

## Avaliação da Formação de Fissuras por Ressecamento em Camadas Impermeabilizantes Executadas com Misturas Solo-RCC por Meio de Imagens.

Bruno William Gomes da Silva

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, bruno.wgm@gmail.com

Lucas Oliveira Mendes

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, lucas.sednem@gmail.com

Conceição de Maria Cardoso Costa

Instituto Federal de Brasília, Brasília-DF, Brasil, 1371926@etfbsb.edu.br

Tomás Joviano Leite Silva

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, jovianotomas@gmail.com

Cláudia Márcia Coutinho Gurjão

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, cgurjao@unb.br

Luis Fernando Martins Ribeiro

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, lmartins@unb.br

**RESUMO:** A destinação adequada dos resíduos sólidos é um problema enfrentado por vários países. No Brasil, os lixões ainda predominam como a principal solução para a disposição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), embora representem uma alternativa na qual não há qualquer controle sobre os resíduos e seus subprodutos, provocando sérios impactos ambientais e sociais. Nesse sentido a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) visa à substituição dos lixões existentes por aterros sanitários, nos quais há um controle mais adequado do lixo. No projeto de um aterro sanitário deve-se pensar na camada de cobertura, que é constituída por solo argiloso compactado, de baixa permeabilidade, visando minimizar o fluxo de líquidos para o interior do aterro. Entretanto, períodos climáticos de seca e chuva podem submeter essa camada a ciclos de ressecamento e molhagem, favorecendo processos de expansão e retração do solo e provocando trincas. Portanto, este artigo fornece um estudo comparativo sobre a ocorrência de trincamento da camada de cobertura de aterros sanitários com base em ensaios de laboratório simulando o efeito de secagem-molhagem (D-W) em amostras de solo natural e em misturas de solo e Resíduos de Construção Civil (RCC) na forma de agregado. As amostras utilizadas nesta pesquisa foram preparadas utilizando solo argiloso natural obtido na área de implantação do Aterro Sanitário de Brasília. Foram preparadas misturas do solo com 10%, 20%, 30% e 40% de RCC, as quais foram submetidas a três ciclos sequenciais de D-W. A evolução de fissuras superficiais foi monitorada por meio de fotos sequenciais, que passaram por processamento de imagem com o auxílio do software IMAGEJ, no qual foram contabilizados os pixels das imagens obtidas das amostras submetidas aos ciclos D-W, seguido da regulação de contraste. As dimensões das fissuras de superfície foram quantificadas usando o fator de intensidade de fissuras (CIF). Os resultados destas análises mostraram que o comportamento das amostras foi significativamente afetado pelos ciclos D-W aplicados e também pela adição do agregado reciclado (RCC). A adição de RCC ao solo mudou o

padrão de fissuramento, retardando o aparecimento das fissuras sob os mesmos ciclos sequencias D-W e reduzindo o fator de intensidade de fissuras (CIF) quando comparado com o solo natural.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterros sanitários, ressecamento, camadas de cobertura, fissuras, impermeabilização.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Aterros sanitários

A norma brasileira NBR 8419/92 define o aterro sanitário como “técnica de disposição de resíduos sólidos no solo sem causar danos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais, (...) que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores” (ABNT, 1992). A Figura 1 mostra uma esquematização da construção de um aterro sanitário.



Figura 1. Estruturas do aterro sanitário (UNESP, 2016)

Dentro da estrutura de um aterro sanitário vários sistemas podem ser identificados, os quais podem-se citar:

- impermeabilização inferior: garante a estanqueidade do aterro, evitando a troca de líquidos entre a massa de lixo e o solo.
- camada de cobertura (ou camada selante): esta camada tem a função de isolar do meio externo camadas de lixo com capacidade de produzir material percolante e devem ter baixíssima permeabilidade de modo a minimizar a infiltração de água.
- sistema de drenagem e tratamento de gás: visa à coleta dos gases gerados pela decomposição dos resíduos.

- sistema de drenagem e remoção do lixiviado: tem como função drenar e remover os líquidos que percolam através dos resíduos.

- sistema de drenagem superficial: visa o controle do escoamento superficial de águas;

- sistema de tratamento do lixiviado: visa o tratamento para o líquido percolado coletado

Quando o aterro chega ao fim de sua vida útil, uma camada selante final é implantada como cobertura, o qual deve ter estanqueidade e baixa permeabilidade para minimizar a infiltração de líquidos do meio externo para o interior do aterro bem como barrar a saída de gases. A norma brasileira NBR 13986/97 estabelece um coeficiente hidráulico ( $k$ ) menor que  $10^{-6}$  para tais estruturas (ABNT, 1997). Nesse sentido, devem ser considerados solos com baixa condutividade hidráulica (condição normalmente associada a solos argilosos) e a provável formação de trincas, que podem levar à formação de caminhos preferenciais de fluxo para o interior do aterro.

