessura da camada; k_{sat} = condutividade hidráulica saturada.			

FONTE: Adaptado de Dwyer (2003).

A partir dos valores para os fluxos anuais médios de cada cobertura, no Quadro 5, Dwyer (2003) observa que as coberturas alternativas que mais se adequaram ao clima árido e semiárido, sem ultrapassar o limite estabelecido pela EPA, em todos os anos avaliados, foram as coberturas alternativas 3 e 4. O autor destaca a cobertura alternativa 1 (GCL), pois apesar de ter um fluxo médio anual de 0,48 mm/ano, no ano de 1999 este valor foi de 2,56 mm/ano, ultrapassando em muito o limite estabelecido pela EPA e, portanto, deve ser evitada para locais de clima seco. Isto ocorre porque a bentonita presente no GCL resseca e não se repara totalmente; o solo exposto a ambientes secos é susceptível a trocas iônicas, que aumentam a

permeabilidade do revestimento e, além disto, o mesmo é susceptível a danos pela intrusão das raízes da vegetação. A cobertura alternativa 2 (barreira capilar) apresentou problemas na fixação da vegetação, devido à presença de fendas, sendo por isto, descartada da avaliação.

Blight et al. (2003) estudaram coberturas alternativas para locais de clima semiárido, efetuando seus experimentos na África do Sul. Foram testadas coberturas monolíticas de diferentes espessuras e mesmo material (areia com coeficiente de permeabilidade saturada de 5.10^{-2} cm/s), verificando a quantidade de líquido escoado, no aterro sanitário Coastal Park, em Cape Town. Foram construídas cinco células experimentais de 10 m de largura por 10 m de comprimento, distantes umas das outras 5 m, seladas com uma geomembrana de 1 mm de espessura, cujas características estão descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Características das coberturas estudadas por Blight et al. (2003).

Cobertura	Composição	Quantidade de água armazenada (mm)	Precipitação pluviométrica anual (mm)
C1	Solo superficial: Areia e = 20 cm; Solo argiloso compactado: e = 30 cm, dividido em 2 camadas de 15 cm	140	520
E2	Areia e = 50 cm	110	
E3	Areia e = 75 cm	90	
E4	Areia e = 100 cm	115	
E5	Areia e = 150 cm	179	
C = Convencional; E = Evapotranspirativa; e = espessura da camada.			

FONTE: Adaptado de Blight et al. (2003).

Albright et al. (2003) avaliaram os comportamentos de coberturas convencionais e alternativas de aterro sanitário, em cidades de clima árido/semiárido e úmido/subúmido, dos Estados Unidos. Para tanto, foram construídos lisímetros, em cada uma das localidades escolhidas, resultando em 10 convencionais (segundo o RCRA) e 14 alternativas (barreira capilar e monolítica), cujas dimensões foram 20 m de comprimento, 10 m de largura e de 1 a 2 m de profundidade. As taxas de percolação nas coberturas encontram-se no Quadro 7.

Quadro 7 – Resultado das taxas de percolação para as coberturas alternativas estudadas por Albright (2003).

Clima	Local	Taxa de percolação (mm/ano)		Observação
Áridos e semiáridos	Sacramento	Camada monolítica fina (1,5 m): 130	Camada monolítica espessa (2,7 m): 8,5	A vegetação não suportou o período frio, sendo removida, o que ocasionou uma maior entrada de água e menor evapotranspiração
	Demais cidades	1,5		-
Úmidos e subúmidos	Albany	1º ano: 177	2º ano: 85	No período mais frio a vegetação foi afetada
	Cedar Rapids	1º ano: 150	2º ano: Não houve medição	Problemas técnicos no 2º ano
	Omaha	Camada monolítica fina (1 m): 94 (1º ano); 4,8 (2º ano)	Camada monolítica espessa (1,4 m): 56 (1º ano); 0 (2º ano)	Houve precipitações severas em um determinado período do primeiro ano
	Marina	67,1		-

FONTE: Adaptado de Albright (2003).

De modo geral, os resultados obtidos sugerem uma complexidade na análise das coberturas alternativas, devendo-se considerar as questões da fixação da vegetação e a capacidade de armazenamento de água das camadas, com maior rigor.

Huse (2007) fez uma análise da influência de trincas da camada de cobertura no balanço hídrico de um aterro de resíduos sólidos, adicionando bentonita ao solo S.A. Paulista, substituindo 5% e 10% em peso do solo por este material. A partir disto, verificou que o aumento da porcentagem de bentonita adicionada ao solo proporciona uma maior sucção, bem como um menor volume de vazios, uma redução da condutividade hidráulica e um aumento da retenção de líquidos, isto é, maior capacidade de campo. Estes fatores são de extrema importância para solos utilizados como camada de cobertura, pois afetam diretamente o balanço hídrico de um aterro de resíduos sólidos, evitando a infiltração de água e permitindo uma diminuição da produção de lixiviado. De acordo com Huse (2007), com a adição de bentonita, as trincas se regeneram a cada ciclo de umedecimento, reduzindo os caminhos preferenciais no solo.

Catapreta, Simões e Silveira (2011) avaliaram os sistemas de cobertura intermediária e final empregados no aterro sanitário de Belo Horizonte/MG. Os resultados obtidos pelos autores encontram-se no Quadro 8.

Quadro 8 – Parâmetros avaliados por Catapreta, Simões e Silveira (2011).

Parâmetros	Resultados	Observações
Permeabilidade	Condições ótimas: $1,9 \times 10^{-9}$ cm/s < k < $6,6 \times 10^{-5}$ cm/s	A baixa capacidade de suporte dos resíduos dispostos dificulta a compactação
	Campo: $2,3 \times 10^{-3}$ cm/s < k < $5,9 \times 10^{-3}$ cm/s	
Grau de compactação	Esperado: Mínimo de 95% do Proctor Normal	-
	Observado: Em média, 90%	
Relação chuva-vazão de lixiviado	Durante a operação do aterro: 0,25	Sugere o bom desempenho da cobertura final
	Após o encerramento: 0,12	

FONTE: Adaptado de Catapreta, Simões e Silveira (2011).

Segundo Catapreta, Simões e Silveira (2011), os resultados gerais, exibidos no Quadro 8, sugerem ser viável a utilização de resíduos de construção civil como material de cobertura intermediária de RSU dispostos em aterros sanitários. Os RCC apresentam desempenho adequado sob o ponto de vista sanitário e operacional, além disto, a sua composição possibilita um alto grau de reaproveitamento, por se tratar de resíduos Classe A.

Lopes (2011) trabalhou com uma cobertura denominada metanotrófica, que tem como objetivo a redução das emissões de metano para a atmosfera. As coberturas convencional e metanotrófica foram executadas na célula experimental do aterro da Muribeca/PE, em clima chuvoso, analisando-se sua adequação na região nordeste do Brasil, do ponto de vista de infiltração e de proteção ambiental, observando os resultados para a infiltração anual no Quadro 9.

Quadro 9 – Resultados da infiltração anual (ano de 2010).

	Camada convencional	Camada metanotrófica	Taxa de infiltração - Limite USEPA*
Infiltração anual	Nula	29,8 mm	30 mm/ano
*Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos			

FONTE: Lopes (2011).

Lopes (2011) verificou que a infiltração anual obtida para a cobertura alternativa (metanotrófica) é aceitável. A partir desta pesquisa, é possível observar que o período de estudo foi o de maior índice pluviométrico, indicando a pior situação encontrada, ou seja, em períodos secos esta taxa seria menor.

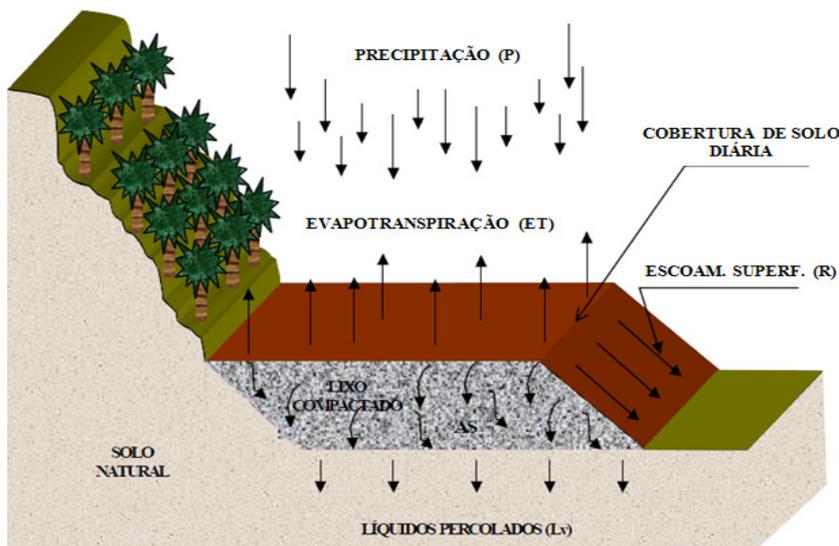
As coberturas alternativas que mostraram os melhores desempenhos em locais de clima árido e semiáridos, ou seja, apresentaram as menores taxas de infiltração de água para o RSU foram:

- Barreira anisotrópica composta por solo superficial de 15 cm para cobertura vegetal; camada de solo compactado de 60 cm ($k_{\text{sat}} = 4.10^{-4}$ cm/s); fina camada de areia de 15 cm; e camada de pedregulho de 15 cm. Sua infiltração média foi de 0,04 mm/ano (Dwyer, 2003).
- Evapotranspirativa monolítica com 90 cm de solo local compactado ($k_{\text{sat}} = 4,3.10^{-5}$ cm/s) com solo superficial de 15 cm para cobertura vegetal. Sua infiltração média foi de 0,05 mm/ano (Dwyer, 2003).
- Barreiras capilares de 1,2 m a 2,0 m de espessura apresentaram infiltrações de água de 1,5 mm/ano cada uma (Albright, 2003).
- Evapotranspirativa monolítica com 2,7 m de espessura infiltrou 8,5 mm/ano (Albright, 2003).

3.2. BALANÇO HÍDRICO (BH) DE ATERRO DE RSU

O balanço hídrico de um aterro de RSU consiste em fazer a sua contabilidade hídrica, considerando-se sistematicamente todos os fluxos hídricos positivos (entrada de água) e negativos (saída de água), exemplificado, de modo simplificado, na Figura 3.

Figura 3 – Componentes do balanço hídrico em aterro sanitário.



FONTE: Sobrinho (2000).

Esses fluxos decorrem de trocas com a atmosfera (precipitação pluviométrica, condensação, sublimação, evaporação e transpiração), do movimento superficial (escoamento), da infiltração, umidade dos constituintes do aterro e do tempo (SÃO MATEUS, 2008).

A equação geral definida para o balanço hídrico considera que a quantidade de água que entra na célula é igual a quantidade de água que sai. Evidenciando os parâmetros envolvidos neste balanço, tem-se a equação (1).

$$P + w_c + w_{RSU} = ES + E + Perc + \Delta Perdas \quad (1)$$

Onde:

P: precipitação pluviométrica; w_c : umidade do material de cobertura; w_{RSU} : umidade que chega com os resíduos; ES: escoamento superficial; E: evaporação real; Perc: geração de percolado; $\Delta Perdas$: Perdas pelo processo de decomposição do RSU.

Para o balanço hídrico da cobertura (Equação 2), desconsidera-se a umidade dos resíduos (w_{RSU}) e, a geração de percolado, por sua vez, chama-se infiltração no RSU (I_{RSU}). Além disto, há um armazenamento de umidade no material de cobertura (Δw).

$$P + w_c = ES + E + I_{RSU} + \Delta w \quad (2)$$

Através do BH é realizada a estimativa da vazão de líquido lixiviado, que considera a precipitação pluviométrica como um parâmetro de entrada de água no sistema e, associada aos critérios operacionais do aterro e às características dos resíduos, interfere na geração dos lixiviados (SIMÕES et al., 2005). Assim, os dados climatológicos são essenciais na determinação do comportamento desta vazão, nas diferentes épocas do ano, variando de acordo com o clima do local onde será instalado o aterro. Em regiões litorâneas, por exemplo, onde há alto índice pluviométrico, deve-se ter uma maior produção de líquido percolado, do que em regiões semiáridas, onde o balanço hídrico é negativo.

Segundo Simões et al. (2005), o BH é influenciado diretamente pelos fatores listados no Quadro 10.

Quadro 10 – Principais fatores que influenciam diretamente o balanço hídrico.

Principais Fatores	Relação com o BH
Teor de umidade dos resíduos sólidos	Água de constituição dos resíduos sólidos; água absorvida da atmosfera
Teor de umidade do material de cobertura do aterro	Quantidade de água presente no solo de cobertura; depende do tipo do material e da estação do ano
Água que infiltra no topo do aterro	Precipitação pluviométrica que percola na camada de cobertura
Água consumida na formação do biogás	Durante a decomposição anaeróbia dos compostos orgânicos
Água consumida na forma de vapor d'água	Saturação do biogás por vapor d'água
Água evaporada	Evaporação que ocorre de acordo com as condições climáticas locais

FONTE: Adaptado de Simões et al. (2005).

Os mesmos autores consideram, ainda, que a avaliação dessas diversas parcelas requer o conhecimento de um volume significativo de informações, que são:

- registros meteorológicos (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, umidade relativa);
- propriedades dos resíduos (composição, teor de umidade, permeabilidade, capacidade de campo);
- dados operacionais (histórico de enchimento do aterro, projeto de sistema de drenagem interno, registros de vazões de escoamento superficial);
- dados de monitoramento ambiental (volume de líquido lixiviado e gases extraídos) e geotécnico (níveis internos de líquidos).

Esse volume de informações nem sempre está disponível, o que leva o projetista a utilizar métodos simplificados, que podem produzir resultados incoerentes, o que leva ao sub ou superdimensionamento de alguns elementos do projeto, como, por exemplo, a lagoa de armazenamento de líquido percolado.

Utilizando o método de Fenn et al. (1975) em sua pesquisa, como um dos modelos a avaliar o balanço hídrico de um aterro sanitário, Capelo Neto et al. (1999) o compara com o método Suíço, objetivando a determinação do volume de percolado gerado, no Aterro Sanitário Oeste em Caucaia/CE. Os dados obtidos foram confrontados com os valores medidos em campo e correlacionados com as precipitações pluviométricas. Constatou-se que apesar de terem formas similares, a curva de geração de percolado teve uma escala cerca de 200 vezes menor do que a curva da precipitação, reforçando a hipótese de que em locais com

balanço hídrico deficitário haverá pouca ou nenhuma geração de percolado; os picos de precipitação não se refletiram diretamente na geração de percolado, o que pode significar que houve o amortecimento pela retenção dos líquidos na massa de resíduos ou pouca infiltração na camada de cobertura; nenhum dos métodos utilizados (suíço e balanço hídrico), conseguiram simular com precisão, a geração real de percolado no aterro, sendo os valores calculados por estas simulações, em média, 82 vezes maior que o valor medido no período estudado.

Em sua pesquisa, Blight e Fourie (1999) consideram características de balanço hídrico em aterros sanitários de áreas de climas áridos e semiáridos, citando exemplos de aterros que produzem pouco percolado e outros que não produzem uma quantidade significativa, considerada nula. Inicialmente, avaliaram dois locais de características semiáridas, Joanesburgo (África do Sul) de clima quente, e Regina (Canadá) de clima frio, obtendo um déficit hídrico permanente (evaporação maior do que a precipitação pluviométrica) em todo o período analisado para o primeiro, e entre os meses de abril a outubro (7 meses) para o segundo.

Blight e Fourie (1999) monitoraram os dados de precipitação e lixiviado gerado acumulados, cuja proporção foi relativamente pequena entre o segundo e o primeiro, já que se têm longos períodos sem chuvas, e então o fluxo de líquido percolado cessa. A água consumida por evapotranspiração correspondeu a 68% da água infiltrada no primeiro ano, atingindo 80% no segundo ano, depois da cobertura vegetal ter se estabelecido, concluindo-se que, em casos de coberturas permeáveis, a evapotranspiração pode ser a principal fonte de perda de água, em locais áridos e semiáridos.

Simões et al. (2005) avaliaram o desempenho de modelos de estimativa de balanço hídrico em aterros de disposição de RSU, aplicando um modelo tridimensional, o MODUELO. Para verificar a aplicabilidade do programa, compararam-se os resultados obtidos com os registros de campo das vazões de líquidos lixiviados gerados, nos últimos três meses do ano simulado, constatando-se que a previsão de vazão de líquido lixiviado simulado pelo programa foi na maior parte do ano (10 meses), maior do que a geração medida em campo. Houve uma discrepância entre a ocorrência da precipitação pluviométrica e o início da geração de líquidos lixiviados, indicando a importância da incorporação da capacidade de campo dos materiais na avaliação do balanço hídrico em aterros de disposição de RSU.

Salgado (2010) utilizou o método de Koerner e Daniel (1997), para avaliar a influência no balanço hídrico com a aplicação de agregados reciclados em cobertura de aterros sanitários. Para tanto, foram considerados dois projetos para realizar o cálculo: Projeto 1 -

utilizou dados de agregados reciclados miúdos compactados (RCC) como material de barreira mineral (BARROS, 2005) e os dados de agregados reciclados graúdos (RCC) na drenagem dos gases (AFFONSO, 2005); Projeto 2 – utilizou dados de argila compactada na barreira mineral e dados de pedra britada nº 5 para a drenagem dos gases. Foram empregados os mesmos dados climatológicos em ambas as situações, assim como as características de projeto adotadas. Os resultados do balanço hídrico dos dois projetos propostos encontram-se no Quadro 11.

Quadro 11 – Resumo dos resultados do balanço hídrico para os dois projetos propostos.

	Projeto 1	Projeto 2	Observação
Barreira mineral	Agregado miúdo de RCC compactado	Argila compactada	-
Coefficientes de permeabilidade da barreira mineral	$2,28 \cdot 10^{-5}$ cm/s	$2,00 \cdot 10^{-7}$ cm/s	-
Vazão total de percolação	$7,10 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s	$6,22 \cdot 10^{-5}$ m ³ /s	100 vezes maior no Projeto 1
Drenagem de gases	Agregado graúdo de RCC	Pedra britada nº 5	-
Vazão admitida pelo dreno por unidade de largura	$1,6 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s.m	$2,0 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s.m	Mesma ordem de grandeza

FONTE: Adaptado de Salgado (2010).

Salgado (2010) constatou que a aplicação do agregado miúdo compactado aumenta a percolação das águas pluviais pela barreira mineral quando comparada à argila, devido à diferença entre os coeficientes de permeabilidade. Recomenda-se, portanto, o uso do agregado reciclado associado à geomembrana acima da barreira mineral, que reduz consideravelmente a entrada de água na camada. Quanto à pedra britada natural, pode-se fazer a substituição pelo agregado graúdo de RCC como camada drenante, sem prejuízos com a entrada de água indesejável no sistema.

São Mateus et al. (2012) propuseram um modelo de balanço hídrico a partir do monitoramento de uma célula no aterro sanitário de Salvador/BA, onde consideraram os parâmetros climatológicos do local, parâmetros geotécnicos da camada de cobertura e do RSU. Para o aterro estudado, os autores constataram que o teor de umidade do RSU teve uma maior contribuição na geração de líquidos lixiviados. O modelo proposto conseguiu representar adequadamente o nível de líquidos lixiviados no interior da célula.

Tendo em vista a importância do balanço hídrico no estudo, construção e operação de um sistema de cobertura final de aterro sanitário, torna-se indispensável o detalhamento dos seus componentes, que será mostrado no item 3.2.1.

3.2.1. Componentes do Balanço Hídrico (BH)

No cálculo do balanço hídrico, é necessário conhecer cada um dos seus componentes e suas diversas formas de obtenção. A depender do parâmetro a ser avaliado, pode-se obter os dados por meio de valores tabelados, por modelos previamente desenvolvidos, ou por medições de campo e/ou laboratório.

a) Precipitação pluviométrica

É o conjunto de partículas líquidas ou sólidas da condensação do vapor d'água que caem das nuvens (chuva, chuveiro, neve e granizo) como partículas mais ou menos suspensas na atmosfera (nevoeiro e bruma) e como partículas depositadas (geada, orvalho).

A quantidade total da precipitação pluviométrica que alcança o solo, em um determinado período, é expressa como a altura da lâmina d'água que cobriria uma projeção horizontal da superfície da Terra, considerando que nenhuma perda ocorresse.

A precipitação pluviométrica pode ser medida utilizando-se pluviômetros e pluviógrafos. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) adota os seguintes instrumentos para medir a precipitação:

- pluviômetro tipo “Ville de Paris”;
- pluviógrafo tipo “Hermann” (Sifão);
- pluviógrafo tipo “Balança” (Sifão).

Os pluviógrafos são mais sofisticados e registram em gráfico a quantidade de chuva, sendo possível determinar a intensidade e suas variações durante o período total de chuva. A intensidade da precipitação é medida em mm/h. Em contrapartida, os pluviômetros registram a quantidade de chuva e as leituras são realizadas três vezes ao dia.

b) Evaporação/ Evapotranspiração

Evaporação restringe-se, na meteorologia, à mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta, sendo, ainda, interferida, pela temperatura do ar, vento e pressão de vapor (TUCCI; BELTRAME, 2004).

Na prática, a evaporação é medida como sendo o volume de água líquida evaporada por área na unidade de tempo, ou como a altura (mm) equivalente por unidade de tempo (1 dia) de toda a área. Os instrumentos mais utilizados para medir evaporação são o Tanque “Classe A” e o evaporímetro de Piche.

A evapotranspiração é a associação da evaporação com a transpiração, que é a remoção da água do solo pela vegetação e transferência para a atmosfera na forma de vapor, atingindo a profundidade das raízes.

De modo geral, a evapotranspiração aumenta com o decréscimo da umidade relativa na atmosfera (neste caso, a vegetação se resguarda retendo água para então liberar posteriormente) e com o aumento da umidade do solo, densidade da vegetação, temperatura da superfície, velocidade do vento e profundidade de penetração da raiz.

Existem algumas variações na denominação da evapotranspiração, sendo necessária a apresentação das seguintes definições, dadas por Tucci e Beltrame (2004):

- Evapotranspiração potencial (ET_p): Quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água.
- Evapotranspiração real (ET_r): Quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais existentes, de fatores atmosféricos e umidade de solo. Deve ser igual ou menor que a ET_p.
- Evapotranspiração de referência (ET₀): Ocorre em uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica e nutricional, tendo ótimas condições de desenvolvimento, com altura média de 12 cm, albedo de 0,23 e resistência da superfície de 70 s/m.

A estimativa da evapotranspiração é, provavelmente, a parte mais complexa da análise de balanço hídrico. Uma medição direta de evapotranspiração pode ser obtida por meio da avaliação de balanço hídrico em lisímetros (ou evapotranspirômetros) de solo. Na superfície dos lisímetros, as condições deverão também ser iguais àsquelas do local onde está inserido (DUNNE; LEOPOLD, 1978).

Segundo Tucci e Beltrame (2004), as variáveis controladas no lisímetro (precipitação, escoamento, infiltração, armazenamento e percolação) permitem estabelecer a evapotranspiração real (ET_r) e/ou potencial (ET_p). Para a determinação da ET_r, mantêm-se as condições naturais de umidade do solo; para determinar a ET_p, promove-se a irrigação da cultura implantada no lisímetro, mantendo-se o solo em capacidade de campo.

Também é possível obter a evapotranspiração por meio de métodos indiretos e correlações, tais como:

- métodos indiretos baseados na temperatura (Thornthwaite, 1944; Blaney-Criddle, 1975);
- métodos indiretos baseados na radiação (Jensen-Haise, 1963);
- métodos indiretos combinados (Penman, 1948; Penman-Monteith, 1965);
- correlações com a evaporação direta do tanque Classe A.

O método de Penman-Monteith é o mais recomendado pela FAO (Food and Agriculture Organization) por ser mais sofisticado, devido à necessidade de uma grande quantidade de dados, o que permite uma maior representatividade do local (BARRETO, 2006). Segundo Jensen, Burman e Allen (1990, apud Cabrera, 2011), este método superestima a evapotranspiração de referência em 4% nas regiões úmidas e subestima em 1% nas regiões áridas. Além de dados para Penman-Monteith, os autores apresentaram a performance de outros métodos, como o tanque Classe A, que superestima a evapotranspiração de referência, em 14% para regiões úmidas e 21% para regiões áridas; e o Jensen-Haise, que subestima os valores para regiões úmidas e áridas, em 18% e 12%, respectivamente.

O modelo de Thornthwaite, segundo Barreto (2006), funciona adequadamente em regiões de clima úmido, independente da latitude e altitude, sendo que em condições de aridez, subestima a evapotranspiração e, em situação de superumidade topoclimática, pode superestimar o valor. O mesmo autor considera, ainda, que a equação de Blaney-Criddle não é recomendada para regiões equatoriais, onde a temperatura se mantém estável (oscilam as demais variáveis meteorológicas), já que se trata de um método empírico baseado principalmente na temperatura do ar.

Com a existência de tantos métodos para calcular a evapotranspiração, há a necessidade de critérios para a sua escolha. Para tanto, Peruchi (2009) considera: a disponibilidade de dados meteorológicos – os métodos empíricos baseados na temperatura do ar são os mais empregados, em função de ser uma variável de fácil disponibilidade; a

condição climática local – os métodos empíricos têm aplicação restrita para o clima que foi desenvolvido; a escala temporal das estimativas – o método de Thornthwaite, por exemplo, não tem sensibilidade para estimativas diárias, apenas mensais.

Quando não há parâmetros meteorológicos suficientes para a utilização dos métodos citados, ainda é possível utilizar uma correlação direta com a evaporação do tanque Classe A para a determinação da evapotranspiração de referência. O valor do coeficiente de correlação do tanque, considerando o clima e o meio circundante ao tanque, varia de 0,35 a 0,85 (TUCCI; BELTRAME, 2004) e, é comumente utilizado o valor de 0,7 por vários pesquisadores.

Outros autores, como Ubaldo (2005) e São Mateus et al. (2013), realizaram ensaios de evaporação, visando ter uma taxa de evaporação do solo estudado com relação à evaporação potencial da água. Para tanto, moldaram corpos de prova com o material a ser analisado e, após passarem por processo de saturação, foram deixados no laboratório para evaporar. As perdas de massa dos CPs foram acompanhadas diariamente, assim como as perdas de massa de água de um recipiente que representaria o funcionamento do Tanque Classe A. Deste modo, pôde-se relacionar a perda de umidade com a evaporação através de uma equação, além de um coeficiente médio para a evaporação real dos respectivos solos.

c) Escoamento Superficial

O escoamento superficial é analisado através do “coeficiente de escoamento superficial” e é representado como sendo um percentual da precipitação. Esse coeficiente é influenciado por parâmetros como:

- umidade do solo;
- densidade da vegetação;
- intensidade e duração da chuva;
- tipo de solo;
- inclinação do talude.

Quando se inicia a chuva, o escoamento superficial tenderá a ser pequeno, pois o solo estando com baixa umidade, poderá absorver grande parcela da água precipitada. Porém, com o passar do tempo e continuação da chuva, ele surge e prossegue aumentando, uma vez que o solo já estará com elevada umidade e, portanto, o gradiente hidráulico se reduz apesar de ter

havido aumento da condutividade hidráulica. Na verdade, esse tipo de análise somente será completa se todos os parâmetros citados anteriormente forem considerados em conjunto.

Fenn et al. (1975) apresentam, no Quadro 12, valores do coeficiente de escoamento superficial em função do tipo de solo (arenoso ou argiloso) e da inclinação do talude, que variam de 5% até 20% da precipitação para solos arenosos e, de 13% até 35% para solos argilosos, sendo que os maiores valores referem-se às maiores inclinações ($\geq 7\%$).

Quadro 12 – Valores do coeficiente de escoamento superficial (C').

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente C'	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso	$i \leq 2$	0,05	0,10
	$2 < i < 7$	0,10	0,15
	$i \geq 7$	0,15	0,20
Argiloso	$i \leq 2$	0,13	0,17
	$2 < i < 7$	0,18	0,22
	$i \geq 7$	0,25	0,35

FONTE: Fenn et al. (1975).

d) Infiltração de água no solo

A infiltração é um parâmetro de suma importância no balanço hídrico de um aterro de RSU. Por este motivo, há a necessidade de se estimar o seu valor. Dentre os vários meios de calcular a infiltração, pode-se citar, de maneira mais simples, a subtração da precipitação pluviométrica do local pelo escoamento superficial. É uma forma rápida de obtenção, porém é um valor estimado a partir de outros valores, geralmente adotados, que pode ocasionar erros acumulados.

Outro modo é por meio de métodos de ensaios com infiltrômetros e simuladores de chuva, que obtém a taxa de água infiltrada em um determinado tipo de solo. A taxa de infiltração pode, ainda, ser calculada conhecendo-se o perfil dentro de uma camada de cobertura, utilizando um modelo de infiltração.

Segundo Brandão et al. (2004), o infiltrômetro de anel superestima a taxa de infiltração em relação ao simulador de chuvas devido ao encrostamento da superfície do solo sob chuva simulada, enquanto no infiltrômetro de anel isto não ocorre, uma vez que não existe o impacto das gotas de precipitação contra a superfície do solo.

Outro fator que contribui para que as taxas de infiltração obtidas com o infiltrômetro de anel sejam maiores que as conseguidas com o simulador de chuvas, é que no infiltrômetro de anel existe uma lâmina de água sobre a superfície do solo, que provoca um aumento no gradiente de potencial favorecendo o processo de infiltração (BRANDÃO et al., 2004).

Em se tratando de custos com material para o ensaio, o método do infiltrômetro de anel é menos oneroso do que o simulador de chuva, já que os equipamentos a serem utilizados são mais simples e, conseqüentemente, de obtenção facilitada e menor custo.

➤ Modelos de Infiltração

Os modelos que descrevem a infiltração da água no solo podem ser teóricos ou empíricos. Os empíricos têm a vantagem de permitir relacionar os parâmetros do modelo a características do solo, sem que tenham significado físico; e a desvantagem de que os dados são ajustados para apenas a condição em que a equação foi determinada, sendo válidas para situações com pouca, ou nenhuma, variação. Já os modelos teóricos, são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrito pela Equação de Richards ou mesmo pela Equação de Darcy (BRANDÃO et al., 2004).

Dos vários modelos existentes, destacam-se:

- modelos empíricos (Kostiakov, 1932; Kostiakov – Lewis; Horton, 1940; Holtan, 1961);
- modelos teóricos (Green e Ampt, 1911; Green e Ampt modificado por Mein e Larson, 1973; Philip, 1957).

Dentre os modelos citados, enfatiza-se o modelo de Philip (1957), utilizado nesta pesquisa. Este modelo, apresentado na equação 3, é válido para um período de tempo moderado e considera que a superfície permanece saturada durante todo o período de infiltração.

$$I = S \cdot t^{1/2} + A \cdot t \quad (3)$$

Onde:

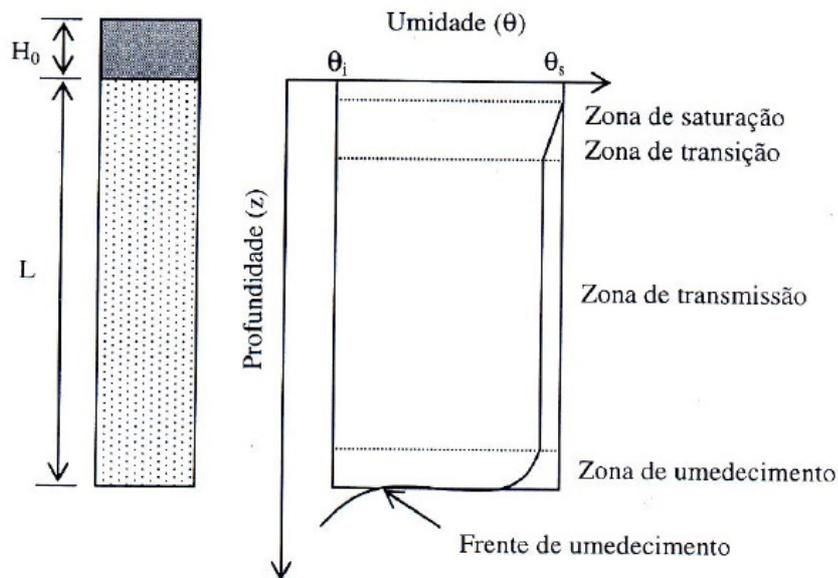
I: infiltração acumulada; S: parâmetro de ajuste, segundo a equação (4); t: intervalo de tempo; A: parâmetro de ajuste que segue o intervalo: $0 \leq A \leq (2/3) k_1$.

$$S^2 = 2k_1 \cdot (h_1 - h_f) \cdot (\theta_1 - \theta_0) \quad (4)$$

Onde:

S: sortividade do solo (indica a capacidade de absorção de água de um solo homogêneo, considerando sua umidade inicial); k_1 : coeficiente de permeabilidade saturada (cm/s); h_1 : lâmina de água na superfície do terreno (será igual a zero, considerando que o volume de água de chuva que não infiltrar escoará superficialmente – “ H_0 ” na Figura 4); h_f : sucção na frente de umedecimento (corresponde ao θ_0); θ_1 : umidade atrás da frente de umedecimento (corresponde à região compreendida entre as zonas de saturação e umedecimento); θ_0 : umidade inicial de campo (corresponde ao “ θ_i ” na Figura 4, e modifica em função da variação da umidade do solo).

Figura 4 - Esquema representativo da umidade no perfil de solo durante a infiltração.



FONTE: Brandão et al. (2004).

A partir da Figura 4, pode-se observar que a primeira zona é a de saturação, com umidade θ_s , mais próxima à superfície; na sequência tem-se a zona de transmissão, não saturada, onde a umidade varia pouco ao longo de sua profundidade; logo abaixo tem-se a zona de umedecimento, na qual a umidade decresce com a profundidade; e, por último tem-se a frente de umedecimento, em que a umidade sofre uma variação abrupta, representando o limite visível da movimentação de água no solo. Abaixo da frente de umedecimento o solo está a umidade inicial θ_i (CECÍLIO, 2002).

e) Armazenamento de água no solo

Segundo Rocca (1981), a capacidade de armazenamento de água no solo é a quantidade de água que pode ser retida no solo e que influencia o fluxo de percolação. Esse parâmetro do balanço hídrico depende de alguns fatores:

- tipo do solo: determina a área de contato entre as partículas e a água;
- estrutura do solo;
- considera-se a compactação, a permeabilidade, a curva característica (relação sucção-umidade);
- espessura da camada: quanto maior a espessura a ser considerada, maior será a quantidade de água armazenada;
- capacidade de campo: detalhada no item 3.3.1.f.

O armazenamento (A_L) em uma camada de solo de espessura “L” pode ser obtido pela equação 5.

$$A_L = \int_0^L \theta \cdot dz \quad (5)$$

Onde:

θ = umidade volumétrica do solo (cm^3/cm^3); z = profundidade estudada.

A maioria dos solos dificilmente atinge a saturação, durante um processo de infiltração. Então, para fins práticos, a capacidade máxima de armazenamento de um solo pode ser obtida pela diferença entre a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e aquela correspondente ao ponto de murcha (θ_{PM}), na curva característica de retenção de umidade do solo (REICHARDT, 1997).

O ponto de murcha é a umidade do solo na qual uma planta não túrgida não restabelece a turgidez, mesmo quando colocada em atmosfera saturada por 12 h. Neste caso, o ponto de murcha acontece quando a reserva de água no solo está no fim. Partindo disto, pode-se obter o armazenamento mínimo através da equação 6.

$$A_{L(PM)} = \int_0^L \theta_{PM} \cdot dz \quad (6)$$

A máxima quantidade de água que o solo poderá armazenar, denominada de água disponível (AD) no solo será:

$$AD = \theta_{CC} - \theta_{PM} \quad \text{ou} \quad AD = A_{L(CC)} - A_{L(PM)} \quad (7)$$

f) Capacidade de campo

Da agronomia tem-se que a água retida entre os poros não fluirá até que seja alcançada uma determinada umidade, abaixo da qual o terreno é capaz de reter frente à ação da gravidade. Este limite de umidade, característico de cada tipo de terreno, é denominado como capacidade de campo.

O conhecimento da umidade na capacidade de campo do solo utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário, é de suma importância para a contabilidade de seu balanço hídrico. A partir disto, pode-se quantificar a água que poderá infiltrar no maciço de resíduos, que influenciará na geração de líquidos lixiviados.

Devido à ausência de normas técnicas para a determinação da umidade na capacidade de campo, alguns autores utilizam de estimativas a partir das curvas de retenção de água dos materiais. No entanto, não há um consenso entre os pesquisadores sobre o valor de sucção associada a este parâmetro, muitos autores sugerem que a sucção de 33 kPa correlaciona-se bem com a capacidade de campo. Este valor funciona adequadamente à solos de regiões temperadas e solos de textura argilosa. Contudo, para solos arenosos e aqueles localizados em regiões tropicais, a sucção de 6 a 10 kPa representa melhor a capacidade de campo visto que como se trata de um conteúdo de água atingido durante os primeiros dias de um processo dinâmico, a influência da estrutura do solo é muito grande (BRITO et al, 2011).

Alguns autores, como Lins (2003), têm desenvolvido metodologias para determinar este parâmetro. O autor obteve valores de capacidade de campo para o solo da camada de cobertura do aterro da Muribeca (Recife/ PE), bem como para amostras retiradas do maciço de resíduos do mesmo aterro, seguindo um procedimento específico e desenvolvido pelo mesmo.

Muitas pesquisas têm se baseado na metodologia de Lins (2003) para a obtenção da umidade na capacidade de campo, como a de Lopes (2011), por exemplo. Em sua pesquisa, a autora retirou amostras das camadas de cobertura de suas células experimentais (cobertura convencional, barreira capilar e metanotrófica), visando a obter a umidade volumétrica na capacidade de campo.

No Quadro 13, seguem os valores obtidos nos trabalhos de Lins (2003), Lopes (2011) e outros pesquisadores da área de Agronomia para embasar os estudos sobre a obtenção da umidade na capacidade de campo.

Quadro 13 – Valores obtidos na literatura para umidade volumétrica na capacidade de campo por tipo de solo.

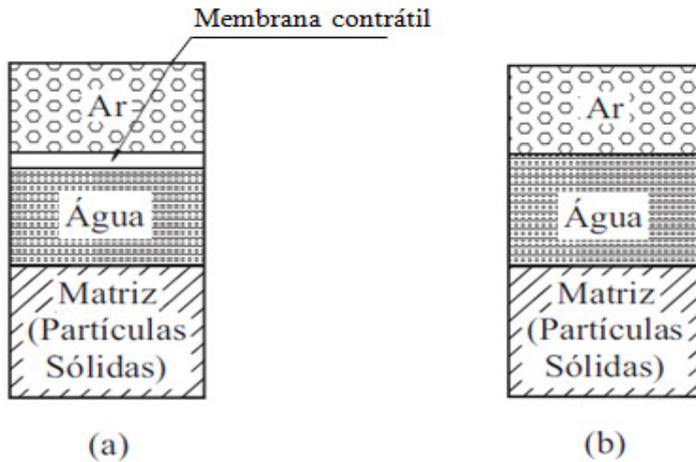
Autor (ano)	Tipo de solo	θ (v/v) (%)	Observações
Costa et al. (1997)	Argiloso	32,3	Agronomia
Lins (2003)	Siltoso	35,0	Aterro (In situ)
Polyanna et al. (2005)	Argiloso	33,4	Agronomia
		32,5	
Andrade e Stone (2011)	Argiloso	40,1	Agronomia
	Arenoso	23,9	
Lopes (2011)	Siltoso	22,2	Células experimentais (In situ)
		20,4	
		28,7	
		24,0	

O teor de umidade correspondente a capacidade de campo é menor que o teor de umidade na saturação. Da mesma forma, os materiais utilizados em coberturas de aterros sanitários não trabalham saturados na maior parte do tempo. Isto implica na necessidade de conhecer o comportamento não saturado dos solos e de outros materiais.

3.3. SOLOS NÃO SATURADOS

Para solos saturados, considera-se que haja um sistema bifásico, formado por minerais e água. Já para solos não saturados, há formas diferentes de classificação, sendo que alguns autores consideram-no como sistema trifásico (partículas sólidas, ar e água) e outros ainda, como um sistema de quatro fases, onde a membrana contrátil (superfície ativa do fluido) é também uma componente do sistema (MACHADO, 1997), como indicado na Figura 5. Em resumo, os solos não saturados são aqueles que se encontram em uma condição intermediária de umidade, entre o estado seco e saturado.

Figura 5 – (a) Sistema não saturado tetrafásico rigoroso do solo; (b) Diagrama simplificado trifásico.



FONTE: Fredlund e Rahardjo (1993).

A membrana contrátil tem como propriedade a capacidade de tração, chamada de tensão superficial. As tensões que controlam o comportamento dos solos não saturados são fortemente influenciadas pela pressão negativa na água intersticial, sendo que a tensão superficial está relacionada à diferença de forças na interface entre a água, o ar e uma superfície de contato, que tende a produzir uma tração ao longo da membrana contrátil, visto que a pressão do ar (u_a) é maior do que a pressão da água (u_w) (FREDLUND E RAHARDJO, 1993). A diferença entre estas pressões causa a curvatura da membrana contrátil que é a sucção matricial, como segue a equação (8).

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (8)$$

A sucção é descrita, por Marinho (2005), como a energia com que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. Esta avidéz por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção em solos é composta de duas partes, a sucção matricial e a sucção osmótica, sendo representada pela equação (9).

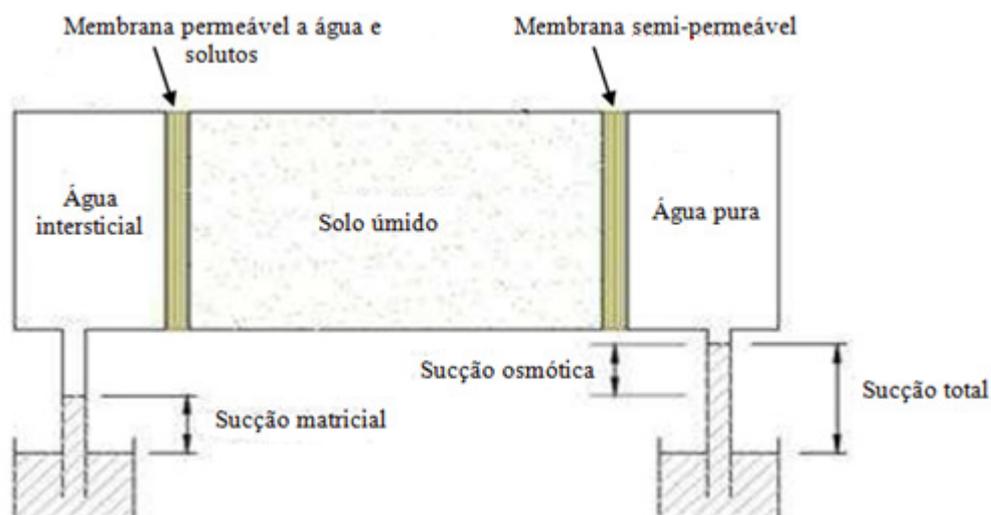
$$\psi_t = \psi_m + \psi_{osm} \quad (9)$$

Onde:

ψ_t = sucção total (kPa); ψ_m = sucção matricial (kPa); ψ_{osm} = sucção osmótica (kPa).

A Figura 6 representa os conceitos de sucção matricial, osmótica e total, sendo que a sucção matricial é igual à sucção total quando a água do solo é pura, restando apenas o efeito da matriz do solo.

Figura 6 – Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total.



FONTE: Marinho (2005).

Os solos não saturados, dependendo do grau de saturação que se encontram, apresentam variação nas características hidráulicas que podem ser avaliadas por meio da curva de retenção de umidade.

3.3.1. Curva de retenção de umidade do solo

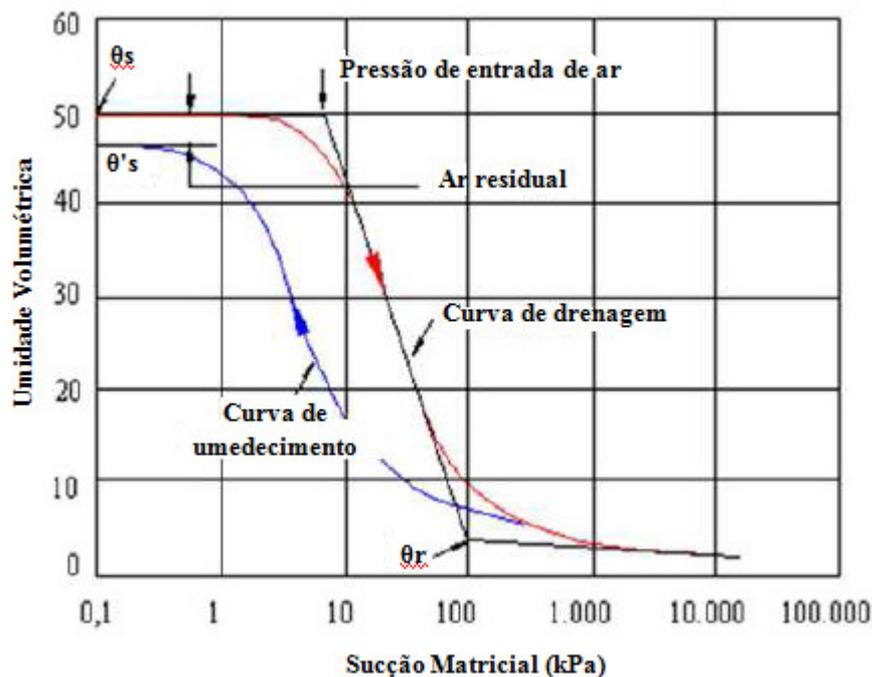
Segundo Guimarães (2013), a curva de retenção de umidade do solo tem sido utilizada para a previsão e quantificação de diversos parâmetros na solução de problemas geotécnicos, como a condutividade hidráulica e os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Em se tratando de projetos, isto pode ser mais atrativo do que os ensaios convencionais de laboratório, já que estes podem ser mais onerosos e de longo prazo.

A curva de retenção de umidade do solo, também conhecida como curva de retenção de água do solo, ou, ainda, curva característica do solo, consiste na relação entre a sucção e a quantidade de água presente em seus interstícios, a qual pode ser definida pelo grau de saturação, umidade gravimétrica ou umidade volumétrica do solo (DIAS, 2012).

A curva característica depende de vários fatores como a composição mineralógica, distribuição granulométrica, textura, estrutura, volume e distribuição dos vazios, histórico de tensões e processo de compactação (LINS, 2003; DIAS, 2012).

É possível observar alguns parâmetros característicos da curva, como: θ_s – teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de drenagem; θ'_s - teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de umedecimento; $(\theta_s - \theta'_s)$ – conteúdo de ar residual entre os processos de drenagem e umedecimento; θ_r - teor de umidade volumétrica residual; a pressão de entrada de ar (ψ_a) representa o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo. Estes componentes estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Principais componentes de uma curva de retenção de umidade.



FONTE: Frenlund e Xing (1994 apud Guimarães, 2013).

O teor de umidade volumétrica é a relação entre o volume de água presente em uma massa de solo e o seu volume total, e pode ser relacionado com o teor de umidade através da multiplicação deste parâmetro pela massa específica seca do solo (em g/cm³).

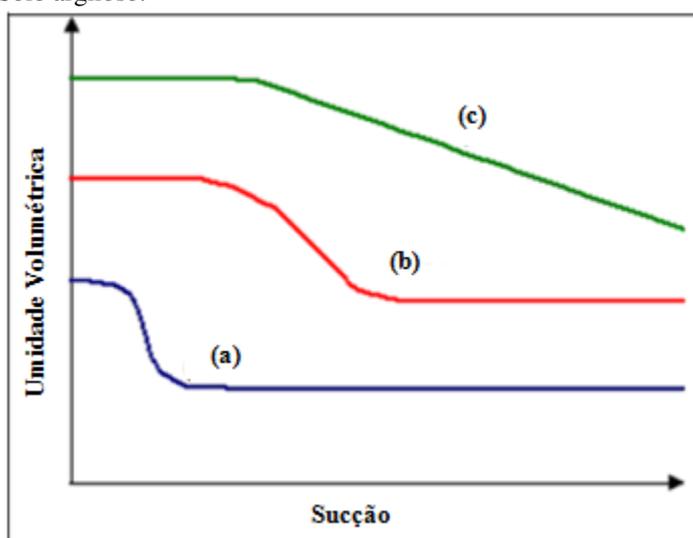
A relação entre θ e ψ é caracterizada por não linearidade e histerese, ou seja, o comportamento entre as variáveis depende do processo antecedente de umedecimento ou secagem (DIAS, 2012).

Haines (1930 apud DIAS, 2012), para explicar a histerese, indicou que o modo de distribuição de umidade no solo não permite condições reversíveis. A drenagem tende a ser

governada por um maior valor de pressão e controlada pelo tamanho dos menores poros. Já o umedecimento é controlado pelo tamanho dos maiores poros (menor valor de pressão). Dessa forma, para determinado valor de sucção, a umidade será maior durante a secagem do que durante o umedecimento.

A Figura 8 traz as curvas de retenção de umidade de acordo com os diferentes tipos de solo. Para solos arenosos, a curva apresenta menor valor de entrada de ar, menor zona capilar e decaimento mais acentuado da umidade com o aumento da sucção (ou seja, a água drena mais rapidamente atingindo a umidade volumétrica residual). Como o fenômeno da capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho do poro, os solos de granulometria mais fina apresentam maior zona capilar, maior valor de entrada de ar e o decaimento da curva fica mais suave. Para solos argilosos, a umidade residual é atingida apenas para valores muito altos de sucção (DIAS, 2012).

Figura 8 – Curva de retenção de umidade para diferentes tipos de solo: (a) Solo arenoso; (b) Solo siltoso; (c) Solo argiloso.



FONTE: Guizelini (2011, adaptado por DIAS, 2012).

Há vários métodos para determinar a sucção, visando obter a curva de retenção de umidade do solo, sendo que cada método possui um intervalo diferente de variação da sucção. No Quadro 14, são apresentados alguns destes métodos.

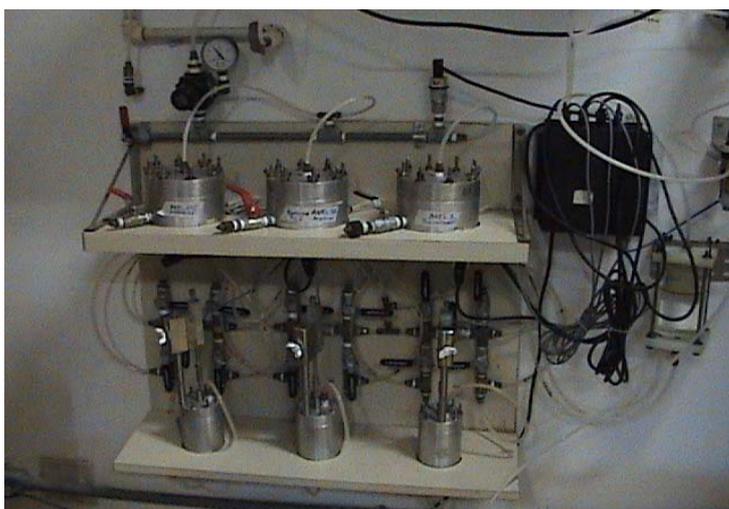
Quadro 14 – Métodos para determinação ou controle da sucção.

Técnica		Sucção determinada	Medida ou controle de sucção através de	Intervalo de sucção (kPa)
Determinação da sucção	Tensiômetro	Mátrica	Pressão de água negativa	0 - 100
	Sensor de condutividade térmica/elétrica	Mátrica	Condutividade térmica	10 - 4000
	Papel filtro	Mátrica e total	Umidade do papel filtro	100 - 3000
	Psicrômetro	Total	Umidade do vapor	100 - 100000
Controle da sucção	Placa de pressão	Mátrica	Pressão do ar	10 - 15000
	Coluna de solo	Mátrica e total	Pressão de água negativa	0 -100
	Centrífuga	Mátrica	Força centrífuga	10 -15000

FONTE: Masrouri et al. (2008 apud DIAS, 2012).

Outro equipamento que utiliza a técnica de translação de eixos foi desenvolvido por Machado e Dourado (2001), e fornece a curva de retenção de água por secagem ou umedecimento, em amostras individuais. O funcionamento do ensaio aguarda o equilíbrio de pressão de água, sendo que é realizado com amostras colocadas em anéis com diâmetro de 5 cm e altura de 2 cm. A partir disto, faz-se a drenagem dos corpos de prova no equipamento mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Equipamento para determinação da curva de retenção de umidade do solo por equilíbrio de pressão – GEOAMB/UFBA.



FONTE: São Mateus (2008).

Após os experimentos em laboratório para a obtenção da curva de retenção, deve-se ajustar os valores adquiridos (pontos experimentais) às funções matemáticas. Para tanto,

alguns modelos são utilizados para reproduzir as curvas de retenção dos solos, tais como: Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Farrel e Larson (1972), Van Genuchten (1980), Williams et al. (1983), Mckee e Bumb (1984), Fredlund e Xing (1994).

Dentre estes modelos, destaca-se o de Van Genuchten (1980) (equação 10), um dos mais empregados para o ajuste da curva, que foi utilizado no balanço hídrico de São Mateus et al. (2012) e aplicado ao presente estudo.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad (10)$$

Onde:

θ_r : teor de umidade volumétrica residual; θ_{sat} : teor de umidade volumétrica saturada; ψ : sucção; α , m e n : parâmetros de ajuste.

Para os valores de α , m e n têm-se, normalmente (HILLEL, 1998 apud DIAS, 2012):

- $\alpha > 0$; $10^{-3} < \alpha < 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ - está relacionado com o valor da pressão de entrada de ar na curva de retenção de umidade do solo;
- $n > 1$; $1,2 \leq n \leq 4$ - relaciona-se com a inclinação no ponto de inflexão da curva de retenção de umidade do solo;
- $0 < m < 1$;
- entre m e n pode-se ter, ainda, uma linearidade: $m = 1 - (1/n)$.

3.3.2. Condutividade hidráulica

De modo geral, a condutividade hidráulica pode ser definida como uma medida da mobilidade da água dentro do solo. É chamada, também, de coeficiente de permeabilidade dos solos, e depende de vários fatores correspondentes às características tanto do solo quanto do fluido. São eles:

- fluido: Viscosidade dinâmica e peso específico (NUTTING, 1930 apud CARVALHO, 2015);
- solo: Tamanho e distribuição dos poros (relacionados ao índice de vazios), distribuição granulométrica, rugosidade das partículas minerais e grau de saturação do solo (LAMBE E WHITMAN, 1969).

Bensen e Daniel (1990) demonstraram, em sua pesquisa, a grande influência que o tamanho dos agregados de partículas exerce sobre a permeabilidade dos solos compactados, quando a compactação é realizada com o material seco. Quando esta ocorre na umidade ótima, os autores não observaram uma dependência do tamanho dos agregados de partículas, indicando a importância da umidade de compactação na permeabilidade do solo.

Para solos argilosos, outros fatores físico-químicos do fluido permeado podem influenciar significativamente na permeabilidade do mesmo, como a constante dielétrica, a concentração eletrolítica, a troca catiônica (SHARMA E LEWIS, 1994).

A determinação da condutividade hidráulica saturada pode ser realizada em laboratório, por meio de permeômetros de carga constante ou variável, medidas indiretas obtidas através de ensaios de adensamento ou em campo. Estes ensaios são padronizados por normas técnicas, sendo que para amostras de solos argilosos, o ensaio mais comum é o de carga variável, definido pela NBR 14545 (ABNT, 2000), e para solos arenosos utiliza-se a NBR 13292 (ABNT, 1995), ensaio de permeabilidade a carga constante.

Para solos não saturados, o valor da condutividade hidráulica é menor do que para os solos saturados. Isto se deve ao fato de que quando o solo está saturado todos os poros estão preenchidos com água, sendo uma fase contínua e a condutividade hidráulica será máxima; quando o solo se torna não saturado, alguns destes poros ficam preenchidos com ar diminuindo a área de condução de água, e conseqüentemente, reduzindo sua condutividade hidráulica (DIAS, 2012).

Para determinar a condutividade hidráulica de solos não saturados, existem técnicas diretas, que são os ensaios de permeabilidade em laboratório e ensaios de campo, além das técnicas indiretas (modelos de previsão da condutividade hidráulica), que utilizam o coeficiente de permeabilidade saturada e a curva de retenção de umidade do solo. São alguns dos métodos indiretos existentes: Richards (1931), Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Campbell (1974), Van Genuchten (1980) – baseado em Mualem (1976), Van Genuchten (1980) – baseado em Burdine (1953).

Os parâmetros hidráulicos são considerados nos modelos de balanço hídrico, uma vez que condicionam a infiltração e a evaporação/evapotranspiração.

3.4. MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO

Sabendo-se da importância da avaliação do balanço hídrico, torna-se indispensável o conhecimento de alguns modelos desenvolvidos para se efetuar a estimativa dos líquidos percolados gerados. Assim sendo, foram abordados alguns destes modelos nos itens seguintes.

3.4.1. Método Suíço

O método suíço trata-se de um método simples, e que utiliza coeficientes empíricos, e por este motivo torna-se impreciso, segundo Capelo Neto et al. (1999). A vazão de líquido lixiviado é estimada pela equação (11):

$$Q_{ma} = \left(\frac{1}{t}\right) \cdot P \cdot A \cdot K \quad (11)$$

Onde:

Q_{ma} - vazão média anual de líquido percolado (L/s); t - nº de segundos em 1 ano (31.536.000 s); P - precipitação anual média (mm); K - fator que depende do grau de compactação do lixo; A - área do aterro (m²).

Segundo Orth (1981 apud Capelo Neto et al., 1999), K varia em função do peso específico (γ) do material, de acordo com o Quadro 15.

Quadro 15 - Variação de K com o peso específico do material estudado.

Peso específico do material (kN/m ³)	K
4 – 7	0,25 – 0,50
Acima de 7	0,15 – 0,25

FONTE: Orth (1981 apud CAPELO NETO et al., 1999).

No método suíço, a vazão de líquido lixiviado é calculada a partir de dados anuais ou mensais de precipitação pluviométrica, distribuindo a chuva uniformemente ao longo do período avaliado, sem considerar os picos, intensidade e duração da chuva, que influenciam

no dimensionamento do sistema de coleta e tratamento dos líquidos produzidos e/ou no planejamento de custos mensais e diários para remoção e tratamento externo.

Esse método não permite considerar as condições de evaporação, nem as características da camada de cobertura e umidade inicial dos resíduos depositados no aterro. Em muitos casos, este último parâmetro citado é bastante significativo, sendo responsável pela entrada de um volume expressivo de água na célula (SÃO MATEUS, 2008).

3.4.2. Método de Fenn et al. (1975) ou Método do Balanço Hídrico

O método de Fenn et al. (1975) possui algumas restrições para a sua utilização, correspondentes às características do RSU, da camada de cobertura e dos parâmetros meteorológicos, que são:

- Espessura da camada de cobertura: 60 cm.
- Declividade da cobertura: 2 a 4%.
- Existência de vegetação na cobertura.
- Infiltração resultante apenas da água de chuva (não considera contribuições de água subterrânea, por exemplo).
- Características hidráulicas uniformes para o RSU e cobertura.
- Adição de umidade ocorre somente após o fechamento de cada trincheira.
- Movimento de água somente na direção vertical (área da trincheira muito maior que a profundidade).
- Parâmetros meteorológicos: médias aritméticas mensais de séries históricas.

Para a aplicação deste método, é indispensável conhecer, previamente, alguns dados, que foram destacados no Quadro 16.

Quadro 16 – Dados de entrada do modelo de Fenn et al. (1975).