### 1.2 Resíduos de construção civil

Os resíduos de construção civil (RCCs), um dos principais componentes dos resíduos sólidos urbanos, podem ser definidos como materiais originários de construções, reformas, reparos e demolições de obras, assim como os provenientes de escavações de terreno (CONAMA, 2006).

O Brasil estabelece como legislação para tratar dos RCCs a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que prevê parâmetros para o adequado manejo desses resíduos, classificando-os quanto às seguintes classes (CONAMA, 2006):

- Resíduos Classe A: Compreende os resíduos que podem ser reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como produtos cerâmicos e argamassas.

- Resíduos Classe B: Reúne os resíduos que podem ser reciclados ou reutilizados em outras

formas que não sejam na forma de agregado, tais como plásticos, metais e vidro.

- Resíduos Classe C: Resíduos os quais não foram desenvolvidas tecnologias que permitam sua reciclagem ou reutilização.

- Resíduos Classe D: Resíduos que oferecem risco à saúde pública e ao meio ambiente, tais como solventes, tintas e produtos contaminados.

### 1.3 Ressecamento por perda de umidade.

O ressecamento do solo é provocado pela perda de água, que ocorre por fenômenos como evaporação, evapotranspiração e drenagem. Essa perda d'água causa uma poropressão negativa no solo, acrescentando assim sua pressão efetiva e provocando sua contração e, conseqüentemente, o aparecimento de trincas, o que é favorecido por sua baixa resistência à tração. Essas trincas podem aumentar a permeabilidade do solo na medida em que cria caminhos preferencias para o fluxo de líquidos.

Lakshmikanta (2009) desenvolveu uma metodologia para avaliar o ressecamento em finas camadas de solo, levando em conta a taxa de ressecamento e o coeficiente de ressecamento. O autor percebeu dois tipos de fissuras; as principais, causadas pela contração do solo em si, e as secundárias, provocadas pela propagação das fissuras primárias. Percebeu-se também que a espessura e o formato da amostra também influenciam nos padrões de fissuração. A Figura 2 mostra um padrão de ressecamento observado por Lakshmikanta (2009)



Figura 2. Padrão de ressecamento observado por Lakshmikanta (2009).

## 2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 2.1 Solo natural

O solo natural foi coletado na área de construção do Aterro Sanitário Oeste do Distrito Federal, localizado na Região Administrativa de Samambaia, DF nas proximidades da DF-180, cujas coordenadas são 15°51'41"S e 48°09'10"W (vide Figura 3).

Para realização dos ensaios uma secagem prévia do solo foi realizada até a Umidade Higroscópica, seguindo os procedimentos da NBR 6457/86 (ABNT, 1986).



Figura 3. Localização da região de coleta

### 2.2 Resíduos de Construção Civil

O resíduo utilizado é denominado “areia rosa”, segundo a empresa fornecedora “Areia Bela Vista”, localizada em Sobradinho, DF. De acordo com este fornecedor este resíduo não sofreu segregação na obra e é constituído por materiais cerâmicos, argamassa, concreto e solo, podendo ser classificado como um resíduo Classe A.

Para obtenção destes tipos de resíduos a empresa adota o seguinte processo:

- Triagem prévia para retirada de elementos metálicos;
- Britagem, peneiramento e posterior classificação granulométrica.

Cabe ressaltar o caráter essencialmente granular do RCC, uma areia fina a média, com  $G_s$  médio de 27 kN/m<sup>3</sup> contrapondo o comportamento fino do solo, um silte inorgânico de média plasticidade.

## 3 ENSAIOS DE RESSECAMENTO

O ensaio de ressecamento analisado neste trabalho consiste em uma adaptação da

metodologia proposta por Lakshmikanta (2009). Neste ensaio amostras de solo puro e de solo misturado com RCC foram previamente preparadas para serem submetidas a 3 ciclos de ressecamento e molhagem. Os procedimentos do ensaio estão descritos a seguir:

- Primeiramente, água foi adicionada a amostras de solo até que se atingisse uma pasta homogênea e consistente. Desse material alguns exemplares foram recolhidos para medição da umidade.

- Em seguida a pasta foi disposta em uma bandeja plástica nas dimensões 356,36 mm x 22,39 mm, em uma lâmina de 15 mm. Nessa etapa a massa da amostra foi medida.