Dados de entrada	Sigla	Unidade	Obtenção
Precipitação pluviométrica	P	mm	Estação climatológica
Evaporação potencial	EP	mm	Estação climatológica
Coefficiente de escoamento	C'	adim.	Vide Quadro 12

FONTE: Adaptado de Fenn et al. (1975).

No Quadro 12, item 3.3.1.c), foram apresentados valores para o coeficiente de escoamento superficial em função do tipo de solo e da declividade do terreno, variando de acordo com as estações seca e úmida.

A partir daí, segue-se o roteiro apresentado na Tabela 1, para efetuar a estimativa da geração de percolado em um aterro sanitário.

Tabela 1 - Roteiro de cálculo dos parâmetros do modelo de Fenn et al. (1975).

Parâmetro	Sigla	Unidade	Fórmula
Escoamento superficial	ES	mm	$ES = P \cdot C'$
Infiltração	I	mm	$I = P - ES$
Diferença entre a água que infiltra e a que evapora		mm	$I - EP$
Valores negativos de (I - EP)		mm	$\sum(\text{neg}(I-EP))$
Armazenamento de água no solo de cobertura	AS	mm	$(I - EP) > 0, AS = [(\text{espessura da camada}) \times (\text{água disponível na camada})] \rightarrow \text{Vide Tabela 2}$ $(I - EP) < 0, \text{Vide Anexo A}$
Varição no armazenamento de água no solo	Δw	mm	$\Delta w = AS_n - AS_{n-1}$
Evaporação real	ER	mm	$(I - EP) > 0, ER = EP$ $(I - EP) < 0, ER = EP + (I - EP) - \Delta w$
Percolação	I_{RSU}	mm	$I_{RSU} = P - ES - \Delta w - ER$
Vazão mensal	Q_m	L/s	$Q_m = \frac{PER \cdot A_{aterro}}{t}$

FONTE: Adaptado de Fenn et al. (1975).

A quantidade de água disponível no material, segundo Fenn et al. (1975), é igual à diferença entre a quantidade de água na capacidade de campo e no ponto de murcha, de acordo com a Tabela 2, que podem ser obtidos na curva de retenção de umidade dos solos.

Tabela 2 - Umidade no solo (mm de água/m de profundidade de solo).

Tipo de solo	Capacidade de campo	Ponto de murchamento	Água disponível
Arenoso	200	50	150
Siltoso	300	100	200
Argiloso	375	125	250

FONTE: Fenn et al. (1975).

Fenn et al. (1975) apresentam tabelas de armazenamento para outros valores de espessura, que possibilitam a utilização do método para outras condições de contorno (Anexo A).

3.4.3. Modelo de Koerner e Daniel (1997)

No Quadro 17 constam os principais dados de entrada para iniciar a aplicação do modelo de Koerner e Daniel (1997), com suas respectivas siglas e unidades de entrada nas equações, assim como o modo de obtenção de cada um.

Quadro 17 – Dados de entrada do modelo de Koerner e Daniel (1997).

Dados de entrada	Sigla	Unidade	Modo de Obtenção
Temperatura média mensal	$T_{\text{média}}$	°C	Estação Climatológica
Precipitação pluviométrica mensal	P	mm	Estação Climatológica
Duração mensal da luz solar	N	adim.	$N = f(\text{latitude}, T)$ - Valores tabelados
Coefficiente de escoamento superficial	C	adim.	Ver Quadro 13
Umidade gravimétrica na capacidade de campo	w_{cc}	%	Ensaio de laboratório
Peso específico aparente seco do solo	γ_d	kN/m ³	Ensaio de laboratório
Peso específico da água	$\gamma_{\text{água}}$	kN/m ³	10

FONTE: Adaptado de Koerner & Daniel (1997).

Para o cálculo dos parâmetros, observa-se o roteiro de cálculo para o modelo proposto por Koerner e Daniel (1997) apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Roteiro de cálculo dos parâmetros do modelo de Koerner e Daniel (1997).

Parâmetro	Sigla	Unidade	Fórmula
Índice de calor mensal	Hm	adim.	$T \leq 0^\circ\text{C}, Hm = 0$ $T > 0^\circ\text{C}, Hm = (0,2T)^{1,514}$
Índice anual de calor	Há	adim.	$Ha = \sum (Hm)$
Evapotranspiração potencial diária não ajustada	UPET	mm	$T \leq 0^\circ\text{C}, UPET = 0$ $0^\circ\text{C} < T < 27^\circ\text{C}, UPET = 0,53(10T/Ha)^a$ Onde: $a = (6,75 \times 10^{-7}) \cdot Ha^3 - (7,71 \times 10^{-5}) \cdot Ha^2 + 0,01792 \cdot Ha + 0,49239$ $T \geq 27^\circ\text{C}, UPET = -0,015T^2 + 1,093T - 14,208$
Evapotranspiração potencial mensal	EP	mm	$EP = UPET \times N$
Escoamento superficial	ES	mm	$ES = P \times C$
Infiltração	I	mm	$I = P - ES$
Perda acumulada de água	WL	mm	1º Mês de cálculo $(I - EP) \geq 0, WL_1 = 0$ $(I - EP) < 0, WL_1 = (I - EP)$
			Meses subsequentes $(I - EP) \geq 0, (WL)_i = (WL)_{i-1}$ $(I - EP) < 0, (WL)_i = (WL)_{i-1} + (I - EP)_i$
Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo	θ_{cc}	%	$\theta_{cc} = w_{cc} \cdot (\gamma_d / \gamma_{\text{água}})$
Profundidade de alcance máximo das raízes	$(H_R)_{\text{máx}}$	mm	Adotado
Capacidade de armazenamento máxima dos solos na camada superficial	$AS_{\text{máx}}$	mm	$AS_{\text{máx}} = \theta_{cc} \cdot (H_R)_{\text{máx}}$
Capacidade de armazenamento da camada superficial	AS	mm	1º Mês de cálculo $AS_1 = \theta \cdot (H_R)_{\text{máx}}$ Onde: $\theta = w \cdot (\gamma_d / \gamma_{\text{água}})$
			Meses subsequentes $(I - EP) < 0, AS = (AS_{\text{máx}}) \cdot 10^{b \cdot (I - EP)}$ Onde: $b = 0,455 / (AS_{\text{máx}})$ $(I - EP) \geq 0, (AS)_i = (AS)_{i-1} + (I - EP)_i$
Varição no armazenamento de água	Δw	mm	$\Delta w = AS_i - AS_{i-1}$
Evapotranspiração atual ou real mensal	ER	mm	$(I - EP) \geq 0, ER = EP$ $(I - EP) < 0, ER = I - \Delta w$
Percolação	I_{RSU}	mm	$(I - EP) \leq 0, I_{RSU} = 0$ $(I - EP) > 0, I_{RSU} = (I - EP) - \Delta w$
Verificação dos cálculos	CK	mm	Mensal $CK = I_{RSU} + ER + \Delta w + R = P$ Anual $\sum CK = \sum P$
Taxa de percolação mensal	Fluxo	mm/s	$\text{Fluxo} = I_{RSU} / t$ Onde: $t = 2.592.000 \text{ s}$
Vazão	Q_m	m ³ /s	$Q_m = \frac{\text{Fluxo} \cdot At}{1000}$ Onde: $At = \text{área total da camada superficial (m}^2\text{)}$

FONTE: Adaptado de Koerner e Daniel (1997).

3.4.4. Modelo de Blight e Fourie (1999)

O modelo considera características do balanço hídrico de aterro sanitário em clima árido e semiárido na África do Sul e, então, dá exemplos de aterros que produziram pouco ou um volume desprezível de lixiviado.

$$w + I = S + ER + I_{RSU} \quad (12)$$

Onde:

w: umidade inicial do resíduo; I: infiltração no aterro (precipitação – escoamento superficial); S: água adicional armazenada no resíduo; ER: evapotranspiração na superfície; I_{RSU} : lixiviado que sai do aterro.

Para a equação (12), os autores verificaram que:

- Para uma situação ideal, com um clima equilibrado (uniforme), “ I_{RSU} ” será igual a zero até que “S” atinja a capacidade de campo do resíduo.
- Devido à heterogeneidade do RSU, às mudanças nas propriedades físicas produzidas pela decomposição, às variações climáticas, a equação (11) e modelos semelhantes para cálculo de balanço hídrico poderão ser utilizados apenas para se ter uma ideia do funcionamento de aterros.
- “w” e “S” são influenciadas pelo tipo e idade do resíduo, sistema de drenagem e condições climáticas; “S” é também influenciada pela composição do resíduo e pela espessura ou profundidade do mesmo; a infiltração “I” é mais afetada pela cobertura do aterro e pelo clima.
- Os processos evaporativos são também afetados pelo tipo de cobertura do aterro e, se esta não for completamente impermeável, o clima exercerá forte influência.
- “ER” foi estimada em 70% da evaporação de um tanque Classe A.

Blight & Fourie (1999) consideram apenas um valor médio para a umidade inicial do resíduo nas expressões propostas para balanço hídrico, desconsiderando-se as variações de umidade que chega com os resíduos a medida que vão sendo dispostos durante a operação da célula.

3.4.5. Modelo proposto por São Mateus et al. (2012)

O trabalho de São Mateus et al (2012) sugere um modelo para o cálculo do balanço hídrico de aterros de RSU, a partir da equação geral de balanço hídrico. No modelo proposto, os aspectos construtivos e operacionais de aterros de RSU são considerados e, principalmente, a expulsão de líquidos devido à compressão desses resíduos, a sua umidade inicial e a perda de massa por decomposição dos resíduos são identificadas e quantificadas. O modelo proposto é unidimensional e considera como parâmetros de entrada os componentes meteorológicos, precipitação pluviométrica e evaporação, e as características do perfil estudado, tais como umidade, parâmetros hidráulicos, além dos parâmetros de caracterização.

A partir disto, São Mateus et al (2012) consideram que na camada de cobertura, o teor de umidade do material utilizado associado à quantidade de água infiltrada, poderão ser disponibilizados na forma de evaporação, armazenamento na própria camada e/ou infiltração nos RSU, caso haja excedente de água. Desta forma, a equação (13) traz o balanço hídrico da camada de cobertura.

$$I_{(RSU)} = I + w_i - ER - \Delta w \quad (13)$$

Onde:

$I_{(RSU)}$: infiltração no RSU (m^3); I : infiltração no material de cobertura (m^3); w_i : umidade inicial do material de cobertura, convertida em volume de água (m^3); E : evaporação (m^3); Δw : umidade acumulada no material de cobertura (m^3).

Na equação (13), $(I - ER)$ representa a quantidade de água adicionada ou retirada da cobertura. Para o balanço hídrico realizado na cobertura, convencionou-se que:

- Se $[(I - ER) + w_i] < \text{umidade na capacidade de campo } (w_{cc})$, então toda a umidade permanecerá retida no solo, ou seja:

$$[(I - ER) + w_i] = \Delta w$$

$$I_{(RSU)} = 0$$

- Caso contrário, considera-se que:

$$\Delta w = w_{cc}$$

$$I_{(RSU)} = [(I - ER) + w_i] - w_{cc}$$

Sendo “ w_i ”, a umidade gravimétrica inicial da camada de solo, para cada intervalo de tempo “ Δt ”, considerado no balanço hídrico; e “ I ” será calculada conforme Philip (1957), no item 3.2.1.d).

3.5. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC): DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), por meio da lei nº 12.305, considera os resíduos da construção civil como sendo os resíduos provenientes das construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

De modo mais específico, a Resolução CONAMA 307/2002 ainda enfatiza os tipos de materiais, que são: Tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

A Resolução CONAMA 307/2002, estabelece, ainda, diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Em seu artigo 3º, é apresentada uma classificação para os mesmos:

- I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (CONAMA, 2002).

Já para a NBR 10004 (ABNT, 2004a), onde a classificação dos resíduos está diretamente ligada a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características, os resíduos da construção civil se enquadram nos resíduos Classe II B – Não perigosos (Inertes).

Algumas normas brasileiras definem algumas diretrizes e requisitos acerca da utilização dos resíduos sólidos da construção civil. São elas:

- NBR 15116 (ABNT, 2004b): Esta norma estabelece requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, destinados especificamente a obras de pavimentação viária: em camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentação ou revestimento primário de vias não pavimentadas; e, a preparo de concreto sem função estrutural.
- NBR 15113 (ABNT, 2004c): Esta norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.
- NBR 15114 (ABNT, 2004d): Esta norma fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A.
- NBR 15115 (ABNT, 2004e): Esta norma estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado agregado reciclado, em obras de pavimentação.

Do mesmo modo, alguns municípios do país dispõem de especificações para o uso de agregados reciclados, como o caso de São Paulo que, na Portaria 32/SIURB define os critérios que orientam a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista de pavimentos com Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil, denominado "Agregado Reciclado", em obras de pavimentação sob a fiscalização da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP) (SÃO PAULO, 2003).

Esta portaria da PMSP classifica os resíduos sólidos da construção civil que se aplicam à reciclagem, com posterior aplicação em obras de pavimentação, em:

- Resíduos Sólidos Cerâmicos de Construção Civil: Constituídos predominantemente (acima de 70% em massa) de materiais cerâmicos, tais como peças ou fragmentos

de tijolos, telhas, manilhas, blocos, revestimentos e assemelhados, confeccionados com argila e submetidos à queima.

- Resíduos Sólidos Cimentícios de Construção Civil: Constituídos predominantemente (acima de 70% em massa) de materiais compostos por areias com aglomerantes, argamassas, concretos endurecidos, artefatos ou fragmentos de concreto ou argamassa de cimento, tais como blocos, lajes e lajotas, vigas, colunas e assemelhados, tendo como materiais constitutivos básicos as areias, agregados pétreos, cimentos e cales.
- Resíduos Sólidos Mistos de Construção Civil: Constituídos predominantemente (acima de 70% em massa) dos materiais descritos nos itens anteriores.

3.5.1. Emprego de RCC em diversas finalidades

A utilização dos RCC na construção civil pode trazer vários benefícios, como a redução no consumo de recursos naturais não renováveis, a redução de áreas necessárias para aterro, a minimização do volume de resíduos, a diminuição da poluição gerada pelo entulho e de suas consequências negativas, como enchentes, assoreamento de rios e córregos, poluição visual.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) realiza, anualmente, uma pesquisa de informações junto aos municípios, acerca dos resíduos sólidos. No ano de 2014, a pesquisa atingiu um universo de 400 municípios, sendo que estes representam 45,2% da população total indicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), em 2014 (ABRELPE, 2014).

Em geral, os municípios coletam os RCC de obras sob sua responsabilidade e os lançados em logradouros públicos. Mesmo não representando o total de RCC gerado nos municípios, esta parcela é a única que possui registros confiáveis e, portanto, é a que integra a pesquisa municipal realizada anualmente pela ABRELPE. Na Tabela 4, constam o número de municípios pesquisados, a quantidade de RCC e RSU coletados e seus respectivos índices.

Tabela 4 – Dados de coleta de RCC comparados a RSU.

REGIÕES	Nº de Municípios pesquisados	RCC coletado (t/dia)	Índice de RCC (kg/hab.dia)	RSU coletado (t/dia)	Índice de RSU (kg/hab.dia)	RCC/RSU
NORTE	49	4.539	0,263	12.458	0,722	36,4%
NORDESTE	123	24.066	0,428	43.330	0,771	55,5%
CENTRO-OESTE	32	13.675	0,899	15.826	1,040	86,4%
SUDESTE	133	63.469	0,746	102.572	1,205	61,9%
SUL	63	16.513	0,569	21.047	0,725	78,5%
BRASIL	400	122.262	0,603	195.233	0,963	62,6%

FONTE: Adaptado de ABRELPE (2014).

A partir da Tabela 4, estabelecendo uma simples relação entre o RCC coletado e o RSU coletado, a nível de Brasil, pode-se dizer que a quantidade de RCC corresponde a 62,6% da quantidade de RSU, confirmando e constatando aumentos significativos, do que Cabral (2007) já havia concluído em sua pesquisa, que os RCC estavam correspondendo, em média, a 50% dos RSU produzidos nas cidades brasileiras, no período considerado. Percebe-se, também, que os índices para RCC e para RSU estão ficando relativamente próximos, em algumas regiões, como é o caso do Centro-oeste e do Sul, onde chegam a relações de 86,4% e 78,5%, respectivamente.

Para simular um cálculo para a quantidade de RCC necessária, para a sua utilização em cobertura final de uma célula de aterro de município de pequeno porte, segundo a metodologia de Gomes e Martins (2003), adotam-se as seguintes características: Geração total de resíduos – 10,44 t/dia (20 mil habitantes); peso específico dos resíduos na célula – 400 kg/m³; profundidade da célula – 3 m. A partir disto, tem-se as dimensões de uma célula, para a geração de resíduos equivalente a dois meses: 23 x 23 x 3 m. Em Gomes e Martins (2003), consta que, para o cálculo do volume de material de cobertura, utiliza-se uma relação de 25% do volume de resíduos a serem aterrados, gerando um valor, para a espessura da camada de cobertura, de 75 cm, resultando em, aproximadamente, 400 m³ de RCC.

A possibilidade da utilização do RCC, em diversos tipos de obras da construção civil, vem sendo estudada, como indicado no Quadro 18, onde estão resumidos alguns trabalhos que relatam o assunto.

Quadro 18 – Resumo de alguns trabalhos que estudaram o RCC (continua).

AUTOR/ANO	OBJETIVO	TIPO DE MATERIAL UTILIZADO	ENSAIOS	RESULTADOS	CONSIDERAÇÕES DOS AUTORES		
FERNANDES (2004)	Caracterização mecânica de agregados de RCC para bases, sub-bases e reforço de subleito de pavimento	Concreto - RCC fração graúda de 90% em massa de fragmento a base de cimento Portland e rochas; Misto - RCC fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.	Compactação	Proctor intermediário		No ensaio de abrasão, as amostras apresentaram desgaste superior ao limite recomendado pelas normas do DNER, de 50% para base e sub-base, mas isto não impossibilita a utilização do material em outras camadas do pavimento.	
				$18,2 < \gamma_{d \text{ máx}} < 18,7 \text{ kN/m}^3$	$13 < \omega_{\text{ót}} < 17\%$		
				Proctor modificado			
			Abrasão	$18,1 < \gamma_{d \text{ máx}} < 19,1 \text{ kN/m}^3$	$12,5 < \omega_{\text{ót}} < 15,7\%$		
				52% a 66%			
				Não ultrapassou os limites da norma brasileira			
Solubilização	Apresentou concentrações superiores aos limites admissíveis pela norma brasileira para alumínio e fenóis						
AFFONSO (2005)	RCC em camadas drenantes de líquidos lixiviados, especialmente em aterros sanitários	Parte graúda do RCC - agregados N°1 a 4 (11,2 mm a 63,5 mm)	Análise granulométrica	Grupo 2 a 4 - 1,3% de brita 1, 7,0% de brita 2, 66,5 % de brita 3 e 25,1 % de brita 4; Grupo 1 a 4 - 1,8 %, 15,6 %, 42,8% e 39,6% de brita 1,2,3 e 4; Material bem graduado		O material é tecnicamente adequado para aplicação em sistemas de drenagem de percolados em aterro sanitário e, possivelmente, de gases de aterro, mostrando-se equivalente ao agregado natural usado em aterro	
			Compressão confinada	$4,5 < \text{Módulo de compressibilidade secante} < 10,7 \cdot 10^4 \text{ kPa}$			
			Permeabilidade	Horizontal = 10^{-2} m/s ; vertical = 10^{-1} m/s			
BARROS (2005)	Agregado reciclado miúdo de RCC, como material substitutivo, total ou parcial, dos agregados naturais usados nas diversas camadas de um sistema de cobertura final de aterros	Agregado miúdo do RCC	Análise granulométrica	Areia (62%), pedregulho (18%), silte (10%) e argila (10%); Fração areia é bem graduada		O material ultrapassou o limite de lixiviação e solubilização para algumas substâncias, mas não significa uma limitação séria para o seu uso em cobertura de aterros de resíduos; há a possibilidade de substituir o material natural pelo agregado miúdo de RCC em algumas das camadas do sistema de cobertura final de aterro	
			Compactação Proctor Normal	$\gamma_{d \text{ máx}} = 19,3 \text{ kN/m}^3$	$\omega_{\text{ót}} = 13,5\%$		
			Permeabilidade	Sem compactação	$5,4 \cdot 10^{-5} < k_{\text{sat}} < 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$		
				Após compactação	$10^{-7} < k_{\text{sat}} < 10^{-6} \text{ m/s}$		
Curva de retenção de umidade (CRU)	CRU de um silte arenoso; características de uma areia; Condutividade hidráulica não saturada - 10^{-8} cm/s em uma sucção de cerca de 2 kPa, até 10^{-10} cm/s em uma sucção de 20 kPa e até 10^{-12} cm/s em uma sucção de 200 kPa						

AUTOR/ANO	OBJETIVO	TIPO DE MATERIAL UTILIZADO	ENSAIOS	RESULTADOS	CONSIDERAÇÕES DOS AUTORES	
BARROS (2005) - continuação	(continuação)	(continuação)	Erodibilidade	Apresentou desagregação por abatimento, mas não teve comportamento dispersivo		(continuação)
			Lixiviação	Não ultrapassou os limites da norma brasileira		
			Solubilização	Apresentou valores de alumínio e de fenóis ligeiramente acima dos limites admissíveis pela norma brasileira		
SANTOS (2007)	Investigação do potencial de utilização do RCC-R como material de aterro em estruturas de solo reforçado	Agregado reciclado do tipo misto	Análise granulométrica	Material caracterizado como pedregulho arenoso		O RCC-R apresentou baixos coeficientes de variação nos resultados de caracterização, excelentes propriedades de resistência e comportamento mecânico adequado a utilização proposta
			Massa específica dos grãos	28,19 kN/m ³		
			Compactação	$\omega_{ót} = 14,9\%$	$\gamma_{d\text{ máx}} = 18,44 \text{ kN/m}^3$	
			Limites de consistência	Não plástico		
			Cisalhamento direto	$\phi = 41^\circ$ (ruptura plástica)		
pH	pH = 9,1 (material alcalino)					
LIMA (2008)	Aspectos físicos e mecânicos do agregado reciclado da cidade de Fortaleza/CE, para camadas de base, sub-base ou reforço do subleito de pavimento	Agregado reciclado do tipo misto - proveniente da trituração de diversos tipos de materiais de construção: Telha, concreto, gesso, tijolo, etc.	Análise granulométrica	Material bem graduado e não uniforme		O RCC apresentou concentrações acima dos limites da norma brasileira, para lixiviação e solubilização, mas não inviabiliza o seu uso em pavimentação, apenas exige um cuidado maior no projeto de drenagem; os RCC apresentaram características que viabilizam a substituição da brita para aplicação em camada nobre do pavimento
			Compactação	$11 < \omega_{ót} < 14\%$	$19,2 < \gamma_{d\text{ máx}} < 20,4 \text{ kN/m}^3$	
			Lixiviação	Não ultrapassou os limites da norma brasileira		
			Solubilização	Apresentou concentrações superiores de alumínio e de fenóis totais		

AUTOR/ANO	OBJETIVO	TIPO DE MATERIAL UTILIZADO	ENSAIOS	RESULTADOS	CONSIDERAÇÕES DOS AUTORES
MEDEIROS JR ET AL. (2009)	Investigação laboratorial do RCC para substituição do agregado miúdo natural, na produção de concreto com uso em estaca de compactação, para melhoramento de solos em obras de fundação	RCC beneficiado, com partículas menores que 4,8 mm	Análise granulométrica	Partículas menores que 4,8 mm	O RCC se comportou de forma satisfatória, apresentando características semelhantes ao agregado natural comumente utilizado em estacas de compactação
			Limite de Liquidez (LL)	Não apresenta	
			Limite de Plasticidade (LP)	Não apresenta	
			Resistência à compressão simples	9,36 MPa	
BRANDÃO (2011)	Uso do RCC de materiais cimentícios e cerâmicos, como material drenante em aterros de resíduos sólidos	Grupo 1 - Materiais de granulometria menor que 75 mm e maior que 12,5 mm - Material vermelho (1V), Material cinza (1C) e Brita (1B); Grupo 2 - Materiais de granulometria menor que 50 mm e maior que 4,8 mm - Material vermelho (2V), Material cinza (2C) e Brita (2B)	Análise granulométrica	Grupo 1 - distribuições granulométricas distintas Grupo 1 - distribuições granulométricas muito próximas	É possível ser realizada a substituição do agregado, porém para o RCC reciclado do tipo vermelho (cerâmico), não é indicado que seja empregado na drenagem de fundo de células, já que é mais deformável e pode vir a alterar a permeabilidade do material drenante
			Permeabilidade	1V – $9,25 \cdot 10^{-3}$ cm/s e 1C – $9,30 \cdot 10^{-3}$ cm/s 2V – $2,91 \cdot 10^{-3}$ cm/s e 2C – $7,29 \cdot 10^{-3}$ cm/s	
			Compressão confinada	Módulo de compressibilidade secante: 1B e 2B > 1C e 2C > 1V e 2V	
			Massa específica dos grãos	26,68 kN/m ³	
DAMASCENO ET AL. (2014)	Propriedades do RCC para cobertura final alternativa em aterros de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos)	RCC com granulometria inferior a 38,10 mm	Análise granulométrica	Antes da compactação - pedregulho arenoso com pouca argila e vestígios de silte; Após a compactação - areia com pouca argila e vestígios de pedregulho e silte	Os RCC apresentam granulometria semelhante à de um solo granular, tanto para a amostra natural quanto para a amostra compactada; uma característica importante para sua aplicação em camadas evapotranspirativas, é que geralmente são compostas de solos granulares de alto coeficiente de permeabilidade
			Limite de Liquidez (LL)	Não líquido	
			Limite de Plasticidade (LP)	Não plástico	

AUTOR/ANO	OBJETIVO	TIPO DE MATERIAL UTILIZADO	ENSAIOS	RESULTADOS	CONSIDERAÇÕES DOS AUTORES
DAMASCENO ET AL. (2014) - continuação	(continuação)	(continuação)	Compactação Proctor Normal	$\omega_{ót} = 10,5 \%$ $\gamma_{d máx} = 18,25 \text{ kN/m}^3$	(continuação)
			Permeabilidade	$10^{-4} < k_{sat} < 10^{-5} \text{ cm/s}$	
JIMÉNEZ (2016)	Avaliação do desempenho em laboratório do comportamento mecânico da base do pavimento flexível sob carregamentos cíclicos usando agregados reciclados a partir de RCC	Agregado Reciclado de Concreto (ARC) - porcentagem de materiais cimentícios (G1) e pétreos (G2) superam os 90%	Análise granulométrica	Pedregulho médio (65%), areia (30%), finos (5%)	O RCC utilizado nesta pesquisa constitui uma alternativa tecnicamente viável para substituir de maneira parcial ou total as camadas granulares base, sub-base e revestimento asfáltico na construção de pavimentos flexíveis
			Compactação	$\omega_{ót} = 13 \%$ $\gamma_{d máx} = 19,5 \text{ kN/m}^3$	
			Massa específica dos grãos	$27,3 \text{ kN/m}^3$	
			pH	pH = 11,2 (material alcalino)	
			Curva de retenção de umidade (CRU)	Combinação das técnicas de translação de eixos e papel filtro utilizando diferentes energias de compactação e umidades	
$\omega_{ót}$ - umidade ótima; $\gamma_{d máx}$ - peso específico seco máximo; k_{sat} - coeficiente de permeabilidade saturada; ϕ - ângulo de atrito.					

Dentre os trabalhos citados, o que possui uma temática com maior proximidade da presente pesquisa, é o de Barros (2005). Por este motivo, foram destacadas outras características e formas de utilização do RCC nas camadas de um sistema de cobertura de aterro, no Quadro 19.

Quadro 19 – Características e utilização do RCC nos componentes de um sistema de cobertura de aterro.

Componente	Características do RCC	Utilização
Camada de superfície	Material erodível	Utilização com plantio
Camada de proteção	Apresentou valores de k da ordem de 10^{-5} cm/s	NÃO é indicado nesta camada. Precisaria apresentar valores de $k < 10^{-5}$ cm/s
Camada de drenagem	Apresentou valores de k da ordem de 10^{-5} cm/s. Coeficiente de atrito muito baixo no contato com a geomembrana	NÃO é indicado nesta camada. Precisaria apresentar valores de $k > 10^{-2}$ cm/s
Barreira hidráulica ou de gás	Condição saturada: O k é da ordem de 10^{-5} cm/s	NÃO deve ser utilizado em condições saturadas. Material altamente impermeável, com $k < 10^{-9}$ cm/s
	Condição não saturada: $k < 10^{-12}$ cm/s, para uma sucção de 200 kPa	
Camada de coleta de gás	Material composto, na sua maior parte, por areia, porém não somente grossa	NÃO é indicado nesta camada. É necessário material altamente permeável, como cascalhos e britas
Camada de base	Não há restrições	Especificar a espessura adequada e compatível a este material
k: Coeficiente de permeabilidade.		

FONTE: Adaptado de BARROS (2005).

Na pesquisa de Barros (2005) foi constatado que é possível utilizar o RCC em sistemas de cobertura de aterro, porém com restrições a depender da função da camada, sendo preferencialmente usado nas camadas de superfície e de base, sem qualquer tipo de prejuízo técnico e ambiental.

4. ANTECEDENTES

A primeira etapa da pesquisa consta da coleta de dados geotécnicos secundários, obtidos em ensaios de laboratório para o RCC e para o solo do campus universitário da UEFS. Para o RCC, os dados são provenientes de relatórios de pesquisa de iniciação científica (DAMASCENO, 2013 e RIBEIRO, 2014) que fazem parte de um projeto de pesquisa lotado no DTEC-UEFS. Para o solo, os dados foram obtidos a partir de uma dissertação de mestrado (SANTOS, 2015) da mesma instituição. Ambos os materiais são pertencentes às pesquisas coordenadas pela mesma docente.

O RCC utilizado neste trabalho é subproduto de reformas e demolições ocorridas no município de Feira de Santana/BA. Este material constitui a porção passante na peneira de abertura 38 mm e foi coletado em uma baía pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção (DTEC/UEFS). Foi realizada a homogeneização (Figuras 10a e 10b) e o quartejamento (Figuras 10c e 10d) do material, conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

Figura 10 - a) e b) Homogeneização do RCC; c) e d) Quartejamento do RCC



FONTE: Ribeiro (2014).

Os dados apresentados para o RCC são o resultado de ensaios de Granulometria - NBR 7181 (ABNT, 1984), Massa específica dos grãos - NBR 6508 (ABNT, 1984), Compactação - NBR 7182 (ABNT, 1986), Permeabilidade - NBR 13292 (ABNT, 1995), Evaporação (Não normatizado, baseado em UBALDO, 2005) e Capacidade de Campo (Não normatizado, baseado em LINS, 2003).

Na Tabela 5 constam os valores obtidos para o RCC, de vários ensaios realizados em laboratório, por Damasceno (2013) e Ribeiro (2014).

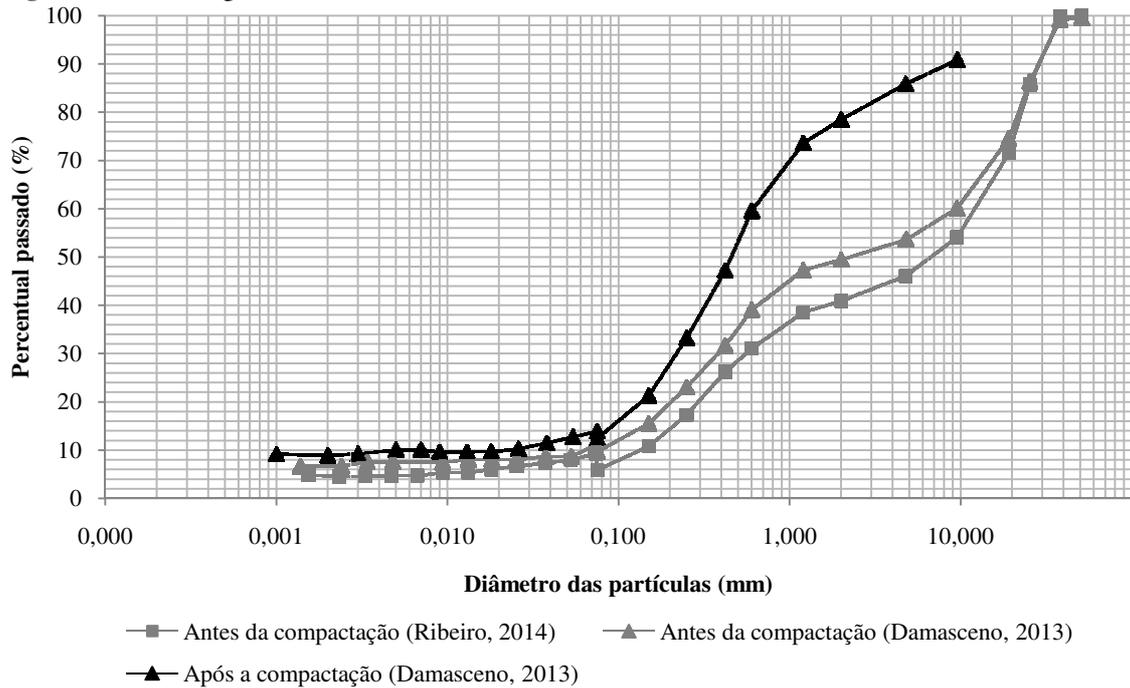
Tabela 5 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados em laboratório para o RCC.

Ensaio	Resultados		
	Parâmetros	Damasceno (2013)	Ribeiro (2014)
Granulometria conjunta	Fração de solo (%)	Pedregulho (45,95); Areia (44,94); Silte (1,16); Argila (7,52)	Pedregulho (54,11); Areia (46,07); Silte (1,16); Argila (4,83)
Compactação Proctor Normal	$\omega_{ót}$ (%)	10,5	10,5
	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	18,25	18,25
Peso específico dos grãos	γ_s (kN/m ³)	26,68	26,53
Evaporação	Taxa média – ER/EP (%)	56	-
	Equação	ER = EP.(6,001 θ - 0,119) para R ² = 0,907	
Capacidade de campo	θ (%)	-	24,14
Permeabilidade	k_{sat} (cm/s)	10 ⁻⁴ (para i = 5,27)	-

$\omega_{ót}$ = umidade ótima; $\gamma_{dmáx}$ = peso específico seco máximo; γ_s = peso específico dos grãos; ER: evaporação real; EP = evaporação potencial da água; θ = umidade volumétrica; i = gradiente hidráulico; k_{sat} = coeficiente de permeabilidade saturada.

FONTE: Damasceno (2013); Ribeiro (2014); Damasceno et al. (2014); Damasceno e São Mateus (2015).

Na Figura 11 tem-se a comparação das curvas granulométricas obtidas para o RCC por Damasceno (2013) e Ribeiro (2014), antes e depois da compactação.

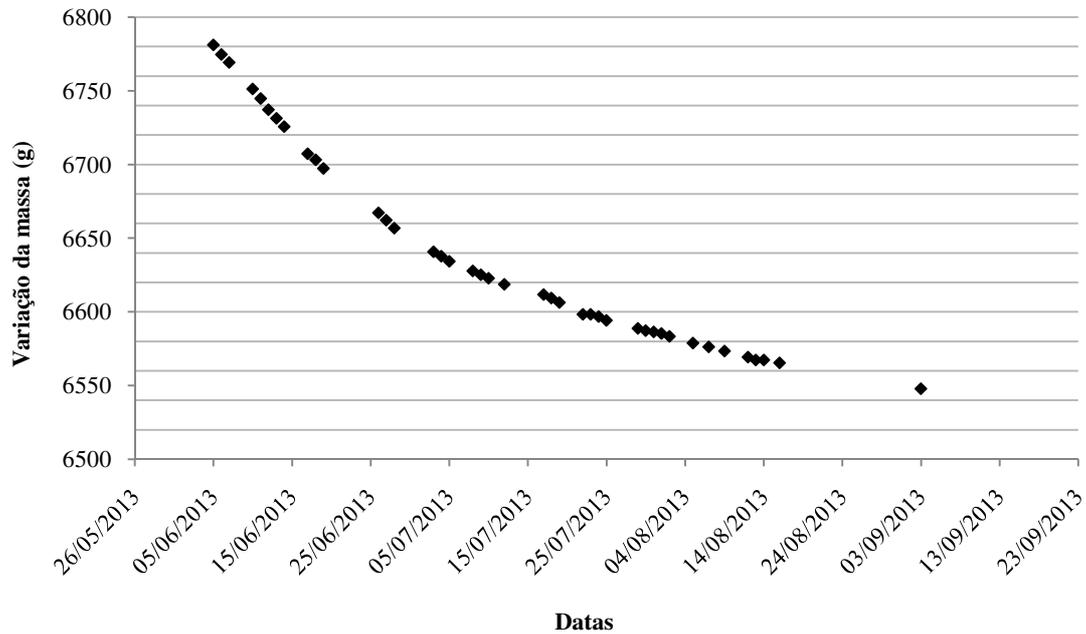
Figura 11 – Curvas granulométricas do RCC.

FONTE: Adaptado de Damasceno (2013) e Ribeiro (2014).

O RCC estudado por Damasceno (2013) foi caracterizado, antes do ensaio, como um pedregulho arenoso com pouca argila e vestígios de silte, e, após o ensaio, o RCC foi equivalente a areia com pouca argila e vestígios de pedregulho e silte. Para o RCC estudado por Ribeiro (2014), a classificação dada foi de um pedregulho arenoso com pouca argila.

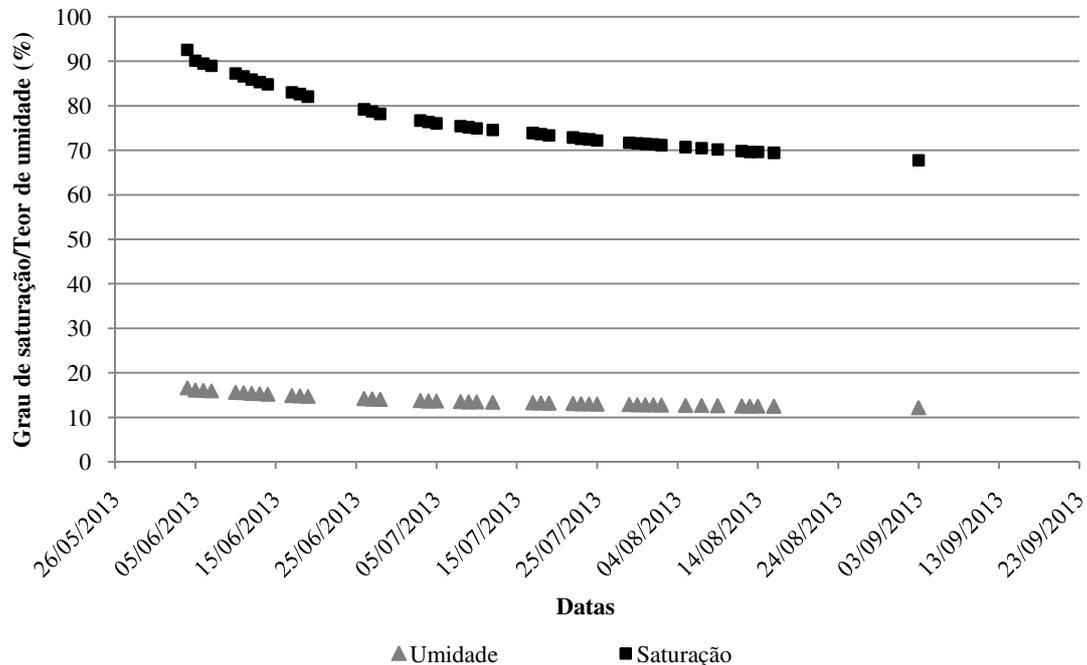
Para o ensaio de capacidade de campo, em 113 dias de drenagem, foram obtidos os dados para as variações de massa, do teor de umidade e do grau de saturação do corpo de prova, de acordo com a quantidade de dias decorridos do ensaio, como pode ser observado nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 – Ensaio de capacidade de campo do RCC: Variação de massa em função do tempo



FONTE: Adaptado de Ribeiro (2014).

Figura 13 - Ensaio de capacidade de campo do RCC: Variação do teor de umidade e do grau de saturação em função do tempo.



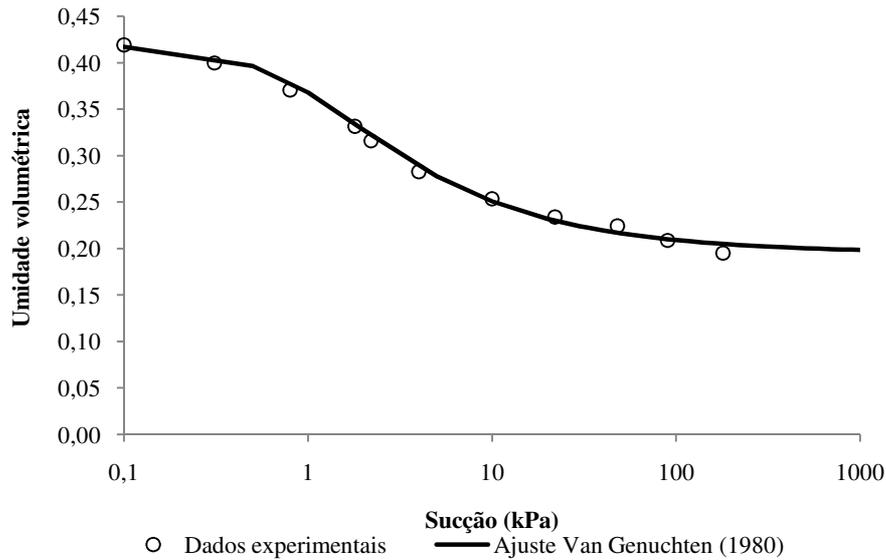
FONTE: Adaptado de Ribeiro (2014).

Observa-se na Figura 13, que com 38 dias a perda de umidade ocorre a uma taxa muito inferior quando comparado com o período inicial. Sendo assim, a umidade correspondente a capacidade de campo foi considerada como sendo a umidade para o final do primeiro período,

quando a perda de água se torna praticamente constante. Isto pôde ser observado, também, na Figura 12.

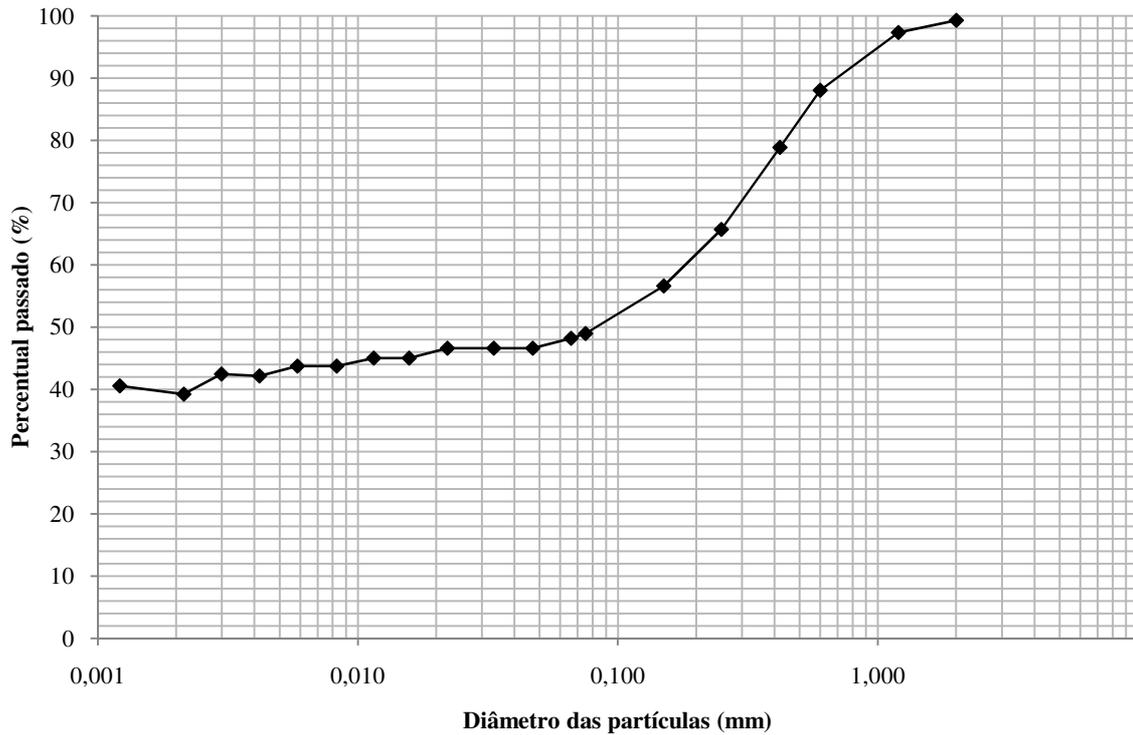
A Figura 14 apresenta a curva de retenção de umidade para o RCC obtida por meio da técnica de translação de eixos com energia de compactação proctor normal, para a umidade gravimétrica de 13%.

Figura 14 – Curva de retenção de umidade para o RCC



FONTE: Adaptado de Jiménez (2016).

Como nas camadas de cobertura de aterros sanitários são utilizados solos, para efeito comparativo, foram coletados os resultados de laboratório de Santos (2015), para um solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA, que seguem na Figura 15 e na Tabela 6.

Figura 15 – Curva granulométrica para um solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA

FONTE: Santos (2015).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios realizados em laboratório para o solo.

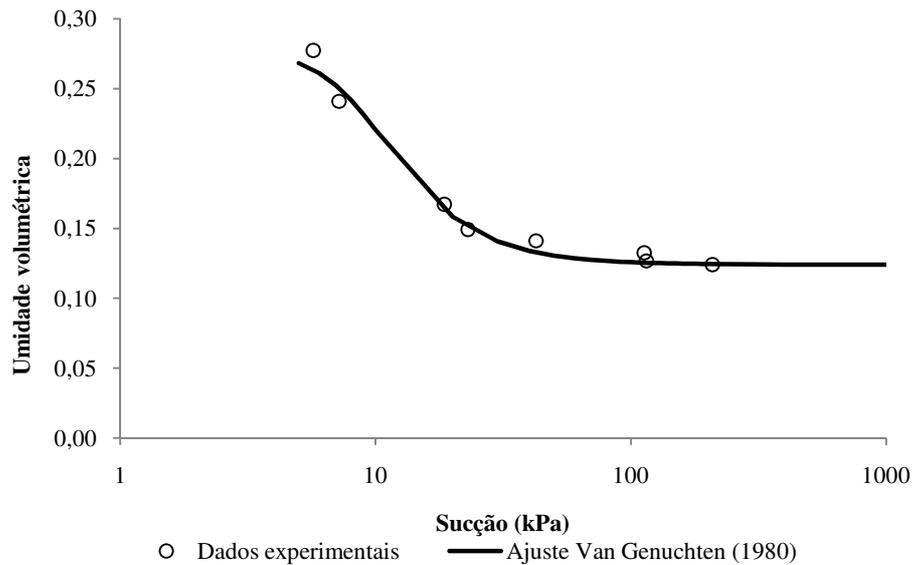
Ensaio	Resultados	
Granulometria conjunta	Pedregulho (%)	0
	Areia grossa (%)	0
	Areia média (%)	23
	Areia fina (%)	28
	Silte (%)	9
	Argila (%)	39
	Classificação: Areia fina argilosa	
Peso específico dos grãos	γ_s (kN/m ³)	26,63
Compactação Proctor Normal	$\omega_{ót}$ (%)	12,1
	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	19,6
Permeabilidade	k_{sat} (cm/s)	$8 \cdot 10^{-7}$
Limites de consistência	LL (%)	33
	LP (%)	14
	IP (%)	19

γ_s = peso específico dos grãos; $\omega_{ót}$ = umidade ótima; $\gamma_{dmáx}$ = peso específico seco máximo; k_{sat} = coeficiente de permeabilidade saturada; LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade.

FONTE: Santos (2015).

Santos (2015) obteve as curvas de retenção de umidade por secagem, no equipamento desenvolvido por Machado e Dourado (2001). Foram ensaiados três corpos de prova do mesmo solo, ajustando-se os dados experimentais com a utilização do modelo de Van Genuchten (1980), conforme Figura 16.

Figura 16 – Curva de retenção de umidade para o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA.



FONTE: Adaptado de Santos (2015).

5. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido, utilizando parâmetros determinados em laboratório para o RCC e o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA, na simulação de balanço hídrico para camada de cobertura de aterro sanitário, aplicando dois modelos de balanço hídrico, Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012).

A metodologia consistiu das seguintes etapas:

a) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- Revisão bibliográfica sobre aterros sanitários; sistemas de cobertura final e balanço hídrico de aterros sanitários de RSU; solos não saturados; modelos de balanço hídrico; RCC.

b) COLETA DE DADOS

- Para o RCC - Coleta dos resultados de ensaios de laboratório, realizados por Damasceno (2013) e Ribeiro (2014), conforme apresentado no item 4.
- Para o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA - Coleta dos resultados de ensaios de laboratório, realizados por Santos (2015), conforme apresentado no item 4.

c) REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

- Para o RCC – Realização de ensaio de solubilização, de acordo com a norma NBR 10006 (ABNT, 2004), com o objetivo de avaliar a periculosidade do material.
- Para o solo do campus universitário da UEFS em Feira de Santana/BA - Realização dos ensaios complementares de evaporação e capacidade de campo.

d) SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

- Aplicação dos resultados dos ensaios de laboratório ao modelo de balanço hídrico de Fenn et al. (1975) e ao modelo proposto por São Mateus et al. (2012), para a camada de cobertura de aterros, com o auxílio de planilhas do Excel. Para o modelo de Fenn et al. (1975), o item 3.5.1 apresenta o método de obtenção dos parâmetros. Para o modelo de São Mateus et al. (2012), os dados necessários e modos de obtenção, estão listados no Quadro 20.

Quadro 20 – Modo de obtenção dos parâmetros para aplicação no modelo de São Mateus et al. (2012).

Parâmetros	Obtenção
Umidade inicial na cobertura ($w_{i(solo)}$)	RCC: umidade ótima, obtida no ensaio de compactação proctor normal, realizado por Ribeiro (2014) Solo: umidade ótima, obtida no ensaio de compactação proctor normal, realizado nesta pesquisa
Infiltração na cobertura (I)	Calculada pelo modelo de Philip (1957), seguindo as informações do Quadro 21
Evaporação (ER)	RCC: equação obtida no ensaio de evaporação realizado por Damasceno (2013) Solo: equação obtida no ensaio de evaporação realizado neste trabalho, seguindo a metodologia de Ubaldo (2005)
Espessura da camada de cobertura (D)	Adotado o valor de 60 cm
Peso específico “in situ” da camada de cobertura	RCC: valores obtidos nos ensaios de compactação proctor normal, realizados por Ribeiro (2014) Solo: ensaio de compactação proctor normal, realizado neste trabalho
Condutividade hidráulica saturada (k_1)	RCC: valores obtidos no ensaio de permeabilidade realizado por Damasceno (2013) Solo: valores obtidos no ensaio de permeabilidade realizado por Santos (2015)
Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc})	RCC: valor obtido no ensaio para determinação da curva de retenção de umidade, encontrado na literatura (JIMÉNEZ, 2016) Solo: valor obtido no ensaio para determinação da curva de retenção de umidade, realizado por Santos (2015)
Umidade volumétrica na saturação (θ_{sat})	RCC: valor obtido no ensaio para determinação da curva de retenção de umidade, encontrado na literatura (JIMÉNEZ, 2016) Solo: valor obtido no ensaio para determinação da curva de retenção de umidade, realizado por Santos (2015)
Umidade volumétrica residual (θ_r)	RCC: valor obtido no ensaio para determinação da curva de retenção de umidade, encontrado na literatura (JIMÉNEZ, 2016) Solo: valor obtido no ensaio para determinação da curva de retenção de umidade, realizado por Santos (2015)

Quadro 21 – Modo de obtenção dos parâmetros utilizados no modelo de infiltração de Philip (1957).

Parâmetros	Obtenção
Coeficiente de permeabilidade saturada (k_1)	RCC: valor obtido em Damasceno (2013) Solo: valor obtido em Santos (2015)
Umidade inicial de campo (θ_0)	RCC: adotada inicialmente igual à umidade ótima, obtida no ensaio de compactação proctor normal realizado por Ribeiro (2014) Solo: adotada inicialmente igual à umidade ótima, obtida no ensaio de compactação proctor normal realizado neste trabalho
Sucção na frente de umedecimento (h_f)	Valor inicial corresponde ao θ_0 na curva de retenção de umidade. Após o segundo dia varia com a equação de Van Genuchten (1980)
Umidade atrás da frente de umedecimento (θ_1)	Umidade na camada de cobertura, considerada constante e igual a 90% da umidade de saturação

Como os resultados da simulação, comparou-se o comportamento do solo e do RCC e, verificou-se a possibilidade de emprego do RCC como camada de cobertura evapotranspirativa.

O modelo de São Mateus et al. (2012) utiliza dados que podem ser determinados experimentalmente em laboratório, o que possibilita uma maior proximidade com a situação real. Em contrapartida, o modelo de Fenn et al. (1975) propõe valores tabelados, que são estimados a partir de características do solo e da topografia do terreno.

5.1. RCC: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

O ensaio de solubilização foi realizado de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004). Para tanto, o RCC foi submetido ao peneiramento para obter a granulometria indicada pela norma (material passante na peneira de abertura 9,5mm), em quantidade correspondente a 1 kg. O material foi levado para secagem, em estufa com circulação forçada de ar, a 40°C, em média, por dois dias.

O material foi separado em três recipientes (béqueres de 1500 mL), contendo cada um 250 g de RCC, em massa seca. A cada um dos recipientes, foi adicionado 1000 mL de água destilada (Figura 17a). As amostras foram levadas ao Laboratório de Saneamento (DTEC-UEFS), para serem agitadas no agitador magnético, por cinco minutos em velocidade baixa, conforme a Figura 17b. Logo após, os béqueres foram cobertos com plástico filme, para evitar perdas de água por evaporação e deixados em repouso por sete dias.

Figura 17 – (a) Separação de amostras para ensaio de solubilização; (b) Amostras em agitação magnética.



(a)



(b)

Foram filtradas 3 amostras de 100 mL (Figura 18), separando-se alíquotas de 25 mL e adicionando-lhe 1 mL de HNO_3 (1+1) e 1 mL de HCl (diluído), para verificar se haveria precipitação. Como não ocorreu, foi dado seguimento à acidificação das amostras de 50 mL.

Figura 18 – Filtração das amostras



Em cada amostra foram feitas leituras para Manganês, Chumbo, Zinco, Cobre, Níquel, Cádmio e Ferro, no espectrofotômetro de absorção atômica (Figura 19).

Figura 19 – Leituras das amostras



5.2. SOLO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UEFS EM FEIRA DE SANTANA/BA: ENSAIOS COMPLEMENTARES DE LABORATÓRIO

O solo utilizado nesta pesquisa é uma areia argilosa, obtida de uma cava realizada na área ao fundo do Labotec I/DTEC-UEFS, a uma profundidade de 1,65 m a 1,85 m, tendo como referência o nível do terreno. Após a extração do material, este foi espalhado sobre uma lona ao ar livre para secagem prévia.

O material foi homogeneizado, destorroado e passado na peneira de abertura 4,76 mm, tendo menos de 0,5% retido na mesma.

A caracterização deste material já foi realizada por Santos (2015) e, nesta pesquisa, foram repetidos os ensaios de compactação e acrescentados os de capacidade de campo e evaporação.

5.2.1. Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação é realizado para obter as condições de umidade ótima e massa específica seca máxima, para a compactação da camada de cobertura do aterro de modo a melhorar a sua resistência e reduzir sua permeabilidade. A energia Proctor Normal foi utilizada nesta pesquisa, por ser a menor energia de compactação, uma vez que nos aterros sanitários brasileiros, em sua maioria, não se faz o controle de compactação.

Antes da realização da compactação foi verificado o teor de umidade do solo, constatando-se um valor correspondente a 5,3%, para estimar a quantidade de água a ser adicionada ao mesmo.

Em seguida, foi realizada a compactação do solo, seguindo a metodologia da NBR 7182 (ABNT, 1986). Utilizou-se o cilindro pequeno e o soquete de 2,5kg, já que o material passou praticamente de forma integral na peneira 4,76 mm, ficando retida uma porção inferior a 7% (NBR 6457/1986). Suas características físicas, bem como as informações utilizadas no ensaio (nº de golpes, nº de camadas e energia de compactação), estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados do ensaio de compactação Proctor Normal.

Soquete Pequeno		Cilindro Pequeno				Energia de compactação (kgf/cm ²)
Altura de queda (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Nº de golpes	Nº de camadas	
30,5	2,5	937	1,884	26	3	6

Como o ensaio de compactação foi realizado sem reuso de material, a amostra total foi de 15 kg, divididos em cinco pontos de 3 kg. Cada ponto corresponde a um corpo de prova (CP), moldados com um teor de umidade crescente em intervalos iguais a 2%.

Após as compactações, os corpos de prova foram pesados e, de cada um foram retiradas 3 cápsulas de solo para determinar o teor de umidade, pela secagem em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C.

Com os resultados dos teores de umidade de cada ponto (CP), foram obtidos os seus respectivos pesos específicos secos, possibilitando o traçado da curva de compactação. Os valores de pico da curva correspondem aos parâmetros de peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótima ($\omega_{ót}$).

5.2.2. Ensaio para Determinação da Capacidade de Campo

O ensaio para determinação da capacidade de campo complementa as características hidráulicas do solo. Ainda não se encontra disponível uma norma da ABNT sobre procedimentos para determinação desse parâmetro e, por este motivo, foi adotada a metodologia descrita por Lins (2003), em sua pesquisa.

Para a realização do ensaio, foram compactados três corpos de prova com energia Proctor Normal em cilindros grandes, com umidades próximas à ótima (desvio máximo de $\pm 2\%$), com o auxílio de um soquete grande, cuja massa e altura de queda são, respectivamente, 4,536 g e 45,7 cm. Para a compactação dos CPs cada cilindro recebeu 7 kg divididos em 6 camadas. O número de golpes a serem aplicados por camada foi calculado segundo a equação 14.

$$E = \frac{N_g \cdot N_c \cdot H \cdot M}{V} \quad (14)$$

Onde:

E – energia de compactação (kgf/cm²); N_g – nº de golpes de cada camada; N_c – nº de camadas; H – altura de queda do soquete (cm); M – massa do soquete (kg); V – volume útil do cilindro (cm³).

Para a compactação do material nos cilindros, os equipamentos foram previamente pesados, e seus demais parâmetros físicos e dados necessários à este procedimentos, estão encontram-se nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Características físicas dos equipamentos utilizados.

	N° 09	N° 05	N° 13
Massa do conjunto (g)	7317,5	7383,5	7505,5
Diâmetro (cm)	15,3	15,3	15,3
Altura (cm)	17,8	17,8	17,8
Volume (cm ³)	3272,60	3272,60	3272,60

Tabela 9 – Dados para a compactação do CP no ensaio de capacidade de campo.

E (kgf/cm ²)	Nc	H (cm)	P (kg)	V (cm ³)	Ng
6	6	45,7	4,536	3272,6	16

Cada cilindro recebeu, em sua base, um disco de tecido drenante do tipo morim. Depois de realizada a compactação, os cilindros com os CPs foram devidamente pesados e submetidos à saturação no tanque de imersão, usado para ensaios de CBR.

No interior do tanque, os cilindros com as bases perfuradas foram colocados sobre os trilhos existentes. Em seguida, o tanque foi preenchido com água até cerca de um centímetro abaixo do topo do cilindro, para a saturação do corpo de prova pela base, por meio do princípio hidrostático de vasos comunicantes, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Corpos de prova em saturação no tanque.