- Com a amostra preparada iniciou-se o primeiro ciclo de secagem, na qual foram usadas lâmpadas incandescentes. Uma câmera foi utilizada para registrar as etapas do ressecamento.

- Após o ressecamento completo a massa da amostra foi novamente medida, mais 550 g de água foram adicionados e a amostra foi submetida novamente a ressecamento. A Figura 4 mostra um desses ensaios sendo realizado:



Figura 4. Ensaio de Ressecamento.

Cada amostra foi submetida a três ciclos de ressecamento e molhagem, e os procedimentos descritos foram aplicados à amostra de solo puro e a amostras de solo e RCC nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40% de resíduo em relação à massa seca de solo. A tabela 1 mostra o tempo necessário para o aparecimento das primeiras fissuras para cada amostra no primeiro ciclo de secagem.

Tabela 1. Tempos de aparecimento das primeiras fissuras

| Amostra        | Tempo para aparecimento das fissuras |
|----------------|--------------------------------------|
| Solo puro      | 1h45 min                             |
| Solo + 10% RCC | 1h14 min                             |
| Solo + 20% RCC | 5h01 min                             |
| Solo + 30% RCC | 2h10 min                             |
| Solo + 40% RCC | 0h03 min                             |

A seguir as imagens 5 a 9 mostram os resultados do primeiro ciclo de ressecamento para todas as misturas.



Figura 5. Padrão de fissuramento Solo puro



Figura 6. Padrão de fissuramento Solo + 10% RCC



Figura 7. Padrão de fissuramento Solo + 20% RCC



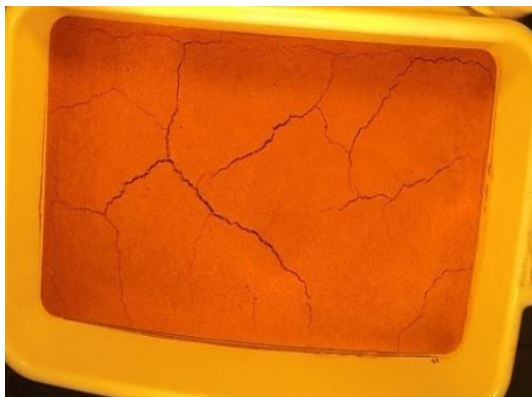


Figura 8. Padrão de fissuramento Solo + 30% RCC

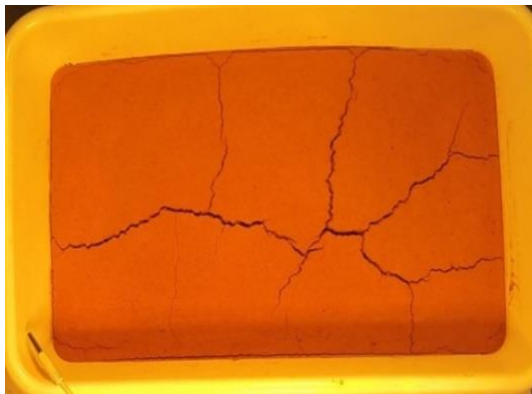


Figura 9. Padrão de fissuramento Solo + 40% RCC.

## 4 ANÁLISE GRÁFICA DOS ENSAIOS

### 4.1 Objetivos da análise gráfica

As Figuras 5 a 9 relativas aos padrões de fissuramento que ocorreram nas diversas amostras foram analisadas com o auxílio do software “ImageJ”, no qual foram contabilizados os pixels de cada imagem dos solos com suas fissuras, depois da exposição e regulação de contraste nas imagens.

Pode-se perceber que as fissuras possuem uma coloração diferente da coloração da massa de material intacto nas imagens obtidas, sendo também mais escuras à medida que se tornam mais profundas. O software utiliza de um contraste e contabiliza a quantidade de pixels numa área pré-determinada da imagem. Assim é possível obter um histograma de cada imagem com a quantidade de pixels. Aquele histograma que apresenta mais pixels escuros é o que possui mais fissuras ou consequentemente uma maior concentração de fissuras. Além disso, quanto mais escuros forem os pixels, mais profundas são essas fissuras.

### 4.2 Análise gráfica e histograma de fissuras

A imagem obtida com contraste evidencia bem a quantidade de fissuras e proporciona uma análise qualitativa visual, comparando as fissuras no solo puro e no solo com adição de RCC.