Os corpos de prova permaneceram por 96 dias no tanque de imersão. Considerou-se como saturada a amostra, quando a sua superfície mostrou um brilho característico de presença de água no material, de acordo com a metodologia adotada por Lins (2004).

Durante todo o ensaio, os topos dos cilindros foram protegidos com um plástico filme a fim de garantir que não sofressem perda de água por evaporação.

Após atingir a saturação os CPs foram pesados e colocados na em uma bancada no laboratório, para a água retida no solo drenar livremente pela base, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Corpos de prova em fase de drenagem no laboratório de solos.



Os CPs foram pesados diariamente, para monitorar a drenagem da água pela base, durante 57 dias, quando a diferença de massa do CP entre duas leituras foi da ordem de 1g. Este período foi superior ao considerado suficiente por Lins (2003) para que não haja mais água na superfície do CP, e seja finalizada a drenagem, que seria de quatro dias para solos arenosos. No entanto, este tempo foi prolongado a fim de avaliar o comportamento da taxa de drenagem, seguindo a equação 15.

$$i = \frac{M_{H_2O}}{n} \quad (15)$$

Onde:

i – taxa de drenagem (g/dia); M_{H_2O} – massa de água drenada (g); n – n° de dias.

Após este período, os corpos de prova foram desmoldados, e de cada CP foram retiradas amostras do topo, meio e base para a determinação do teor de umidade do material. Para cada posição, foram coletadas três amostras. A umidade na capacidade de campo corresponde à umidade da camada intermediária.

Em uma planilha do Excel, os dados coletados no ensaio foram tabulados de modo a obter a quantidade de água drenada, a variação do teor de umidade e do grau de saturação após cada pesagem.

5.2.3. Ensaio de Evaporação

O ensaio complementar para a determinação da taxa de evaporação, assim como o de capacidade de campo, não está normatizado pela ABNT. Portanto, para realizá-lo foram seguidos os procedimentos descritos na pesquisa de Ubaldo (2005).

A moldagem do CP para o ensaio de evaporação seguiu o mesmo procedimento utilizado para o ensaio de permeabilidade. Consistiu da compactação do material em um permeâmetro, com umidade próxima à ótima (desvio máximo de $\pm 2\%$), utilizando-se energia Proctor Normal, de modo a obter uma folga de altura 4 cm, aproximadamente, na superfície do cilindro. Esta folga foi preenchida por uma camada de pedrisco, atuando como uma camada drenante durante o processo de saturação.

O permeâmetro utilizado para compactar a amostra é composto, basicamente, por uma base, cilindro, mangueira (para uma melhor fixação do cilindro), geotêxtil e tecido morim, que foram pesados em conjunto e seus parâmetros físicos constam na Tabela 10.

Tabela 10 – Características físicas do permeâmetro utilizado no ensaio de evaporação.

Parâmetros	Permeâmetro
Massa (g)	9428,5
Diâmetro (cm)	15,3
Altura (cm)	17,8
Volume (cm ³)	3272,60
Altura - camada de pedrisco (cm)	4,0
Volume - camada de pedrisco (cm ³)	735,4
Volume útil - CP (cm ³)	2537,2

O corpo de prova recebeu uma massa total de 7 kg divididos em 5 camadas, a um número de golpes por camada calculado segundo a equação 14, apresentada no item 5.2.2. Foi utilizado o soquete grande, cujas informações de peso (P) e altura de queda (H), além de outros dados imprescindíveis à realização do ensaio, constam na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados para o cálculo do nº de golpes aplicados em cada camada – ensaio de evaporação.

E (kgf/cm ²)	Nc	H (cm)	P (kg)	V (cm ³)	Ng
6	5	45,7	4,536	2537,2	15

Após a compactação do CP, o permeâmetro foi devidamente fechado e vedado com silicone em sua parte inferior (cilindro - base) e superior (cilindro - tampa), e após sete dias foi colocado para saturar (devido ao tempo de secagem do silicone) conforme Figura 22, sendo que a saturação só foi obtida após 56 dias.

Figura 22 – Corpo de prova de evaporação saturando.

Após a saturação, a tampa do permeâmetro e a camada drenante foram removidas, e o conjunto foi devidamente pesado. O ensaio de evaporação foi realizado no laboratório de solos, deixando-se evaporar pelo topo a água contida no CP. Foram monitoradas diariamente, além de sua massa, a umidade relativa do ar que variou de 54% a 86% e a temperatura do ar, medida entre 26,5°C e 30°C, através de um termo-higrômetro analógico presente na câmara.

Utilizou-se, ainda, um béquer de 2L para representar a evaporação em um Tanque Classe A e, correlacionar as perdas de massa da água do solo com as perdas de massa da água (Figura 23), de modo a obter suas taxas de evaporação diárias, seguindo a equação (16).

$$i_{ev} = \left(\frac{M_{H_2O\ CP}}{M_{H_2O\ béquer}} \right) \cdot \frac{1}{n} \quad (16)$$

Onde:

i_{ev} – taxa de evaporação (adim.); $M_{H_2O\ CP}$ – massa de água evaporada do solo (g); $M_{H_2O\ béquer}$ – massa de água evaporada no béquer (g); n – nº de dias.

Figura 23 – Experimento de evaporação no solo e na água.



O tempo de duração do ensaio de evaporação foi de 97 dias.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. RCC: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

Devido ao baixo limite de detecção do equipamento utilizado (absorção atômica), não foram detectadas concentrações para a maioria dos elementos, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – Concentração de metais no RCC – Ensaio de solubilização.

Amostra	pH	Volume (mL)	Concentração lida no aparelho						
			Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Fe (mg/L)
1	7,9	50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,20
2	8	50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,16
3	8,2	50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,24

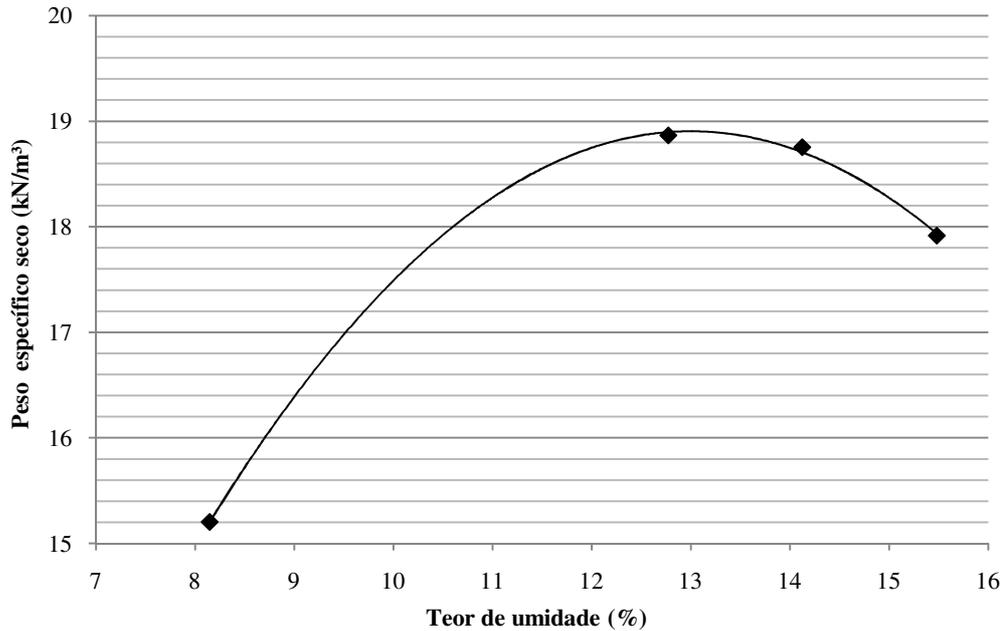
ND - Não detectável

De acordo com a Tabela 12 foi detectado apenas o Ferro, em uma concentração média de 0,20 mg/L, que não ultrapassou o limite estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004), de 0,30 mg/L.

6.2. SOLO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UEFS EM FEIRA DE SANTANA/BA: ENSAIOS COMPLEMENTARES DE LABORATÓRIO

6.2.1. Resultados do Ensaio de Compactação

A Figura 24 apresenta a curva de compactação traçada com os valores obtidos neste ensaio para peso específico seco e teor de umidade.

Figura 24 – Curva de compactação para o solo do campus universitário da UEFS

Os parâmetros avaliados (peso específico seco máximo e umidade ótima) estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de compactação para o solo do campus universitário da UEFS

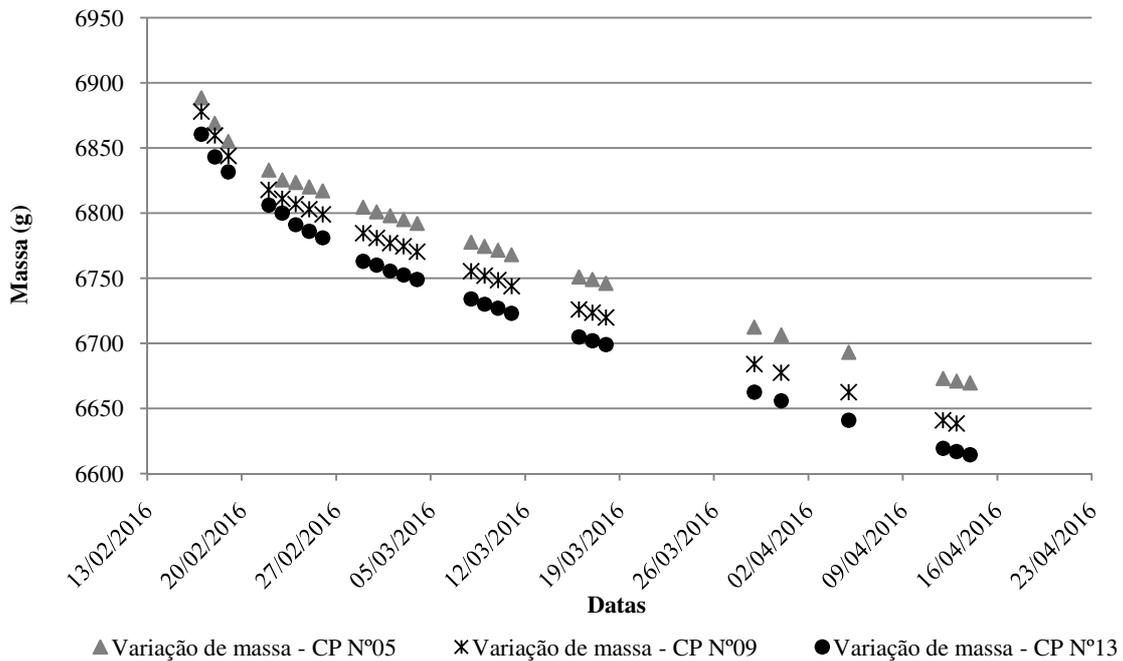
Ensaio	Parâmetros	Resultados
Compactação Proctor Normal	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	19,10
	$w_{\acute{o}t}$ (%)	13,3

$\gamma_{dm\acute{a}x}$: peso específico seco máximo; $w_{\acute{o}t}$: umidade ótima.

Os resultados obtidos com este ensaio variaram pouco se comparados aos encontrados por Santos (2015), para o mesmo solo, que foram de 19,6 kN/m³ e 12,1%, para peso específico seco máximo e umidade ótima, respectivamente.

6.2.2. Resultados para o ensaio de Capacidade de Campo

A Figura 25 apresenta as curvas de variação de massa em função do tempo. Observa-se que a curva tem dois comportamentos, um primeiro que possui duração de 6 dias (17/02/16 - 23/02/16), no qual a curva tem uma inclinação bem acentuada, indicando uma perda de massa considerável, e um segundo com duração de 50 dias (24/02/16 - 14/04/16) com variação de massa menor em que se tem uma inclinação mais suave.

Figura 25 – Ensaio de capacidade de campo com o solo: Variação de massa em função do tempo

Para cada dia foi calculada uma taxa de drenagem, seguindo a equação 15. Para os dois períodos citados, têm-se uma taxa de drenagem média, que consta na Tabela 14.

Tabela 14 – Taxas de drenagem média do ensaio de capacidade de campo.

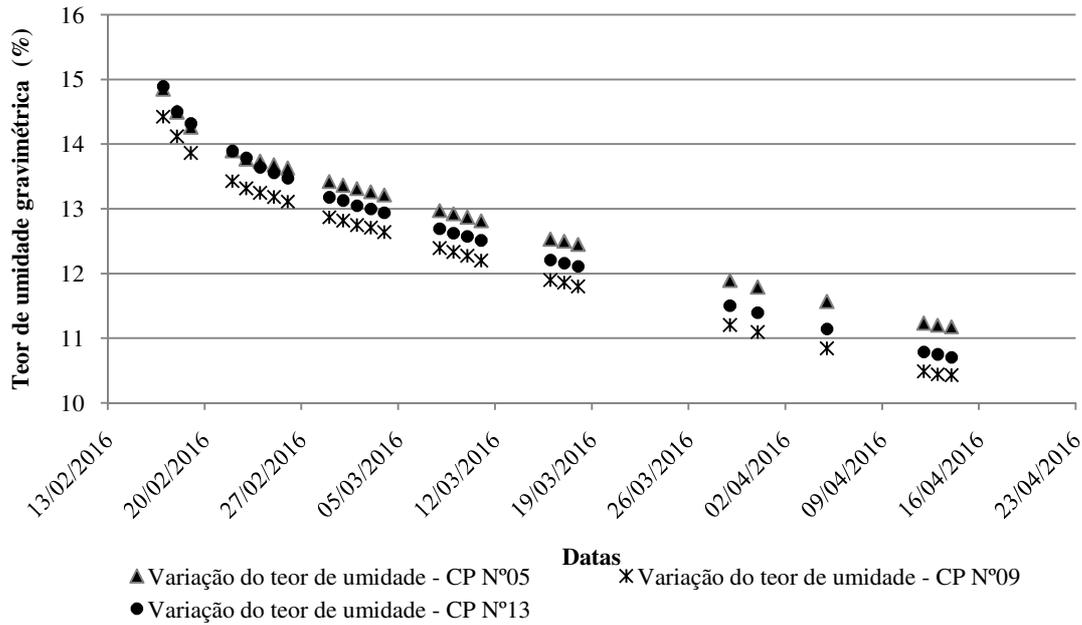
Período	Taxa de drenagem - i (g/dia)			
	N° 09	N° 05	N° 13	Média
17/02/16 a 23/02/16	12,42	12,08	10,88	11,79
24/02/16 a 14/04/16	3,42	2,94	3,86	3,41

Os teores de umidade correspondentes às fases após a compactação do CP de solo (moldagem do CP), após a saturação (início do ensaio) e na finalização do ensaio, constam na Tabela 15. Além disto, na Figura 26 apresenta-se a variação do teor de umidade do CP, no período do ensaio.

Tabela 15 – Teor de umidade gravimétrica de cada etapa do ensaio de capacidade de campo.

		N° 09	N° 05	N° 13
Teor de umidade (%)	Moldagem do CP	12,64	13,40	13,28
	Início do ensaio	14,43	14,85	14,90
	Fim do ensaio	10,43	11,18	10,71

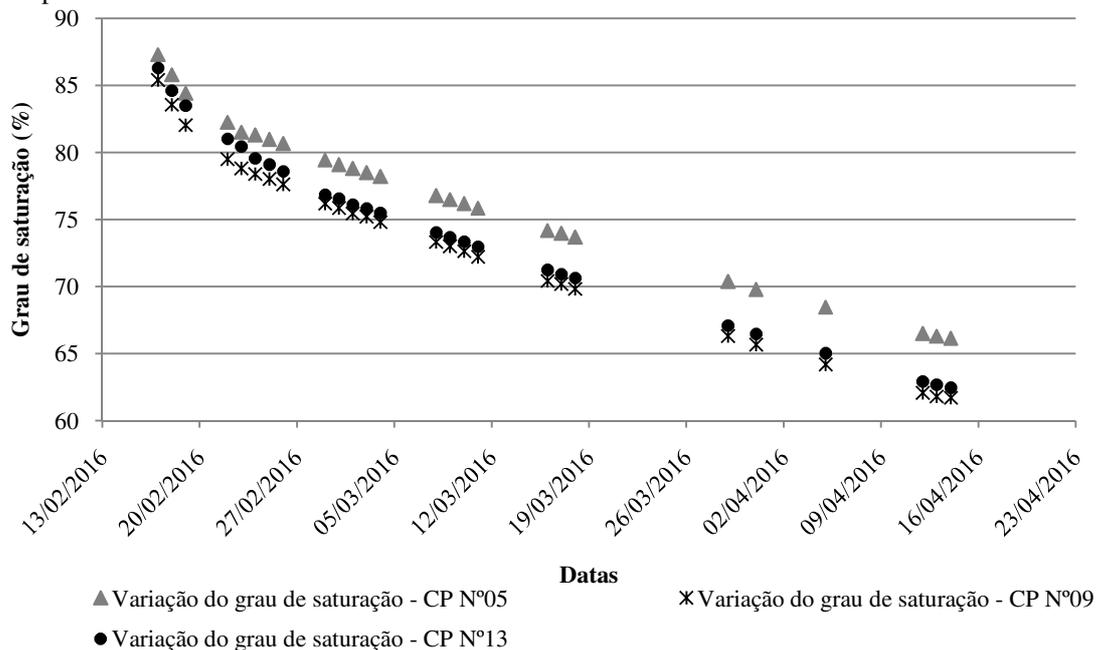
Figura 26 - Ensaio de capacidade de campo do solo: Variação do teor de umidade dos CPs em função do tempo



Os CPs apresentaram teores médios de umidade de 13,1%, logo após a compactação dos mesmos. Posteriormente a saturação dos CPs, este parâmetro passou a apresentar um valor médio de 14,7% e após a drenagem seu valor médio calculado foi de 10,8%, conforme pode ser observado na Figura 26.

Na Figura 27, consta o gráfico com a variação do grau de saturação, durante todo o período de ensaio.

Figura 27 - Ensaio de capacidade de campo do solo: Variação do grau de saturação dos CPs em função do tempo



Com relação ao grau de saturação, tem-se um valor médio, para os CPs, de 76,85%, logo após a compactação dos mesmos. Posteriormente a saturação dos CPs, este parâmetro passou a apresentar um valor médio de 86,34% e após a drenagem seu valor calculado foi de 63,44%, conforme pode ser observado na Figura 27.

Todos os gráficos apresentados possuem comportamentos idênticos, onde até o sexto dia de ensaio há uma perda acentuada de umidade. Em contrapartida, a taxa de drenagem é 71% menor para o segundo trecho da curva. Portanto, obteve-se a umidade na capacidade de campo ao fim do primeiro trecho da curva, onde a taxa de drenagem foi maior. Sendo assim, a umidade volumétrica na capacidade de campo, para a areia fina argilosa estudada, foi de 24,95%.

Na literatura, autores como Andrade e Stone (2011), da área de Agronomia, obtiveram resultados parecidos com o encontrado nesta pesquisa, para solos arenosos, sendo de 23,8% a umidade volumétrica na capacidade de campo.

Para efeito comparativo, este parâmetro foi estimado a partir da curva de retenção de umidade para este solo, determinada por Santos (2015). Seguindo as metodologias de pesquisadores da área de Agronomia, adotou-se os valores para a tensão de sucção de 10 kPa e 33 kPa, obtendo os valores constantes na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores obtidos para a umidade volumétrica na capacidade de campo pela curva de retenção de umidade para o solo de Feira de Santana/BA.

Tensão de sucção (kPa)	θ_{cc} (v/v) (%)	θ_{cc} obtido no ensaio (v/v) (%)
10	42,65	24,95
33	29,00	

A partir da Tabela 16, nota-se uma proximidade do valor obtido para a umidade volumétrica na capacidade de campo correspondente a tensão de sucção de 33 kPa, em relação ao valor obtido em laboratório nesta pesquisa.

A Tabela 17 reúne os dados de umidade gravimétrica e volumétrica determinados nos ensaios.

Tabela 17 – Teores de umidade gravimétrica e volumétrica para os ensaios de CRU, permeabilidade e capacidade de campo

	Umidade	Ensaio da CRU	Ensaio de permeabilidade	Ensaio da CRU	Ensaio de capacidade de campo
		Saturada		Capacidade de campo	
SOLO	Gravimétrica - ω (%)	36,60 ¹	17,65 ¹	15,18 ¹	13,05
	Volumétrica - θ (%)	70,00 ¹	33,71 ¹	29,00 ¹	24,95
RCC	Gravimétrica - ω (%)	22,98 ²	13,12 ³	12,39 ²	13,23 ⁴
	Volumétrica - θ (%)	41,93 ²	23,94 ³	22,62 ²	24,14 ⁴

CRU: curva de retenção de umidade.

¹ SANTOS (2015); ² Valores ajustados a partir da curva de retenção de umidade de JIMÉNEZ (2016);

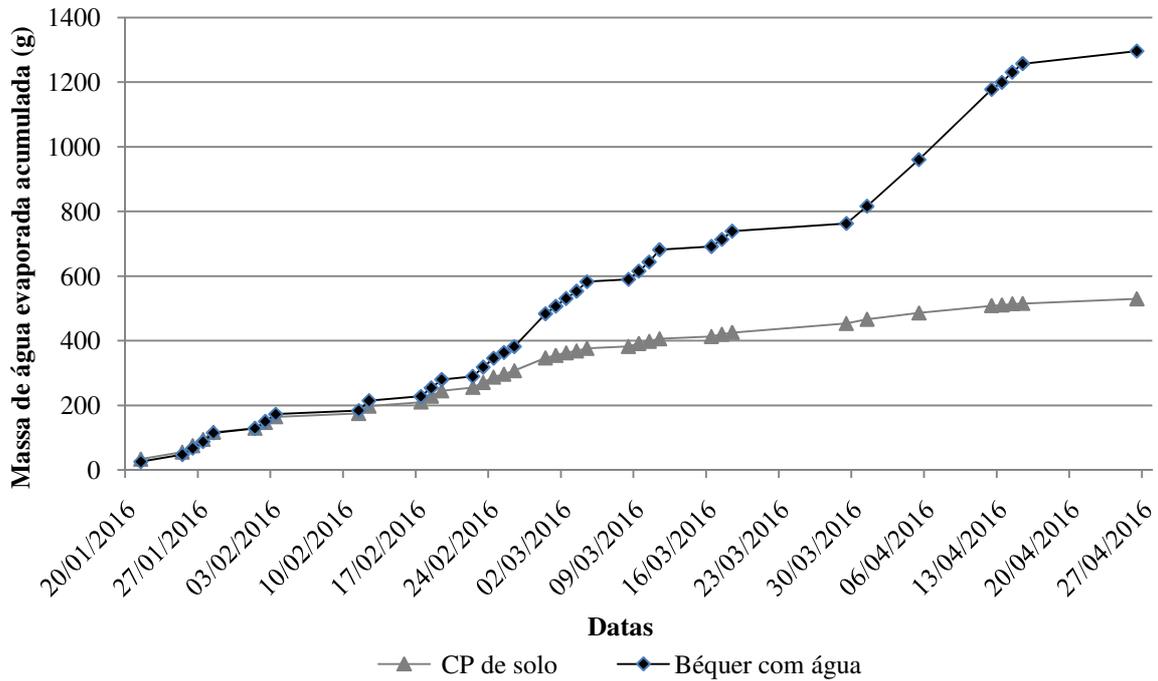
³ DAMASCENO (2013); ⁴ RIBEIRO (2014).

Observa-se que há discrepâncias nos resultados obtidos para um mesmo parâmetro, para o RCC e o solo, em ensaios diferentes. Cita-se a umidade volumétrica na capacidade de campo, que no ensaio da CRU foi 4% maior para o solo e 1,5% menor para o RCC, em relação ao ensaio de capacidade de campo. Além disto, as umidades volumétricas saturadas obtidas para os dois materiais foram maiores nos ensaios de CRU do que no ensaio de permeabilidade, sendo que o valor praticamente dobrou para o RCC e superou o dobro para o solo.

6.2.3. Resultados para o ensaio de Evaporação

A Figura 28 apresenta a massa de água evaporada acumulada do CP de solo e do béquer com água.

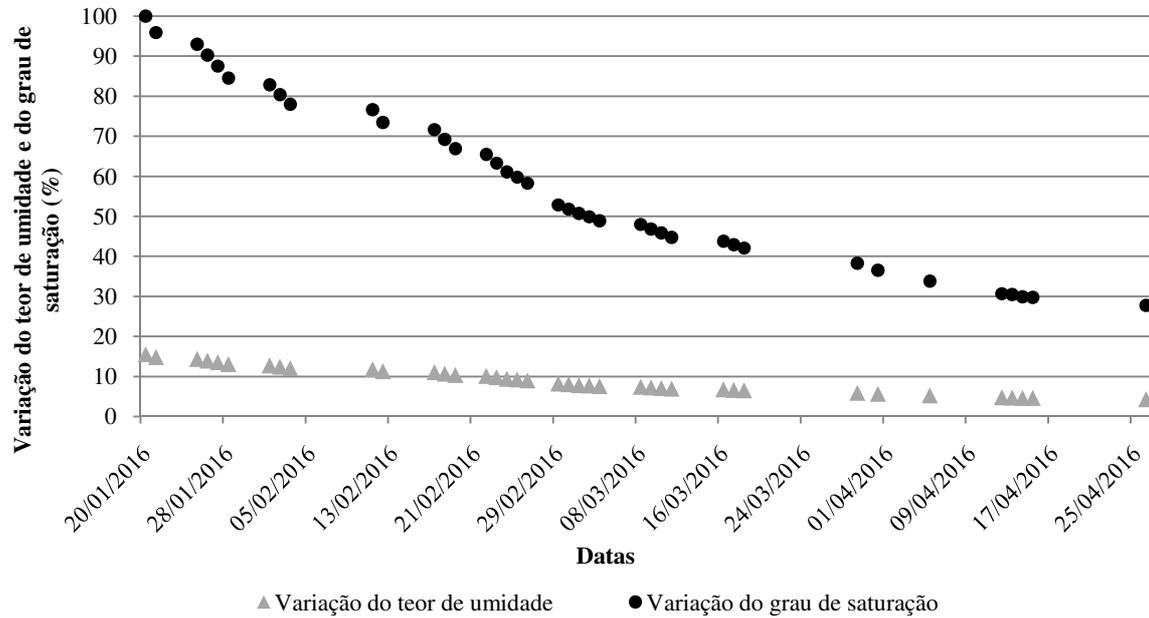
Figura 28 – Ensaio de evaporação: Relação de massa de água evaporada acumulada do CP de solo e do bécquer com água.



Observa-se, através da Figura 28, que o CP de solo perde umidade (evapora) a uma taxa praticamente constante ao longo de todo o ensaio. Na primeira semana de ensaio (até o dia 26/01), o material encontra-se com um teor de umidade elevado, sendo que a perda de água é maior do que a do bécquer com água. A partir deste período, na segunda etapa (a partir de 17/02), à medida que o material fica mais seco, a evaporação no CP de solo torna-se muito mais lenta do que no bécquer com água.

Na Figura 29, apresenta a variação do teor de umidade e do grau de saturação do corpo de prova, durante todo o período do ensaio de evaporação.

Figura 29 – Ensaio de evaporação: Variação do teor de umidade gravimétrica e do grau de saturação do CP de solo em função do tempo



Para efeito comparativo, listaram-se, na Tabela 18, os teores de umidade e os graus de saturação para cada fase do ensaio, após a compactação (CP moldado), após a saturação (início do ensaio de evaporação) e ao final do ensaio.

Tabela 18 – Índices físicos do CP de solo em 3 fases do ensaio de evaporação

	Moldagem do CP	Início do ensaio	Final do ensaio
Umidade gravimétrica (%)	14,35	15,49	3,79
Grau de saturação (%)	93,08	100	27,74

Na Figura 29 e na Tabela 18, observa-se que o CP de solo teve uma perda de 11,7% da umidade, sendo que para o grau de saturação houve uma redução de 72,3%.

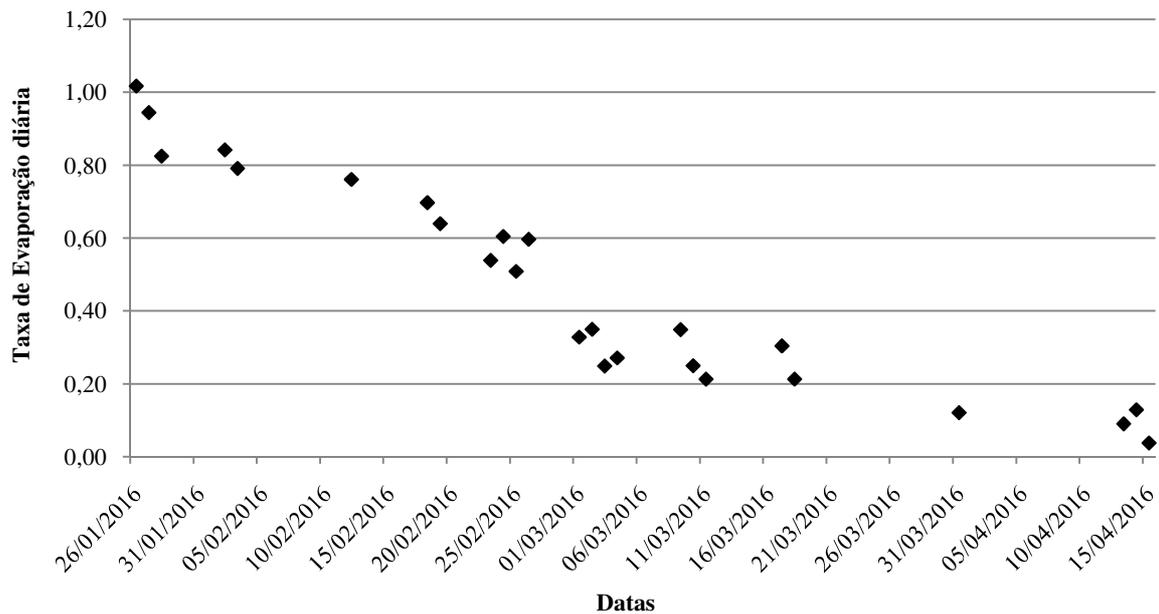
O CP, ao fim do ensaio (Figura 30), apresentava-se enrijecido devido ao baixo teor de umidade do solo (3,79%).

Figura 30 – Extração de amostras do CP do ensaio de evaporação



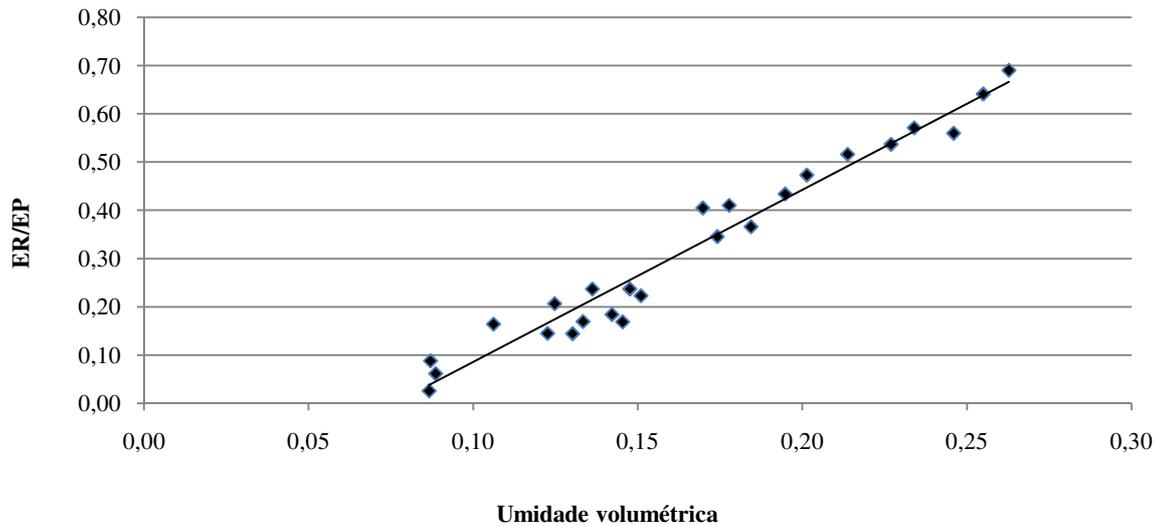
A fim de obter uma taxa de evaporação diária para o solo (de acordo com a equação 12), tabularam-se os dados de modo a traçar a curva da Figura 31.

Figura 31 - Taxa de evaporação diária medida para o CP de solo



Foram obtidos valores para a taxa de evaporação que variam de 1,00 a 0,04 resultando em um valor médio para a taxa de evaporação de 47% para a areia fina argilosa estudada.

Do ensaio de evaporação, estabeleceu-se uma relação entre a evaporação real (ER), a evaporação potencial (EP) e a umidade volumétrica (θ). Com isso, traçou-se o gráfico, que pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 – Relação ER/EP e umidade volumétrica

A equação 17 representa um ajuste linear com $R^2 = 0,961$, no gráfico da Figura 32.

$$ER = EP.(3,56950 - 0,2714) \quad (17)$$

6.3. SIMULAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO

Para os dados de entrada do balanço hídrico na camada de cobertura pelo modelo de São Mateus et al. (2012), foram utilizados os parâmetros obtidos nas curvas de retenção de umidade.

Para o modelo de Fenn et al (1975), utilizou-se os valores da Tabela 19 como parâmetros de entrada, para o balanço hídrico da cobertura com o solo e o RCC.

Tabela 19 - Parâmetros de entrada para o BH da cobertura realizado pelo método de Fenn et al. (1975)

Modo de obtenção	Parâmetros utilizados no balanço hídrico da cobertura		
	SOLO	RCC	
Ensaio de Compactação	Peso específico seco máximo - $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	19,1	18,25 ¹
	Umidade ótima - ω_{ot} (%)	13,3	10,5 ¹
Ensaio de Evaporação	Taxa média de evaporação - ER/EP - (%)	47	56 ¹
Tabela de coeficiente de escoamento superficial	Coeficiente de escoamento (C') - período seco	0,05	0,05
	Coeficiente de escoamento (C') - período úmido	0,10	0,10
-	Espessura da camada - D (cm)	60	60

¹ DAMASCENO (2013).

Para o balanço hídrico da cobertura realizado pelo modelo de São Mateus et al. (2012) foram utilizados como parâmetros de entrada os valores apresentados na Tabela 20.

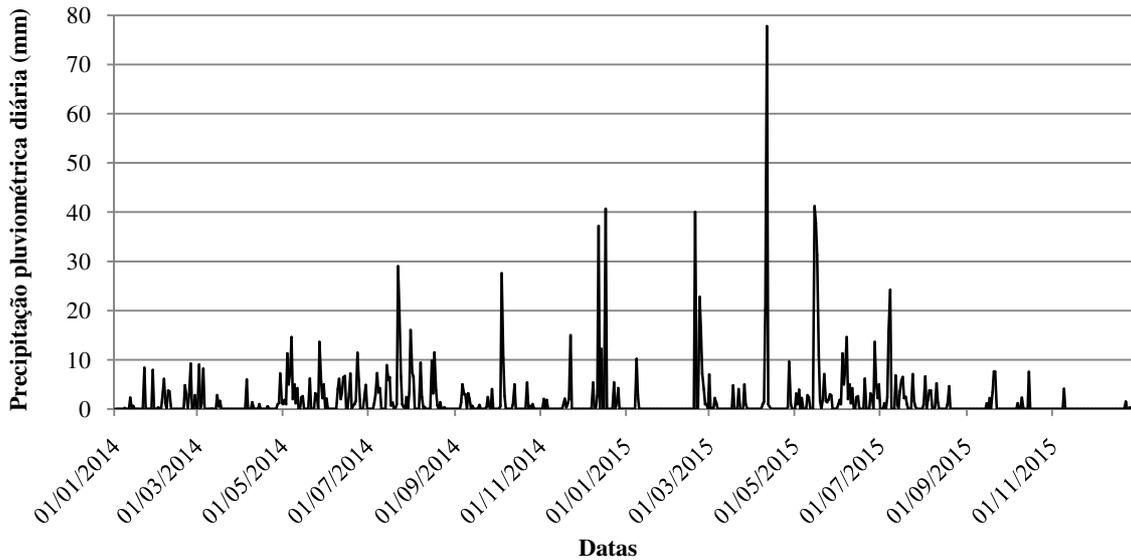
Tabela 20 - Parâmetros de entrada do solo e do RCC, obtidos por ensaios de laboratório, para o BH da cobertura: Modelo de São Mateus et al. (2012)

Ensaio	Parâmetros utilizados no BH da cobertura pelo método de São Mateus et al. (2012)		
		SOLO	RCC
Compactação	Umidade ótima - $\omega_{ót}$ (%)	13,3	10,5 ¹
	Peso específico seco máximo - $\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	19,1	18,25 ¹
Evaporação	Equação da evaporação real (ER) em função da evaporação potencial (EP) e umidade volumétrica (θ)	ER = EP.(3,569 θ - 0,271)	ER = EP.(6,001 θ - 0,119) ²
Permeabilidade a carga constante	Coefficiente de permeabilidade saturada - k_1 (cm/s)	8,00E-07 ³	1,00E-04 ²
Curva de retenção de umidade (ajuste por Van Genuchten, 1980)	Sucção na frente de umedecimento - hf (kPa)	6,82 ³	100 ⁴
	Umidade residual - θ_r (v/v)	0,124 ³	0,1950 ⁴
	Umidade saturada - θ_{sat} (v/v)	0,2773 ³	0,4193 ⁴
	Umidade na capacidade de campo - θ_{cc} (v/v)	0,138 ³	0,2262 ⁴
	Parâmetro de ajuste - m (adimensional)	0,53 ³	0,38 ⁴
	Parâmetro de ajuste - n (adimensional)	3,5 ³	1,6 ⁴
	Parâmetro de ajuste - α (kPa ⁻¹)	0,11 ³	1 ⁴
	Lâmina d'água na superfície do terreno - h1 (cm)	0	0

¹ RIBEIRO (2014); ² DAMASCENO (2013); ³ SANTOS (2015); ⁴ Valores ajustados a partir da curva de retenção de umidade de JIMÉNEZ (2016).

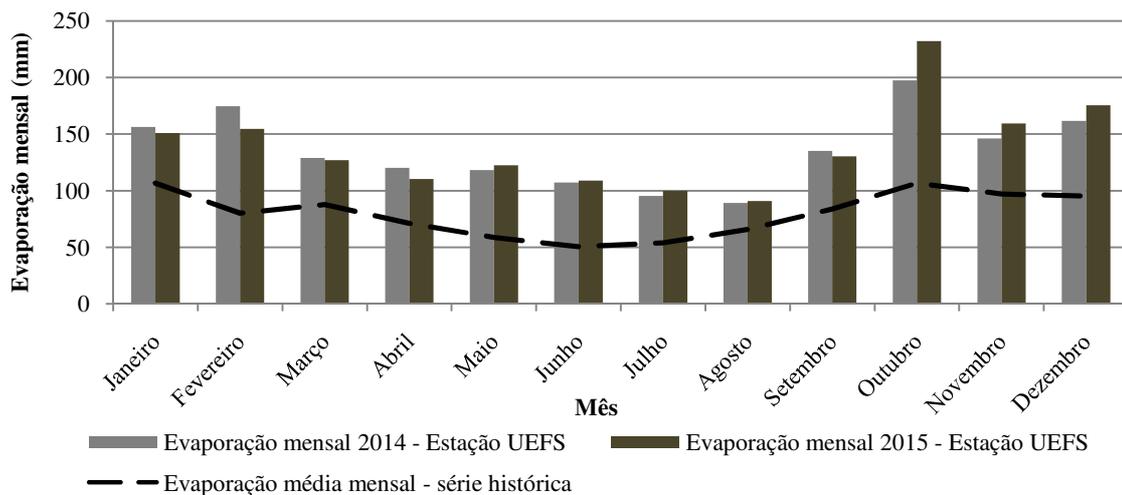
a) Dados climatológicos

Os dados diários de precipitação pluviométrica compreendem o período de janeiro/2014 a dezembro/2015, mostrados na Figura 33.

Figura 33 – Precipitação pluviométrica diária jan/2014 – dez/2015

Na Figura 33, observa-se que a ocorrência de precipitações diárias acima de 40 mm é bastante reduzida, tendo ocorrido em apenas 3 dias do período analisado. Por outro lado, em mais da metade dos meses a precipitação foi menor do que 10 mm.

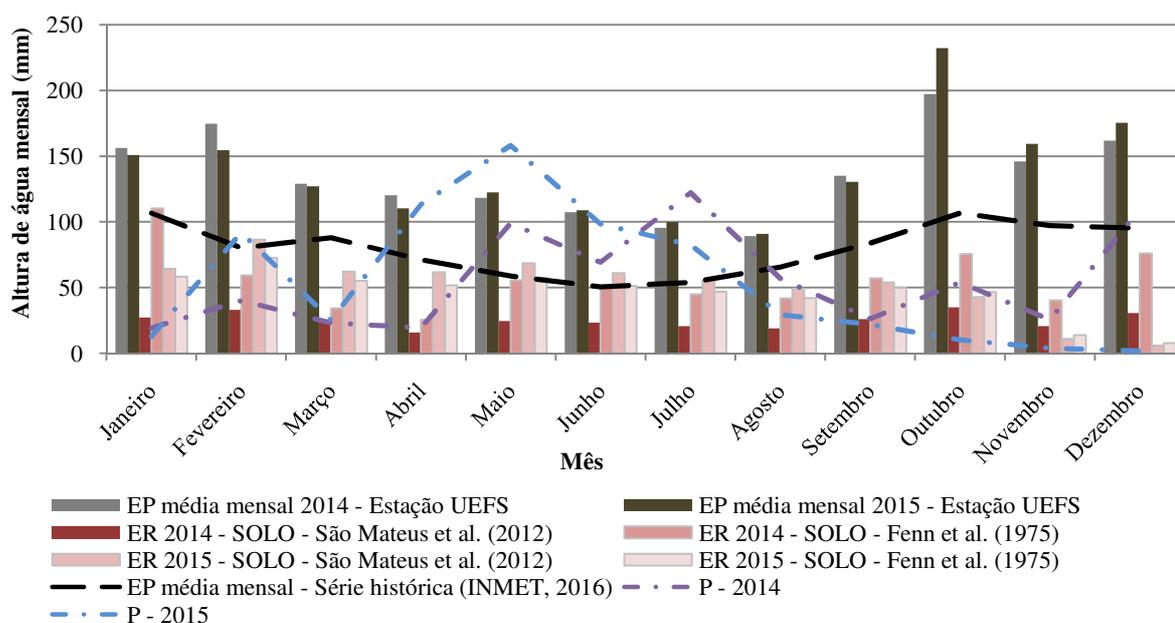
A Figura 34 apresenta os dados de evaporação mensal medida em Tanque Classe A, no período de janeiro/2014 a dezembro/2015, em comparação à série histórica (normais climatológicas 1961-1990) para a cidade de Feira de Santana/BA (INMET, 2016).

Figura 34 - Evaporação potencial mensal jan/2014 – dez/2015

Nota-se, a partir da Figura 34, que a evaporação potencial mensal para ambos os anos analisados foi, durante todo o tempo, acima da evaporação potencial fornecida pela série histórica (INMET, 2016). Isto mostra que o período avaliado foi mais seco do que o comum.

Na Figura 35 foi traçado um gráfico com os dados para a precipitação pluviométrica (P), evaporação potencial (EP) e evaporação real (ER) para os métodos de São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975), para o solo estudado.

Figura 35 – BH na camada de solo: Valores mensais de precipitação pluviométrica, evaporação potencial e real, para o período de jan/2014 – dez/2015.

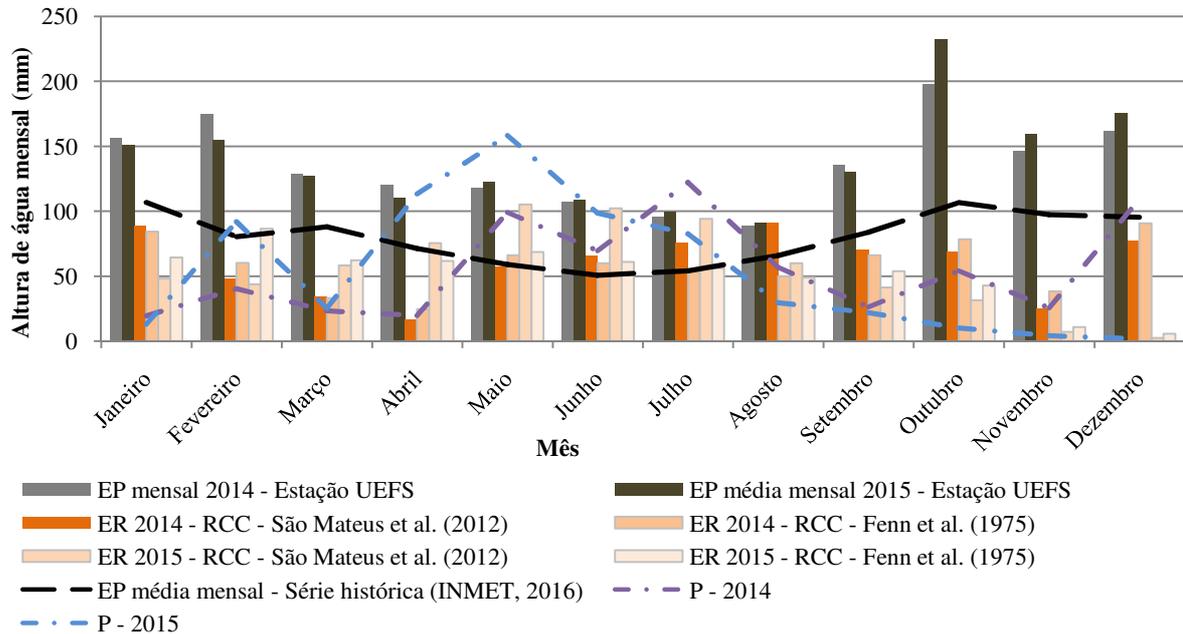


A partir da Figura 35, percebe-se que a evaporação real do solo obtida pelos dois métodos aplicados, apresenta variações, estando estes valores abaixo da série histórica para a maior parte do período avaliado.

Nos meses de maio, junho e julho (período mais chuvoso), para 2014 e 2015, os valores de ER se aproximam dos valores apresentados na série histórica.

A Figura 36 mostra um gráfico com os dados climatológicos (P e EP) e a ER calculada pelos métodos estudados, para o RCC.

Figura 36 – BH na camada de RCC: Valores mensais de precipitação pluviométrica, evaporação potencial e real, para o período de jan/2014 – dez/2015.



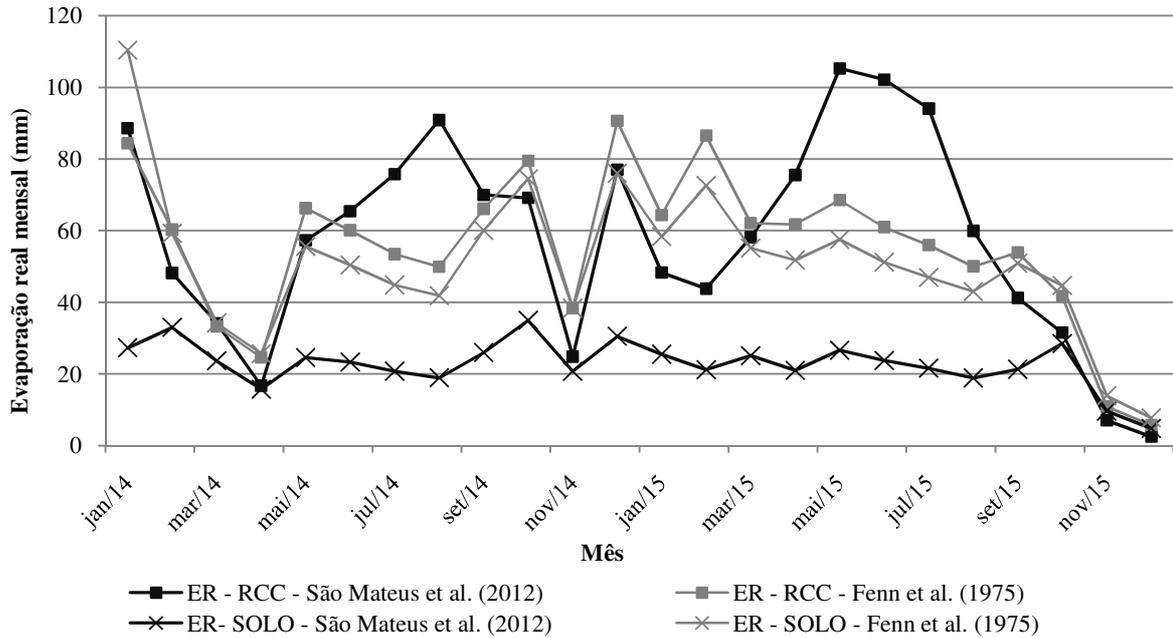
Para o RCC, a ER obtida foi superior à série histórica para os meses de maio, junho e julho. Considerando que o RCC apresenta valores de evaporação maiores que os do solo e, portanto, retém menos quantidade de água, pode sugerir que o RCC funcionaria bem como um material para camada de cobertura evapotranspirativa, comparado ao solo.

Nas Figuras 35 e 36, observa-se que os valores da evaporação real são menores que a evaporação potencial para o solo e para o RCC. Sendo que, no geral, este apresenta valores maiores do que o do solo.

b) Balanço hídrico na camada de cobertura

A Figura 37 mostra os valores mensais de ER obtida para o solo e o RCC por meio dos dois modelos de balanço hídrico, o de Fenn et al. (1975) e o de São Mateus et al. (2012).

Figura 37 – SOLO e RCC: Evaporação real mensal por São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975)

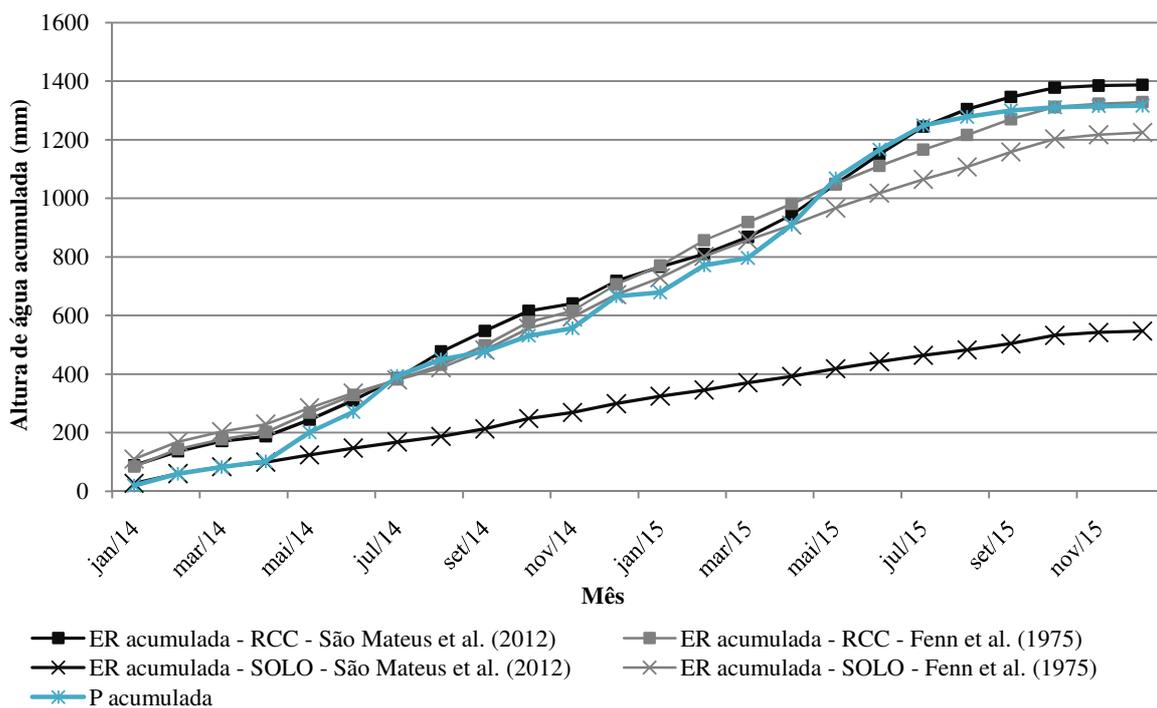


A Figura 37 mostra que não há mudanças consideráveis no comportamento da evaporação real para o método de Fenn et al. (1975) entre os dois materiais, sendo que possuem valores muito próximos, em geral. O solo possui uma evaporação real inicial maior neste método, já que a umidade inicial adotada foi a umidade ótima, que neste material é maior do que no RCC.

Para o método de São Mateus et al. (2012), o RCC e o solo apresentam valores e comportamentos distintos para a evaporação real. O RCC possui uma evaporação maior ao longo de todo o período analisado por se tratar de um material pedregulhoso.

Na Figura 38 pode-se observar a evaporação real mensal acumulada para ambos os materiais estudados, para os modelos de Fenn et al. (1975) e de São Mateus et al. (2012).

Figura 38 – SOLO e RCC: Evaporação real mensal acumulada por São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975)

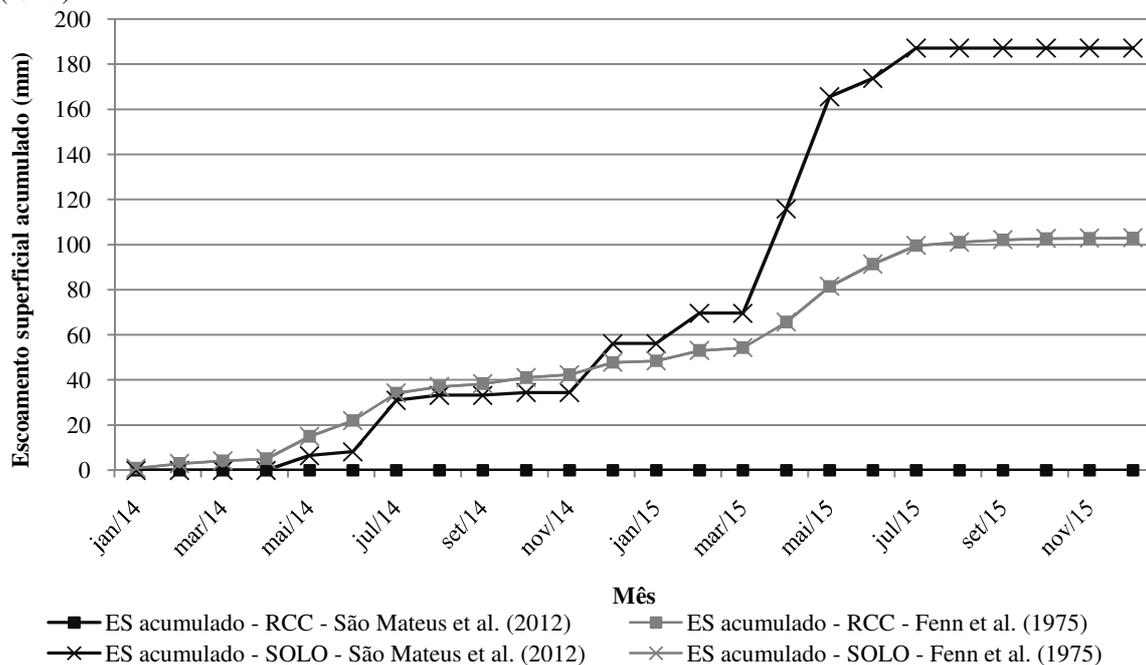


Constata-se, pela Figura 38, que, inicialmente, o solo no método de Fenn et al. (1975) possui valores para a ER acumulada mais elevados do que o mesmo para o RCC. No método de São Mateus et al. (2012), o solo apresentou características distintas do RCC, com valores para a ER acumulada muito inferiores, cerca de 61%.

Em ambos os métodos, o RCC não apresentou diferenças para a evaporação real. Entretanto, para o ano de 2015 (mais chuvoso) o método de São Mateus et al. (2012) mostrou resultados maiores.

Os valores calculados para o escoamento superficial estão na Figura 39.

Figura 39 – SOLO e RCC: Escoamento superficial mensal acumulado por São Mateus et al. (2012) e Fenn et al. (1975)

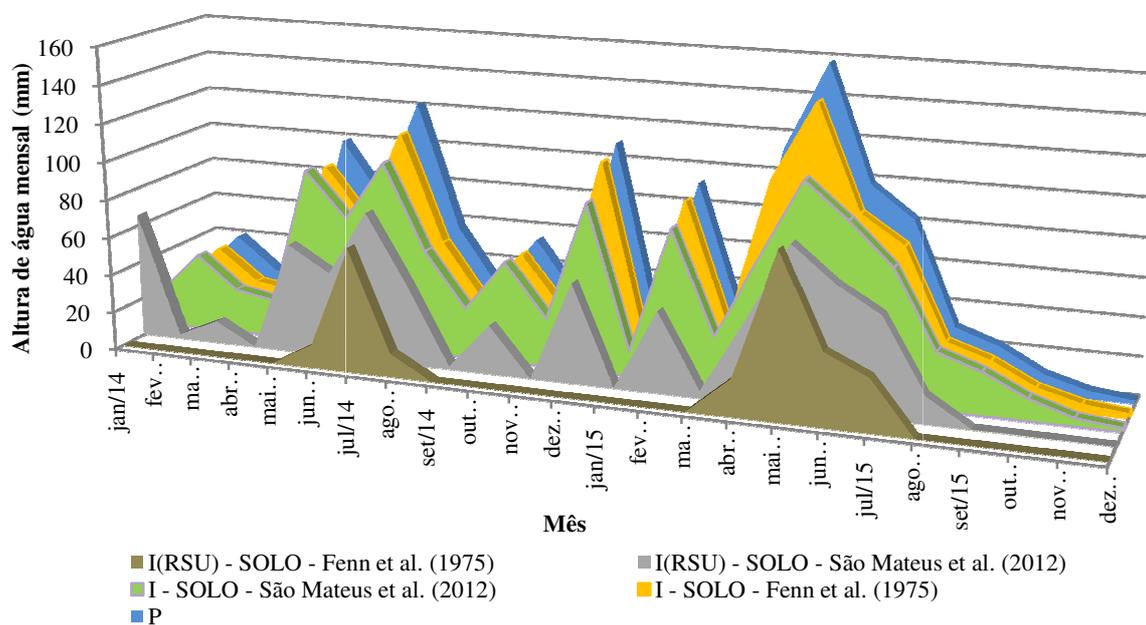


O escoamento superficial obtido no método de São Mateus et al. (2012) foi nulo durante todo o período avaliado, para o RCC. Isto indica que toda a chuva precipitada foi infiltrada na camada de cobertura do aterro, o que não é constatado na prática. Este é um material pedregulhoso, que apresenta um coeficiente de permeabilidade saturada mais alto que o solo, e devido ao método de cálculo da infiltração, esta foi sempre igual à precipitação pluviométrica, resultando em escoamento nulo.

Para o solo, houve escoamento superficial na maior parte do período avaliado, no método de São Mateus et al. (2012), com valores maiores que os obtidos para ambos materiais no método de Fenn et al. (1975), cujos resultados foram idênticos em todos os meses analisados, para o solo e o RCC, devido ao modo de cálculo do parâmetro estabelecido no método.

O balanço hídrico da camada de cobertura para o solo, calculado pelos dois modelos adotados, foi apresentado na Figura 40.