Os histogramas também podem ser usados para comparar a quantidade e o tamanho das fissuras com maior precisão. Na análise dos histogramas os pixels variam de 0 a 255, onde 0 representa a fissura mais profunda (cor preta) e 255 representa a parte mais rasa da análise (cor branca). Nos histogramas os principais números a serem considerados são:

- *Count*: quantidade de pixels analisados;
- *Mean*: valor médio da coloração dos pixels;
- *StdDev*: Desvio padrão;
- *Min*: Valor mínimo;
- *Max*: Valor máximo;

Para cada solo foi possível obter as seguintes imagens e os respectivos histogramas:

#### 4.2.1 Solo puro

A Figura 10 mostra uma grande concentração de fissuras no solo puro em relação à área total da amostra.

Esta condição é evidenciada pela Figura 18 em que o histograma apresenta um diagrama espesso para o solo puro; em relação às amostras com RCC, somente a mistura solo + 10% RCC apresentou uma densidade de fissuras maior.



Figura 10. Contraste Solo Puro

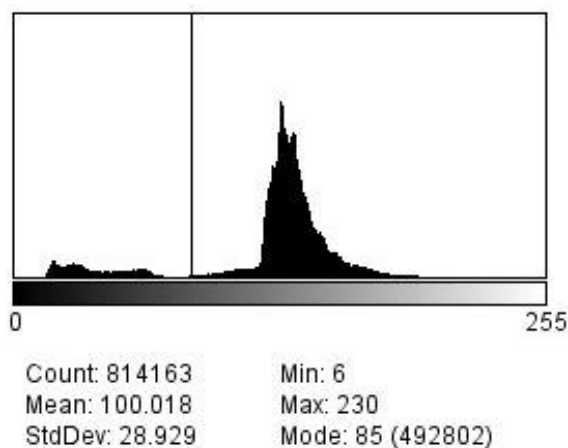


Figura 11. Histograma Solo Puro

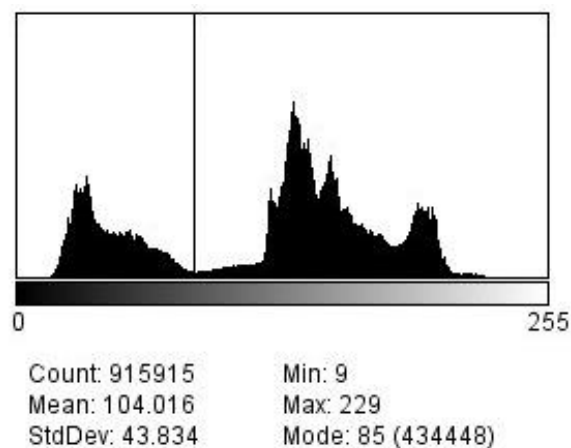


Figura 13. Histograma Solo + 10% RCC

#### 4.2.2 Solo com 10% RCC

A partir da Figura 12 é possível observar pouca mudança na quantidade de fissuras em relação à amostra de solo puro. A mistura solo + 10% RCC aparenta ter uma quantidade menor e fissuras menores do que o solo natural (Figura 10), mas sem conclusões precisas e/ou mudanças significativas.



Figura 12. Contraste Solo + 10% RCC

É possível observar na Figura 13 um histograma bem espesso, colorido de preto, indicando uma grande variação de pixels, ou seja, muitas fissuras. Além disso, o desvio padrão possui valor bem grande, 43,834, indicando que o tamanho e a profundidade das fissuras são bem variados. Este comportamento se mostrou bastante atípico, se comparado com as demais misturas de solo e RCC.

#### 4.2.3 Solo com 20% RCC

Na Figura 14 é possível observar grande mudança na quantidade de fissuras. A mistura solo + 20% RCC possui uma quantidade significativamente menor e fissuras menores do que o solo natural.



Figura 14. Contraste Solo + 20% RCC

De acordo com o histograma apresentado na Figura 15, a mistura solo + 20% RCC mostrou ter um bom desempenho no sentido de minimizar o aparecimento de fissuras. O histograma aparenta ser mais fino, o que indica pouca variação de pixels, ou seja, poucas fissuras. Além disso, o desvio padrão é menor do que as outras composições analisadas, indicando menor variabilidade na profundidade e no tamanho médio das fissuras.