Figura 40 – SOLO: BH na camada de cobertura para os modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012)



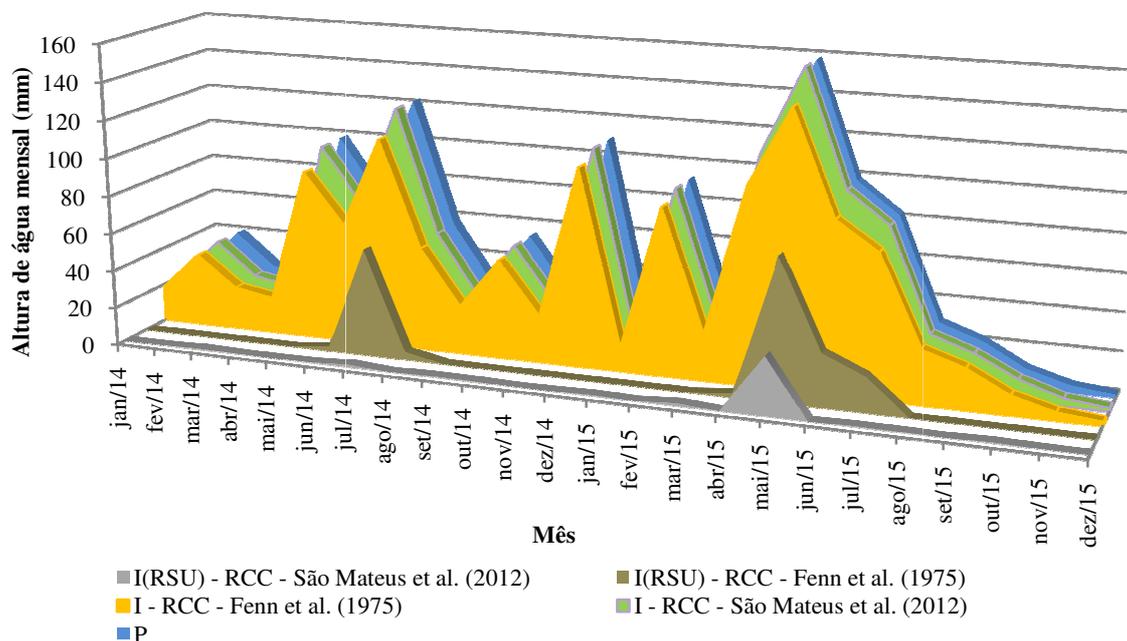
Há uma disparidade na quantidade de água que irá para o RSU, entre os dois modelos, visto que pelo método de Fenn et al. (1975) a passagem de água para o RSU, ocorre somente nos períodos mais chuvosos do anos estudados (junho, julho e agosto – 2014 e abril, maio, junho e julho - 2015), havendo infiltração no RSU apenas quando os picos de chuva são acima de 120mm.

No modelo de São Mateus et al. (2012), praticamente durante todo o período avaliado, a camada de cobertura permite a passagem de água para o RSU, contudo em quantidades menores que 20 mm em 12 dos 24 meses analisados. Destes 12 meses, 7 possuíram infiltrações de água para o RSU abaixo de 0,5 mm, ou seja, praticamente nulas. Os maiores picos de infiltração de água para o RSU ocorreram nos meses de maior precipitação, julho/2014 (78,15 mm) e maio/2015 (82,25 mm).

Para o solo, o método de Fenn et al. (1975) promove infiltração para o RSU muito inferior em relação ao modelo de São Mateus et al. (2012).

Para a Figura 41, tem-se os parâmetros do balanço hídrico da camada de cobertura para o RCC, calculado pelos dois modelos adotados.

Figura 41 - RCC: BH na camada de cobertura para os modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012)



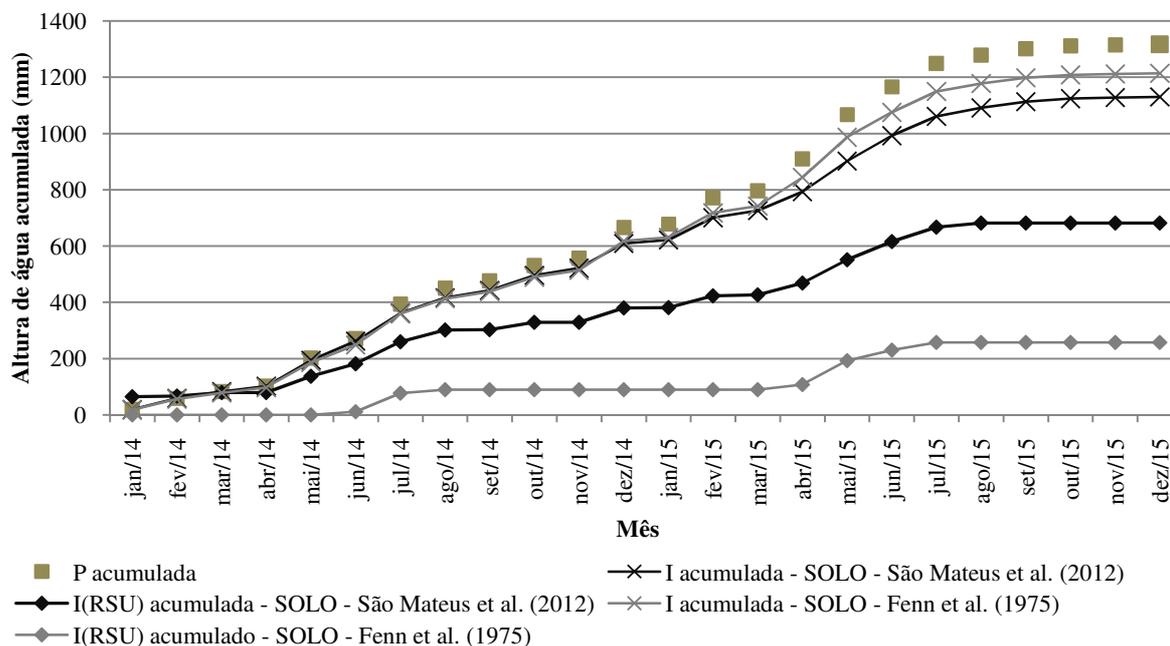
A partir da Figura 41, pelo método de São Mateus et al. (2012), percebe-se que o RCC comporta-se diferente do solo, infiltrando toda a precipitação pluviométrica. A geração de líquidos para o RSU (em quantidades menores que 2 mm) se dá em, praticamente, todo o período avaliado (23 meses). Durante 10 meses deste período, não houve infiltração de água para o RSU. Apenas um pico de infiltração de água para o RSU foi registrado, e ocorreu no mês de maior precipitação, maio/2015 (30,14 mm).

No modelo de Fenn et al. (1975) há geração nos períodos de maiores picos de chuva (junho, julho e agosto – 2014 e abril, maio, junho e julho - 2015). Observa-se também, que pelo método de Fenn et al. (1975) somente haverá infiltração no RSU quando os picos de chuva são acima de 120 mm.

Para o RCC, o método de Fenn et al. (1975) promove infiltração para o RSU muito superior em relação ao modelo de São Mateus et al. (2012).

Na Figura 42 estão apresentados os parâmetros acumulados do balanço hídrico da camada de cobertura para o solo, calculado pelos dois modelos adotados.

Figura 42 – SOLO: Valores acumulados para precipitação pluviométrica, infiltração no solo e no RSU - Modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012)

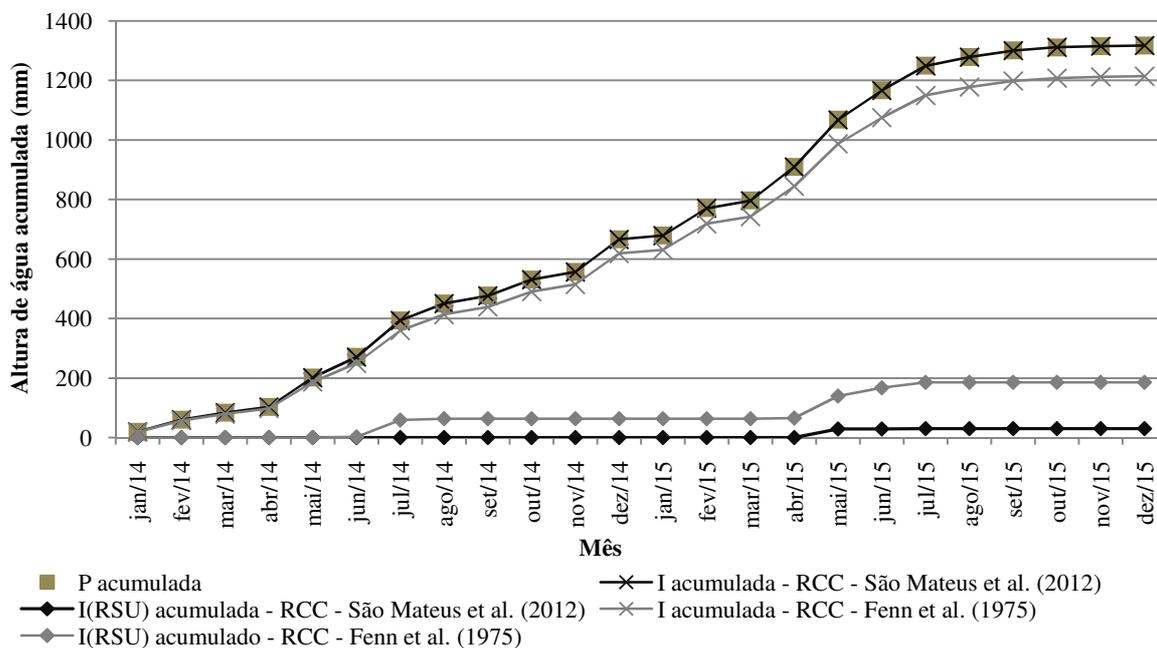


A Figura 42 mostra uma discreta variação entre os métodos para a infiltração acumulada na camada de cobertura em solo. Para ambos os métodos, toda a chuva infiltra na cobertura, inicialmente. Após o mês de julho/2014 o comportamento se modifica, indicando que há escoamento superficial já que a infiltração na camada de cobertura apresenta valores mais baixos do que a precipitação pluviométrica.

Para a infiltração no RSU, o modelo de São Mateus et al. (2012) gera aproximadamente 62% a mais do que Fenn et al. (1975), ao fim do período analisado, para os valores acumulados. O método utilizado para o cálculo da infiltração influenciou diretamente na geração de líquidos para o RSU.

A Figura 43 apresenta os parâmetros acumulados do balanço hídrico da camada de cobertura para o RCC, calculado pelos dois modelos adotados.

Figura 43 – RCC: Valores acumulados para precipitação pluviométrica, infiltração no RCC e no RSU - Modelos de Fenn et al. (1975) e São Mateus et al. (2012)

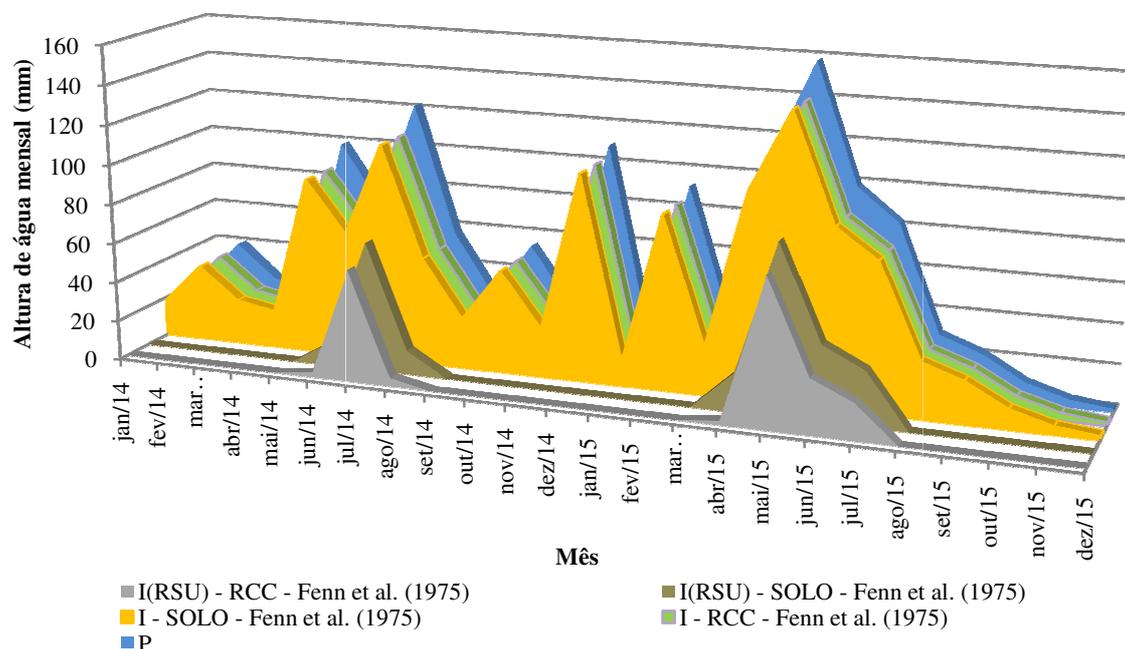


Na Figura 43 mostra uma discreta variação entre os métodos para a infiltração acumulada na camada de cobertura em RCC, da mesma forma que ocorreu para o solo.

Para a infiltração acumulada no RSU, o modelo de São Mateus et al. (2012) gera aproximadamente 84% a mais do que Fenn et al. (1975), ao fim do período analisado, para os valores acumulados.

A Figura 44 mostra os parâmetros para o balanço hídrico da cobertura para os dois materiais estudados, solo e RCC, calculados pelo método de Fenn et al. (1975).

Figura 44 - SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de Fenn et al. (1975)

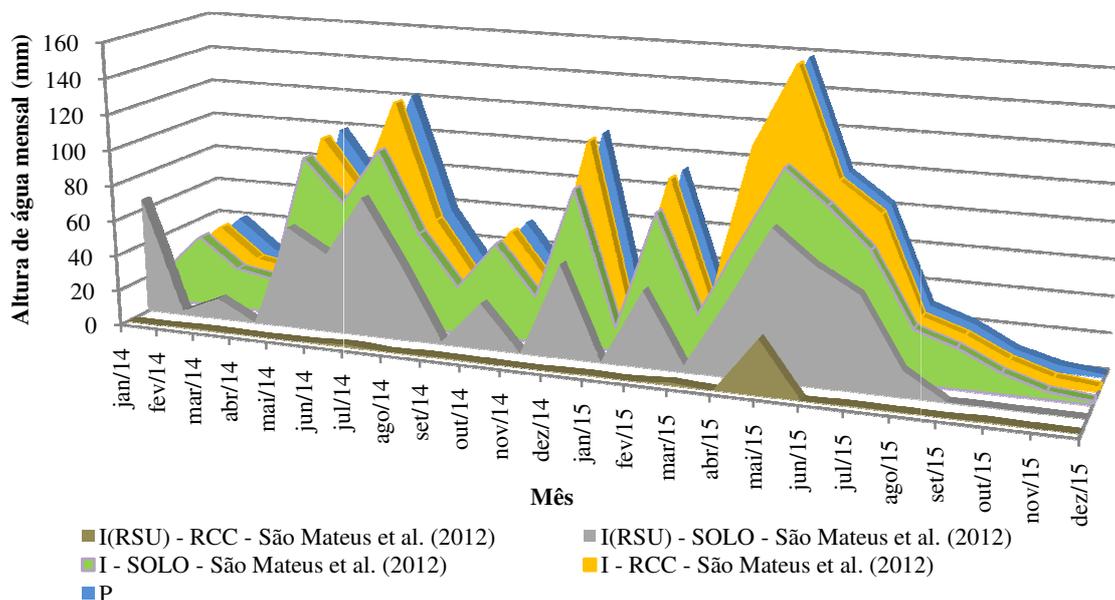


No método de Fenn et al. (1975) não são consideradas as variações de umidade do material de cobertura, e a infiltração é calculada em função da precipitação pluviométrica e do escoamento superficial, portanto, têm-se valores idênticos para o parâmetro de infiltração para o solo e o RCC.

Para esse método, os materiais comportam-se de modo semelhante, infiltrando líquidos para o RSU apenas nos períodos mais chuvosos dos anos. O RCC infiltra uma quantidade de inferior em relação ao solo.

A Figura 45 mostra o balanço hídrico da camada de cobertura para o solo e o RCC calculado pelo modelo de São Mateus et al. (2012).

Figura 45 – SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de São Mateus et al. (2012)



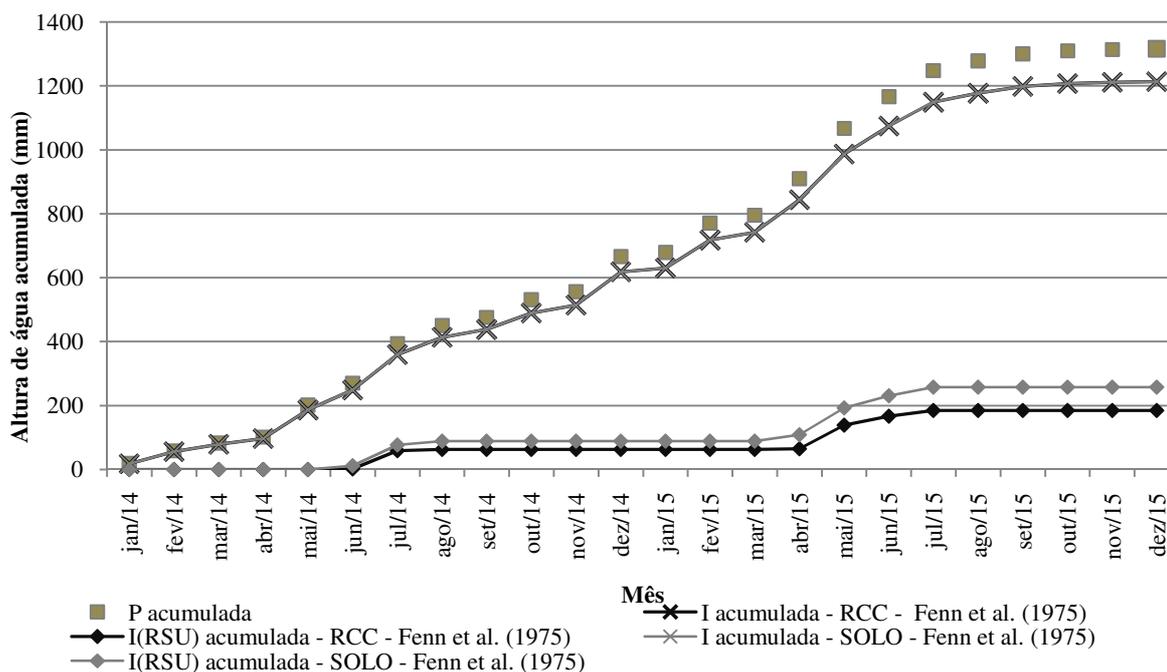
Na Figura 45, identificam-se diversas variações entre os resultados obtidos para a infiltração no RSU, comparando as coberturas em solo e RCC, pelo modelo de São Mateus et al. (2012). Por este modelo, o RCC permite a passagem de líquidos para o RSU em quantidades inferiores ao solo, sendo que este infiltra em praticamente todo o período avaliado, e aquele apenas nos períodos mais chuvosos.

O RCC apresentou valores para a infiltração na camada de cobertura idênticos à precipitação pluviométrica, indicando que não há escoamento superficial. O solo obteve valores menores para este parâmetro em relação ao RCC.

Estas discrepâncias entre os materiais se devem, principalmente, devido à granulometria destes e seus respectivos coeficientes de permeabilidade.

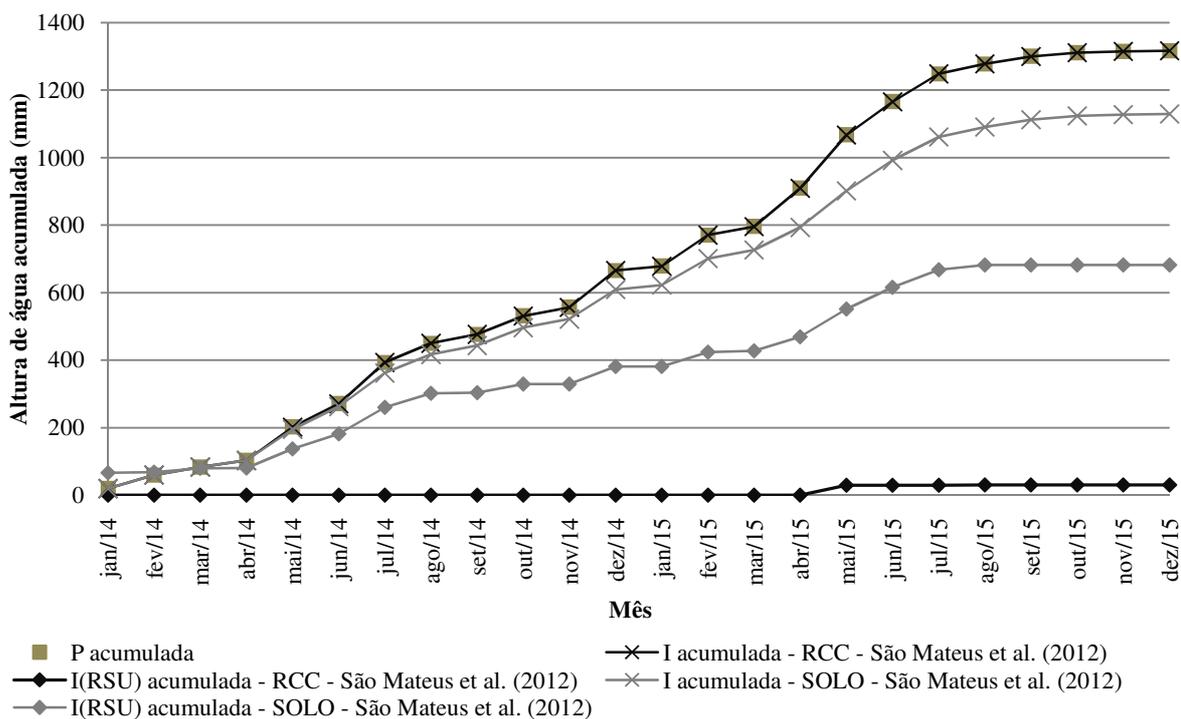
A Figura 46 apresenta os parâmetros acumulados do balanço hídrico da camada cobertura para o solo e o RCC calculados pelo modelo de Fenn et al. (1975).

Figura 46 – SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de Fenn et al. (1975)



Nota-se, pela Figura 46, que o RCC deixou infiltrar para o RSU, aproximadamente, 28,3% menos líquidos do que o solo, para o método de Fenn et al. (1975), em 2014 e 2015, sendo que o fluxo acumulado médio anual para o solo foi de 129,2 mm, e para o RCC de 92,7 mm.

Na Figura 47 estão apresentados os parâmetros acumulados para o balanço hídrico da cobertura para os dois materiais estudados, solo e RCC, obtidos pelo método de São Mateus et al. (2012).

Figura 47 – SOLO e RCC: BH da camada de cobertura para o modelo de São Mateus et al. (2012)

Os materiais possuem comportamentos distintos, notados na Figura 47, sendo que os resultados para a diferença de geração de líquidos entre o solo e o RCC é da ordem de 95,5% ao fim do período avaliado, sendo que o solo possui um fluxo acumulado médio anual de infiltração de água para o RSU de 341,2 mm, e o RCC de 15,2 mm.

Para uma análise da influência dos parâmetros de entrada do balanço hídrico, pela equação de São Mateus et al. (2012), na geração de líquidos para o RSU, foi realizada análise paramétrica, em que foram variados alguns parâmetros, os quais estão listados na Tabela 21, com seus respectivos valores mínimos e máximos utilizados.

Tabela 21 – Variação de parâmetros do BH

Parâmetros	Valores utilizados		Mínimo	Máximo
	SOLO	RCC		
Umidade gravimétrica inicial (ω) - %	13,3	10,5	10	40
Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) - kN/m ³	19,1	18,25	13	19
Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) - %	13,8	22,62	10	40
Coefficiente de permeabilidade saturada (K_{sat}) - cm/s	8,00E-07	1,00E-04	1,00E-09	1,00E-03
Umidade volumétrica saturada (θ_{sat}) - %	70	41,93	20	60
Espessura da camada de cobertura (D) - cm	60	60	30	120

Variando-se o teor de umidade gravimétrica inicial, tem-se que:

- SOLO: Para o valor máximo adotado (13%), não há a possibilidade de utilização de valor maior que este para o solo, visto que sua capacidade de campo é de valor próximo. Para o valor mínimo (1%), a infiltração de água para o RSU sofre redução de 11% em seu valor do que o material na umidade inicial adotada.
- RCC: Para o valor máximo adotado (20%), verifica-se uma infiltração de água para o RSU, em todos os meses avaliados, e o valor deste parâmetro acumulado final aumenta cerca de 70% do que o material na umidade inicial adotada. Para o valor mínimo (1%), a infiltração de água para o RSU não sofre influência da umidade inicial para valores menores do que o adotado.

Alterando-se o peso específico seco máximo, tem-se que:

- SOLO: Para o valor máximo adotado (19,1 kN/m³), não há a possibilidade de utilização de valor maior que este para o solo. Para o valor mínimo (13 kN/m³), verifica-se uma infiltração de água para o RSU, em todos o período avaliado, e o valor deste parâmetro acumulado final diminui cerca de 7%.
- RCC: Para os valores máximo (21 kN/m³) e mínimo adotados (13 kN/m³), não há alteração na infiltração de água para o RSU.

Modificando-se o teor de umidade volumétrica na capacidade de campo, tem-se que:

- SOLO: Para o valor máximo adotado (40%), verifica-se que não há infiltração de água para o RSU no período analisado, ou seja uma redução maior que 100%. Para o valor mínimo (10%), a infiltração de água para o RSU tem um aumento de 59%.
- RCC: Para o valor máximo adotado (40%), verifica-se que não há infiltração de água para o RSU no período avaliado. Para o valor mínimo (10%), a infiltração acumulada de água para o RSU tem um aumento de 90%.

Variando-se o coeficiente de permeabilidade saturada, tem-se que:

- SOLO: Para o valor maior máximo adotado (10⁻² cm/s), verifica-se que há um aumento de 21% na infiltração acumulada de água para o RSU do período analisado. Para o valor mínimo (10⁻⁹ cm/s), a infiltração acumulada de água para o RSU tem uma diminuição de 73%.

- RCC: Para o valor maior máximo adotado (10^{-2} cm/s), não há alteração na infiltração acumulada de água para o RSU do período analisado. Para o valor mínimo (10^{-9} cm/s), a infiltração acumulada de água para o RSU reduz e passa a ser nula.

Modificando-se o teor de umidade volumétrica saturada, tem-se que:

- SOLO: Para os valores máximo e mínimo adotados (60% e 30%), verifica-se que não há alteração na infiltração acumulada de água para o RSU (2014-2015).
- RCC: Para o valor máximo (60%) houve um aumento de 14% na infiltração acumulada de água para o RSU (2014-2015). Para o valor mínimo adotado (27%), não há a possibilidade de utilização de valor menor que este para o RCC.

Alterando-se a espessura da camada de cobertura, tem-se que:

- SOLO: Para o valor máximo adotado (120 cm), verifica-se um aumento de 2% na infiltração acumulada de água para o RSU (2014-2015). Para o valor mínimo (30 cm), a infiltração acumulada de água para o RSU tem um aumento de 3%.
- RCC: Para o valor máximo adotado (120 cm), a infiltração acumulada de água para o RSU reduz e passa a ser nula. Para o valor mínimo (30 cm), a infiltração acumulada de água para o RSU tem um aumento de 80%.

A partir da análise paramétrica, percebe-se que os parâmetros que, individualmente, têm maior influência sobre o BH são aqueles que reduzem ou aumentam, em maiores proporções, os valores de água infiltrada para RSU, que é o caso do teor de umidade na capacidade de campo do material de cobertura e o seu coeficiente de permeabilidade saturada. O θ_{cc} é inversamente proporcional à infiltração de água no RSU, assim, com a redução de um parâmetro ocorre o aumento do outro, e vice-versa. O K_{sat} é proporcional à infiltração de água no RSU, ou seja, quanto menor este parâmetro, menos líquidos serão encaminhados ao RSU, e vice-versa.

A Tabela 22 apresenta um resumo do comportamento hidráulico do solo e do RCC, para os dois métodos utilizados no balanço hídrico.

Tabela 22 - Resumo do comportamento hidráulico do solo e do RCC, para os dois métodos utilizados no balanço hídrico

Parâmetros Acumulados do Balanço Hídrico	Método de Fenn et al. (1975)		Método de São Mateus et al. (2012)	
	Solo	RCC	Solo	RCC
Evaporação (ER)	Menor (1225,0 mm)	Maior (1328,1 mm)	Menor (547,0 mm)	Maior (1388,0 mm)
Escoamento Superficial (ES)	Igual (103,0 mm)	Igual (103,0 mm)	Maior (187,2 mm)	Menor (0 mm)
Infiltração na camada de cobertura (I)	Igual (1213,6 mm)	Igual (1213,6 mm)	Menor (1129,8,0 mm)	Maior (1317,0 mm)
Infiltração no RSU (I_{RSU})	Maior (258,32 mm)	Menor (185,33 mm)	Maior (682,4 mm)	Menor (30,5 mm)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

➤ PARÂMETROS DO RCC

O ensaio de solubilização para o RCC não permite uma melhor avaliação deste material visto que o equipamento utilizado possui um baixo limite de detecção dos metais. Portanto, seria necessária uma repetição deste ensaio em outro equipamento de maior limite de detecção para confirmar que o RCC não teria um potencial contaminador por metais.

Embora o RCC tenha sido classificado como pedregulho arenoso, o coeficiente de permeabilidade determinado em laboratório tem a mesma ordem de grandeza do valor determinado para o solo estudado (10^{-4} cm/s).

A umidade volumétrica na capacidade de campo, determinada para o RCC (24,14%), em laboratório, é pouco menor do que a do solo (24,95%).

➤ PARÂMETROS DO SOLO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UEFS EM FEIRA DE SANTANA/BA

No ensaio de evaporação realizado para o solo, obteve-se uma taxa média de 47%, valor menor do que a taxa de evaporação obtida para o RCC (56%), o que já era esperado, já que o RCC possui pouca argila (6,2%, em média), se comparado ao solo (39%), que retêm mais água.

Para o teor de umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), a curva de retenção de umidade mostrou maior valor (29%), quando comparado ao valor encontrado no ensaio de capacidade de campo (24,95%).

➤ BALANÇO HÍDRICO – MÉTODO DE FENN et al. (1975)

Para o método de Fenn et al. (1975), a camada com o RCC evaporou mais do que o solo em 16 dos 24 dos meses analisados.

Quanto ao escoamento superficial (ES), o solo e o RCC apresentaram o mesmo comportamento durante os anos de 2014 e 2015.

Para a infiltração na camada de cobertura (I), têm-se valores idênticos para o solo e o RCC.

Para a infiltração no RSU (I_{RSU}) o solo e o RCC permitem a passagem de água para o RSU, somente nos períodos mais chuvosos do ano (precipitação maior que 120mm).

Pelo método de Fenn et al. (1975), o RCC e o solo apresentaram comportamento semelhante, sendo que o RCC infiltrou menor quantidade de água para o RSU do que o solo, sendo que o fluxo acumulado médio anual para o solo foi de 129,2 mm, e para o RCC de 92,7 mm.

➤ BALANÇO HÍDRICO – MODELO DE SÃO MATEUS et al. (2012)

No modelo de São Mateus et al. (2012), a camada com o RCC evaporou mais do que o solo, em 22 dos 24 meses avaliados.

Quanto ao escoamento superficial (ES), o RCC apresentou valores nulos durante os anos de 2014 e 2015, e o solo em 13 dos 24 meses.

Do parâmetro de infiltração na camada de cobertura (I), o RCC permite uma maior infiltração do que o solo.

Para a infiltração no RSU (I_{RSU}) o solo e o RCC permitem a passagem de água para o RSU em comportamentos distintos, sendo que a diferença de geração de líquidos entre o solo e o RCC é da ordem de 95,5% ao fim do período avaliado. O solo teve um fluxo acumulado médio anual de infiltração de água para o RSU de 341,2 mm, e o RCC de 15,2 mm.

➤ ANÁLISE PARAMÉTRICA

A partir da análise paramétrica, para o método de São Mateus et al. (2012), constatou-se que os parâmetros que, individualmente, tiveram maior influência sobre o BH foram o teor de umidade na capacidade de campo e o coeficiente de permeabilidade saturada do material de cobertura.

Para a camada de cobertura composta por solo, o método de São Mateus et al. (2012) infiltra aproximadamente 62% mais líquidos para o RSU do que Fenn et al. (1975), nos anos de 2014 e 2015. Quando a camada é composta por RCC, tem-se um aumento nesta geração para 84%.

O RCC estudado apresentou comportamento semelhante ao solo analisado, apesar de ter 54% de pedregulho em sua composição. O ensaio de permeabilidade mostrou comportamento similar ao solo, podendo ter ocorrido uma cimentação na fração fina do RCC.

A aplicação dos dois modelos para análise do Balanço Hídrico nas camadas de cobertura mostra que:

- a infiltração de água para o RSU difere bastante, para um mesmo material de cobertura, quando se compara os dois métodos; o Método de Fenn et al. (1975) promove infiltração de água para o RSU somente no período chuvoso, enquanto o de São Mateus et al. (2012) infiltra em praticamente todo o período porém em quantidades menores;
- a infiltração de água para o RSU na camada de RCC e na camada de solo, apresenta valores distantes para o modelo de São Mateus et al. (2012);
- o modelo de São Mateus et al. (2012) faz o balanço hídrico horário/diário, que é importante para avaliar os períodos de pico de chuva. Quando os valores diários são somados para o mês, o resultado do balanço hídrico difere para os dois métodos, independente do material utilizado na camada de cobertura;
- para o solo, a evaporação e a infiltração na camada de cobertura são menores para o modelo de São Mateus et al. (2012). Entretanto, a infiltração para o RSU é muito maior para este método;
- para o RCC, a evaporação e a infiltração na camada de cobertura são maiores para o modelo de São Mateus et al. (2012). Entretanto, a infiltração para o RSU é muito menor para este método;
- os parâmetros que mais influenciam no balanço hídrico são o teor de umidade na capacidade de campo e o coeficiente de permeabilidade saturada, para o modelo de São Mateus et al. (2012);
- analisando os valores acumulados, verifica-se que o solo e o RCC funcionariam como camada evapotranspirativa quando a simulação é realizada pelo modelo de São Mateus et al. (2012);
- para confirmar a hipótese de utilização do RCC e do solo como camada de cobertura evapotranspirativa, são necessários outros ensaios de laboratório complementares, como o ensaio de infiltração para ajustar melhor o modelo de São Mateus et al. (2012). Serão necessários, também, testes em escala piloto para comparar as medições com os resultados das simulações.

8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir das considerações finais desta pesquisa, sugere-se:

- Realizar o ensaio de curva de retenção de umidade com o RCC e comparar com o solo.
- Efetuar o ensaio de solubilização (em um equipamento de maior limite de detecção do que o utilizado nesta pesquisa) e lixiviação no RCC, para verificar as concentrações de metais pesados.
- Realizar ensaios de infiltração em laboratório com o solo e o RCC, para confrontar com os resultados obtidos pela equação de Philip (1957).
- Verificar o funcionamento do RCC como camada de cobertura evapotranspirativa em uma célula, em escala piloto.
- Realizar simulação de balanço hídrico para os mesmos materiais em local de clima úmido.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2014.

AFFONSO, F. J. de A. Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. Dissertação (mestrado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE/ UFRJ. 161p. 2005.

ALBRIGHT, W. H. et al. Examining the Alternatives. Civil Engineering, v. 73, n. 5, p. 70-75, may. 2003.

AMBIENTAL. Limpeza Urbana e Saneamento Ltda. 2014. Disponível em: <<http://www.ambsc.com.br/saiba-mais/residuos/>>. Acessado em: 03 de março de 2015.

ANDRADE, R DA S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.15, n.2, p.111–116, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 7182: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

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

_____. NBR - 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

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

_____. NBR - 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. NBR – 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. NBR 15113 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. NBR 15114 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes . Áreas de reciclagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. NBR 15115 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação. Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004e.

BARBOSA, M. C.; AFFONSO, F. J. de A. ; BARROS, M. C. de. Agregados reciclados de RCDs em coberturas e sistemas de drenagem de aterros. In: SEMINÁRIO / VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM OBRAS GEOTÉCNICAS. Aveiro, Portugal, 2009.

BARRETO, C. E. A. G. Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. Dissertação (mestrado) – EESC/USP. São Carlos, 2006.

BARROS, M. C. de. Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura. Dissertação (mestrado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE/ UFRJ. 96p. 2005.

BENSEN, C. H.; DANIEL, D. E. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering. Vol 116, nº 8, August, 1990.

BLIGHT, G. E.; FOURIE, A. B. Leachate Generation in Landfills in Semi-arid Climates. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng., 137, Oct., p. 181-188, 1999.

BLIGHT, G. E. et al. Store and Release Landfill Covers in Semi-arid Climates: Experiments in South Africa. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9., 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. Proceedings Sardinia... Cagliari, Italy, 2003.

BRANDÃO, V. DOS S.; PRUSKI, F. F.; SAILVA, D. D. DA. Infiltração da água no solo. Viçosa: UFV, 2004.

BRANDÃO, F. F. Caracterização de resíduos sólidos da construção civil para sua utilização em camadas drenantes de aterros sanitários. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 124 p. 2011.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/ 2010. Brasília: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acessado em: 08 de agosto de 2014.

BRITO, A. S.; et al. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1939-1948, 2011.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedade mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. Tese (Doutorado) – EESC/USP. São Carlos, 2007.

CABRERA, M. C. M. Quantificação da alteração do balanço hídrico devido a cavas de mineração utilizando lisímetros e tanques de evaporação. Dissertação (Mestrado) – EESC/USP. 187 p. São Carlos, 2011.

CAPELO NETO, J.; MOTA, S.; SILVA, F. J. A. da. Geração de percolado em aterro sanitário no semiárido nordestino: Uma abordagem quantitativa. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 4, nº 3, jul/set 1999 e out/dez 1999. ABES: Rio de Janeiro.

CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. Apostila de Hidrologia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agosto/2006.

CARVALHO, Z. S. Comportamento de barreiras minerais com solo compactado na faixa granulométrica ótima para contenção de líquidos orgânicos. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica. Salvador, 2015.

CASTILHOS JR, A. B. de. (coord.). Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 294 p.: il. Projeto PROSAB. ISBN 85-86552-70-4.

CATAPRETA, C. A. A. Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais. 316 p. 2007.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; SILVEIRA, R. M. B. Execução de Camada de Cobertura Final de Aterros Sanitários de Grande Porte - Estudo de Caso do Aterro Sanitário

de Belo Horizonte. In: VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos. Anais... Belo Horizonte/MG, 2011.

CECÍLIO, R. A. Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em latossolo vermelho-amarelo estratificado. Tese (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.

_____. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterros sanitários de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. Resolução nº 404, de 11 de novembro de 2008.

COSTA, A. C. S.; NANI, M. R.; JESKE, E. Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murchamento permanente por diferentes metodologias. Revista Unimar, v.19, p.827-844, 1997.

DAMASCENO, L. A. G. Estudo das propriedades hidráulicas do RCD (resíduos de construção e demolição) para aplicação em coberturas de aterros de RSU (resíduos sólidos urbanos). Relatório de Iniciação científica - FAPESB/UEFS. Feira de Santana, 2013.

DAMASCENO, L. A. G. Estudo da geração e características técnicas dos resíduos da construção civil (RCC) para aplicação em cobertura final de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU). Trabalho de Conclusão de Curso – UEFS. Feira de Santana, 2014.

DAMASCENO, L. A. G.; SÃO MATEUS, M. DO S. C. Estudo da geração e características técnicas dos resíduos da construção civil (RCC) para aplicação em cobertura final de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU). REGEO 2015 - VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos/ VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental.

DAMASCENO, L. A. G.; RIBEIRO, R. C.; SÃO MATEUS, M. DO S. C.; PAIXÃO, J. L. Estudo dos parâmetros geotécnicos de resíduos de construção e demolição para uso em cobertura final de aterros de pequeno porte. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 3, 2014. Barreiras/BA, 2014.

DAS, B. M. Fundamentos da engenharia geotécnica. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DIAS, C. L. Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados. Dissertação (mestrado) – UFPR. Curitiba, 2012.

- DWYER, S. F. Finding a Better Cover. *Civil Engineering*, v. 71, n. 1, p. 58-63, 2001.
- DWYER, S. F. Water balance measurements and computer simulations of landfill covers. Doctor of Philosophy Engineering. The University of New Mexico. Albuquerque, New Mexico, 2003.
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. *Water in Environmental Planning*, 818p. W.H. Freeman and Company, New York, 1978.
- FENN, D. G.; HANLEY, K. J.; DeGEORE, T. V. Use of the Water Balance Method for Predicting Leachate Generation for Solid Waste Disposition Sites. U. S. Environmental Protection Agency, Report no. EPA/530/SW 168. 1975.
- FERNANDES, C. da G. Caracterização Mecânica de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Para Uso em Pavimentação dos Municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Dissertação (mestrado) - COPPE/ UFRJ. 109p. 2004.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons. 507 p. 1993.
- GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para município de pequeno porte. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. de (coord). *Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte/ Projeto PROSAB*. 294 p. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.
- GUIMARÃES, L. M. Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões. Tese (doutorado) – UFV. Viçosa, 2013.
- HUSE, K. Estudo da influencia da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE/ UFRJ. 126 p. 2007.
- JIMÉNEZ, A. M. G. Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado a Partir de Resíduos de Construção e Demolição Submetido a Carregamentos Cíclicos. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2016.
- JOAQUIM JÚNIOR, G. O. Comparação de desempenho de sistemas de cobertura em relação à infiltração de água pluvial no aterro sanitário de Seropédica (RJ), durante a fase de operação. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química/UFRJ. 210 p. 2015.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. Final Cover for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps. Thomas Telford & ASCE Press, 1997.

LAMBE, T.W.; e WHITMAN, R.V. Soil mechanics, Wiley, New York, 1969.

LANGE, L. C.; et al. Implantação e Operação de um Aterro Sustentável para Pequena Comunidade. In: Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2002. 104 p. Projeto PROSAB.

LIMA, J. H. C. Utilização de Resíduo de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 162p, 2008.

LINS, E. A. M. A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2003.

LOPES, R. L.; et al. Infiltração em camadas de cobertura de aterro sanitário no nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26, 2011, Porto Alegre/RS. Anais... Porto Alegre: ABES, 2011.

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

MACHADO, S. L. Modelagem numérica de solos não saturados. Revisão bibliográfica (doutorado) – EESC/USP. São Carlos, 1997.

MACHADO, S. L.; DOURADO, K. A. Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 4, Porto Alegre/RS. Anais... Porto Alegre-RS, 2001.

MARINHO, F. A. M. Os solos não saturados: Aspectos teóricos, experimentais e aplicados. Texto apresentado a USP para o concurso de livre docência. São Paulo, 2005.

MEDEIROS JR. R. A. de; et al. Investigação laboratorial para aproveitamento de RCC na produção de argamassa com uso em estaca de compactação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife/PE. Anais... Recife: ABES, 2009.

MEDEIROS, S. S.; ET AL. Manejo de irrigação utilizando Tanque Classe A. Instituto Nacional do Semiárido (INSA). Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasil, 2013.

MONTEIRO, V. E. D.; et al. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.11, p. 223-230, 2005.

OLIVEIRA, A. da L. Estudo da variação do teor de umidade e sólidos totais voláteis dos resíduos sólidos urbanos, com a precipitação pluviométrica e suas implicações na geração de lixiviados no aterro sanitário integrado de Cruz das Almas/BA. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental/UEFS. 140p. 2011.

OLIVEIRA, M. E. D. de; et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.16, p. 219-224, 2011.

PADILLA, R. S. Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2007.

PEIXOTO, V. C. Análise paramétrica e dimensionamento de poços de infiltração para fins de drenagem urbana. Dissertação (mestrado) – EESC/USP. São Carlos, 2011.

PERUCHI, F. Evapotranspiração real a partir de medidas lisimétricas e sob diferentes condições de disponibilidade hídrica. Dissertação (mestrado) – EESC/USP. São Carlos, 2009.

POLYANNA, M. O.; SILVA, A. M. DA; COELHO, C.; SILVA, R. A. DA. Análise comparativa da caracterização físico-hídrica de um Latossolo Vermelho distrófico in situ e em laboratório. Irriga, v.10, p.1-19, 2005.

REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 505 p.

RIBEIRO, R. C. Estudo da capacidade de campo do RCD (resíduo de construção e demolição) para utilização em camada de cobertura de aterro de RSU. Relatório de Iniciação científica - PROBIC/ UEFS. Feira de Santana, 2014.

ROCCA, A. C. C. Drenagem sub-superficial em aterros sanitários. Revista de Limpeza Pública. São Paulo, v.8, n.19, p.16-27, 1981.

ROSE, J. L. Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais. Tese (doutorado) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.

SALGADO, L. D. Análise da aplicação de agregado reciclado em cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, Z. S. dos. Estudo das propriedades geotécnicas e físico-químicas do solo de Feira de Santana - BA após contaminação com substâncias presentes em lixiviados de aterros sanitários. Dissertação (mestrado) – UEFS. Feira de Santana, 2015.

SANTOS, Z. S. dos.; SÃO MATEUS, M. do S. C. Estudo das propriedades geotécnicas e físico-químicas do solo de Feira de Santana - BA após contaminação com soluções químicas representativas de lixiviados de aterros sanitários. REGEO 2015 - VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos/ VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental.

SÃO MATEUS, M. do S. C. Proposta de Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador - BA. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE. Rio de Janeiro, 2008.

SÃO MATEUS, M. do S. C.; MACHADO, S. L.; BARBOSA, M. C. Geração de líquidos lixiviados em aterros de RSU – Proposta de modelagem e comparação com métodos utilizados para avaliação do balanço hídrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2013, Goiânia/GO. Anais... Goiânia: ABES, 2013.

SÃO MATEUS, M. do S. C.; MACHADO, S. L.; BARBOSA, M. C. An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. Waste Management, v.32, p.471–481, 2012.

SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB). Portaria nº 32, ano 2003. Disponível em:

<http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=19032003P%20000322003SIURB%20%20%20%20%20%20%20&secr=72&depto=0&d escr_tipo=PORTARIA>. Acessado em: 01 de março de 2014.

SHARMA, Hari D.; LEWIS, Sangeeta P. Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation. John Wiley & Sons. Canadá, 1994.

SILVA, A. T. A. DA. Aspectos Meteorológicos e Balanço Hídrico em um Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2008. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

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

SOBRINHO, N. L. C. Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa/MG, 2000.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (org). Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da UFRGS/ABRH. Porto Alegre, 2004.

UBALDO, M. DE O. Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração. Tese (mestrado) - Geotecnia Ambiental - COPPE/UFRJ. 150 p. Rio de Janeiro, 2005.

ANEXOS

Anexo A.2 - Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada [$\sum \text{neg}(I-EP)$], para solo siltoso.

Solo siltoso (ASc = 120 mm)										
NEG (I - EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	125	124	123	122	121	120	119	119	117	116
10	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106
20	106	105	104	103	102	102	101	100	99	99
30	98	97	95	95	94	94	93	92	91	90
40	90	89	88	87	86	86	85	84	84	83
50	83	82	82	81	80	80	79	79	78	77
60	76	76	75	74	74	73	73	72	72	71
70	70	70	69	69	68	68	67	67	66	65
80	65	64	64	63	63	62	62	61	61	60
90	60	59	59	58	58	57	57	56	56	55
100	55	55	54	54	53	53	53	52	52	51
110	51	51	50	50	49	49	49	48	48	47
120	47	47	46	46	45	45	45	44	44	43
130	43	43	42	42	41	41	41	41	40	40
140	40	40	39	39	39	38	38	38	38	37
150	37	37	36	36	36	35	35	35	35	34
160	34	34	33	33	33	32	32	32	32	31
170	31	31	31	30	30	30	30	30	30	29
180	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27
190	26	26	26	26	26	25	25	25	25	25
200	24	24	24	24	24	23	23	23	23	23
210	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
220	21	21	21	21	20	20	20	20	20	20
230	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
240	18	18	17	17	17	17	17	17	17	17
250	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
260	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14
270	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13
280	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12
290	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
300	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10
310	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
320	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
330	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
340	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7
350	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
360	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
370	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
380	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5

Anexo B – Parâmetros climatológicos (2014 – 2015)

Anexo B.1 – Dados de precipitação pluviométrica diária e mensal (2014) – Estação climatológica da UEFS

Precipitação pluviométrica (mm) - 2014												
Dia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,2	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	2,0	0,0
4	0,0	2,6	1,2	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	27,6	0,0	0,0
5	0,0	6,1	8,2	6,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,4	10,4	1,8	0,0
6	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	5,0	2,6	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	0,0	7,3	9,4	3,0	0,0	0,0	0,2
8	0,2	3,8	0,0	0,0	0,7	0,0	3,4	2,4	3,0	0,0	0,0	5,4
9	0,0	3,6	0,0	1,4	0,0	4,0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	6,1	0,0	0,4	3,2	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	2,6
12	2,3	0,0	0,0	0,0	11,2	3,4	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	37,2
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	6,4	0,0	0,0	0,6	5,0	0,0	0,0
14	0,6	0,0	0,0	1,0	0,0	6,7	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2
15	0,0	0,0	2,8	0,0	3,0	0,0	5,9	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,5	0,0	40,5	0,0	6,4	3,2	0,0	0,0	0,1	0,0
17	0,0	0,0	1,6	0,0	9,1	3,1	0,7	11,5	0,0	0,0	1,0	40,7
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	7,2	1,3	3,8	0,8	0,0	2,1	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,3	0,0
20	0,0	4,8	0,0	0,5	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0
21	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,4	0,0	0,0	2,0	0,0
22	8,4	0,0	0,0	0,0	8,8	1,6	29,0	0,0	0,0	5,4	15,0	0,0
2	0,0	3,0	0,0	0,0	1,6	11,4	20,2	0,0	0,4	0,0	0,0	5,4
24	0,0	9,2	0,0	0,0	0,0	6,0	6,6	0,3	2,4	0,6	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,6	0,0	0,0	1,5
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	1,0	0,0	4,2
27	0,0	2,8	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0
28	7,9	0,0	0,0	1,2	0,0	2,8	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	40,3	0,0	7,2	0,0	4,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0		0,0	1,2	1,2	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,0		0,0		3,7		16,0	0,0		0,0		0,0
Mensal	19,4	40,3	23,4	19,6	99,1	69,5	122,3	56,9	26,4	54,2	25,6	109,4

Anexo B.2 – Dados de precipitação pluviométrica diária e mensal (2015) – Estação climatológica da UEFS

Precipitação pluviométrica (mm) - 2015												
Dia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	1,0	0,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	1,8	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,2	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	11,3	1,2	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	5,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	1,2	0,0	2,2	7,8	2,4	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,6	15,8	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0
8	10,2	0,0	0,0	1,0	0,0	2,0	24,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	2,8	0,0	0,0	1,5	0,1	5,0	0,0	0,3	0,0	0,2	4,1	0,0
10	0,0	0,0	0,0	20,4	2,8	1,2	0,0	5,2	0,0	2,3	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	77,8	2,4	4,2	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	41,2	2,6	3,6	0,0	1,2	7,5	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	37,8	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	31,3	0,0	6,5	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	4,8	0,0	11,0	0,0	2,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	40,0	0,0	0,0	1,6	0,0	2,5	4,6	3,4	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	1,0	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0
22	0,0	22,8	4,0	0,0	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	16,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
24	0,0	7,2	0,0	0,0	1,4	3,2	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	4,0	0,0	0,0	1,8	2,8	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	1,0	5,0	0,4	3,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
27	0,0	1,0	1,0	9,6	2,7	13,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	92,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0		0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0		0,0	4,1	0,0
Mensal	13,0	92	25,4	113,3	158,2	98,5	82,5	29,5	22,0	10,2	4,1	1,8

Anexo B.3 – Dados de evaporação potencial diária e mensal (2014) – Estação climatológica da UEFS

Evaporação potencial (mm) - 2014 - Tanque Classe "A"												
Dia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	5,2	7,4	3,5	3,9	3,2	3,2	2,2	3,1	4,1	4,9	4,4	4,6
2	4,8	6,2	4,0	4,1	2,9	2,7	2,4	2,1	5,2	6,2	3,9	6,1
3	4,1	4,5	3,8	4,4	3,4	2,4	3,9	2,6	3,9	7,1	4,4	7,2
4	4,6	5,8	2,9	8,5	2,8	2,3	2,3	2,9	3,4	5,6	4,0	5,9
5	7,5	4,6	4,2	4,8	3,6	2,6	2,5	3,2	4,4	8,2	3,5	4,3
6	5,6	6,2	3,6	3,7	3,4	3,2	2,6	2,4	4,8	6,4	3,8	5,8
7	3,5	7,4	4,0	2,9	3,3	3,5	2,4	2,2	5,2	7,2	4,8	4,5
8	3,9	5,8	4,5	3,6	4,3	3,6	3,2	2,8	5,8	5,6	3,9	6,4
9	4,4	6,4	5,0	3,3	4,6	4,1	3,6	3,1	4,6	6,1	4,5	3,2
10	4,7	7,8	5,6	2,6	3,4	4,4	2,9	2,9	4,9	8,6	3,7	4,5
11	6,2	7,4	4,2	3,2	3,5	3,9	2,4	2,4	3,8	7,5	4,4	4,2
12	5,5	6,3	4,9	4,5	4,7	4,2	2,9	2,0	5,6	6,2	4,8	3,8
13	4,3	6,0	4,0	4,2	3,8	3,1	3,3	2,2	4,4	5,9	5,9	5,6
14	3,4	6,5	4,3	3,1	4,4	2,5	3,6	2,6	3,9	7,2	3,8	6,2
15	4,7	7,2	3,7	4,6	3,6	3,2	2,8	3,1	4,2	7,4	5,8	5,9
16	4,3	6,0	3,3	3,7	3,4	3,8	3,2	3,0	3,9	6,6	6,2	5,6
17	4,7	6,4	4,2	2,9	4,2	2,8	2,4	2,5	4,4	5,6	5,4	6,9
18	5,1	7,6	3,9	5,5	5,4	3,2	2,6	3,3	4,3	4,8	6,2	6,2
19	6,2	6,8	3,6	3,5	5,1	4,2	2,8	2,6	4,2	7,2	3,6	7,7
20	6,7	5,5	3,9	3,0	4,6	4,4	3,1	3,4	5,2	5,9	5,9	6,3
21	3,7	5,2	4,6	3,5	3,9	4,7	3,4	2,8	4,8	6,3	6,2	5,2
22	4,2	5,4	3,7	4,5	3,6	4,9	4,1	3,4	3,9	7,4	8,1	4,6
23	4,9	4,6	4,0	4,8	4,4	4,5	3,6	3,2	4,1	6,9	5,9	4,9
24	4,5	4,2	3,9	5,2	5,2	3,3	3,3	3,8	5,2	7,2	4,9	4,4
25	4,6	5,6	4,3	2,5	3,4	4,1	3,9	3,3	4,7	6,6	4,6	3,8
26	7,6	5,8	4,5	4,5	4,6	3,5	4,3	3,5	4,4	4,9	5,2	4,2
27	6,0	8,4	4,3	4,0	3,1	2,8	3,8	2,6	4,9	6,8	4,6	5,1
28	5,6	7,6	4,8	3,7	2,9	3,2	3,4	2,9	3,9	5,6	4,6	4,6
29	4,8		3,8	4,2	3,3	4,6	2,8	3,3	4,2	6,2	4,5	5,2
30	5,4		4,5	3,4	2,5	4,4	3,1	2,4	4,8	5,1	4,6	4,7
31	5,6		5,4		3,8		2,6	3,5		4,2		4,2
Mensal	156,3	174,7	128,9	120,3	118,3	107,3	95,4	89,1	135,1	197,4	146,1	161,8

Anexo B.4 – Dados de evaporação potencial diária e mensal (2015) – Estação climatológica da UEFS

Evaporação potencial (mm) - 2014 - Tanque Classe "A"												
Dia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	4,8	6,2	3,1	3,5	4,1	3,0	2,8	2,7	4,4	5,8	7,0	4,1
2	5,8	5,8	3,9	3,8	3,2	2,9	2,6	2,5	4,9	8,2	3,5	7,5
3	5,8	6,4	3,4	4,0	3,8	2,6	3,4	3,2	3,6	8,5	5,6	7,7
4	3,6	4,7	2,8	6,4	2,6	3,2	3,1	2,6	4,1	6,8	5,4	6,3
5	4,8	4,2	3,8	4,2	4,5	2,8	2,9	3,4	4,8	7,7	3,7	6,0
6	4,1	5,4	3,2	3,4	3,8	2,8	2,3	2,8	4,2	7,7	4,8	7,5
7	4,2	6,6	4,2	3,1	3,9	3,3	3,2	2,6	4,9	8,2	5,4	5,5
8	5,4	5,2	4,8	2,8	4,7	3,9	2,6	1,9	5,1	7,8	3,4	7,0
9	6,3	6,1	3,9	2,8	4,4	4,6	3,3	2,2	4,3	6,6	6,4	3,5
10	4,4	6,8	4,6	2,2	3,6	4,1	4,2	3,3	5,2	9,2	4,1	3,5
11	5,4	6,4	5,1	3,4	4,4	3,7	3,1	2,8	4,2	8,4	5,5	4,6
12	5,2	5,4	4,4	3,8	5,6	3,9	2,6	2,3	5,2	7,6	5,3	4,4
13	4,2	4,8	3,9	4,6	4,2	2,8	3,4	2,4	3,9	6,8	5,7	7,6
14	3,7	5,7	4,5	3,4	4,9	2,6	3,6	2,1	3,4	8,4	3,4	7,9
15	4,3	6,6	3,4	4,2	3,8	3,4	2,4	2,9	4,4	8,6	7,9	6,8
16	4,4	4,9	3,1	3,3	3,6	3,6	3,6	3,4	4,1	7,4	7,1	5,3
17	6,5	6,4	4,6	2,6	4,2	3,1	2,6	2,7	4,8	6,9	6,1	7,1
18	4,1	7,2	4,2	4,4	5,4	2,9	3,2	3,2	3,8	5,4	7,3	7,3
19	5,4	6,6	3,4	3,8	5,6	3,8	2,1	2,2	3,6	8,2	4,0	7,9
20	4,2	5,4	3,9	2,4	3,9	4,8	3,9	3,1	4,5	8,6	6,5	4,8
21	3,6	4,8	3,1	2,9	3,2	4,4	3,6	3,3	4,4	7,6	6,9	4,2
22	3,2	5,2	4,8	3,8	2,8	5,1	3,9	3,9	3,4	8,7	7,6	4,4
23	4,4	4,4	4,2	4,5	4,5	5,5	2,8	3,6	3,7	7,2	5,4	5,2
24	4,3	4,1	3,8	4,9	4,9	4,2	3,1	4,1	4,9	8,5	4,5	5,5
25	4,7	5,2	4,5	2,7	3,8	3,8	4,1	3,4	4,2	8,9	4,6	4,6
26	6,2	5,5	4,6	3,6	4,7	3,3	4,8	3,9	4,7	5,4	5,8	5,0
27	5,4	7,4	4,8	4,1	2,6	2,6	4,4	2,8	4,1	7,8	5,4	5,5
28	5,0	7,2	5,1	3,2	3,2	3,4	3,6	2,6	4,4	6,8	3,6	5,5
29	5,7		4,5	4,6	2,9	4,2	2,5	3,1	4,1	7,2	4,0	4,8
30	5,2		4,3	3,8	2,2	4,6	3,4	2,7	5,2	6,5	3,4	4,5
31	6,6		5,2		3,4		2,8	3,2		4,9		4,0
Mensal	150,9	154,5	127,1	110,2	122,4	108,9	99,9	90,9	130,5	232,3	159,3	175,5