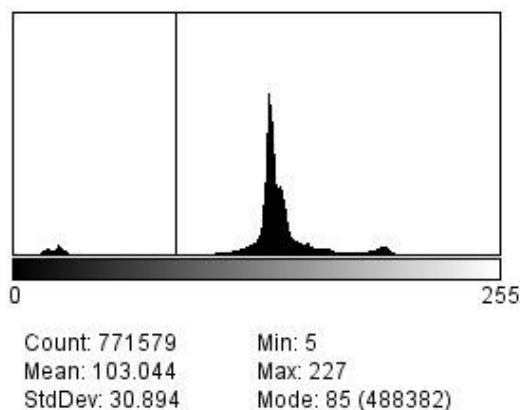


Figura 15. Histograma Solo + 20% RCC

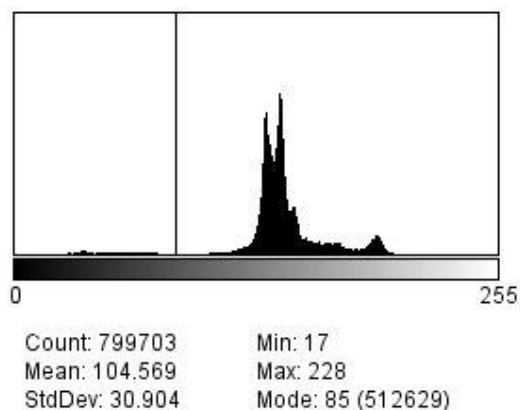


Figura 17. Histograma Solo + 30% RCC

#### 4.2.4 Solo com 30% RCC:

Na Figura 16 é possível observar grande mudança na quantidade de fissuras em relação ao solo natural. A mistura solo + 30% RCC possui um padrão de fissuração significativamente menor e fissuras menores do que o solo natural (Figura 10), porém uma quantidade ligeiramente maior do que a mistura solo + 20% RCC (Figura 14)



Figura 16. Contraste Solo + 30% RCC

#### 4.2.4 Solo com 40% RCC:

A Figura 18 mostra uma mudança razoável na quantidade de fissuras em relação ao solo natural (Figura 10). A amostra solo + 40% RCC possui uma quantidade razoavelmente menor de fissuras, sendo razoavelmente menores do que o solo natural e o solo + 10% RCC, porém uma quantidade maior do que o solo + 20% RCC e o solo + 30% RCC.



Figura 18. Contraste Solo + 40% RCC

O histograma apresentado na Figura 17 indica um bom desempenho quanto ao fissuramento da mistura solo + 30% RCC em relação ao solo natural e à mistura solo + 10% RCC, uma vez que o mesmo é mais fino do que os desses. Outro aspecto importante é a variabilidade do tamanho das fissuras. O desvio-padrão obtido, 30,904, é menor do que o das outras amostras analisadas, salvo o da amostra solo + 20% RCC, cujo desvio-padrão é ligeiramente menor.

A Figura 19 indica um médio desempenho da amostra solo + 40% RCC em relação ao solo natural e ao solo + 10% RCC, uma vez que o histograma aqui é mais fino do que o obtido na análise de imagens destas outras amostras. Quanto à variabilidade do tamanho das fissuras, o desvio-padrão obtido foi 36,030, sendo menor do que o desvio encontrado para o solo + 10% RCC, porém maior que os desvios para as amostras de solo puro, solo + 20% RCC e solo + 30% RCC. Este comportamento tende a indicar que as fissuras no solo + 40% RCC variam consideravelmente em profundidade e tamanho.

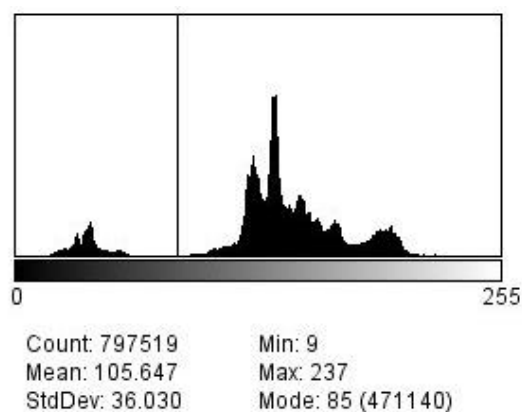


Figura 19. Histograma Solo + 40% RCC

## 5 CONCLUSÃO

Analizando os resultados obtidos a partir das imagens com e sem contraste foi possível observar visualmente uma mudança no padrão de formação de fissuras para as diferentes amostras ensaiadas. O solo natural apresentou mais fissuras do que todos os outros solos, exceto em relação à da mistura contendo 10% RCC.

Com base na análise dos histogramas é possível concluir melhoras no desempenho em relação à formação de fissuras quando se compara o solo natural com a mistura de solo e RCC.

Na tentativa de minimizar a formação de fissuras e garantir a baixa permeabilidade dos solos para aplicação em aterros, os resultados dessa análise, tanto visual quanto dos histogramas obtidos, apontam uma dosagem ideal capaz de promover uma diminuição da quantidade e da profundidade de fissuras considerando uma faixa de 20 a 30% de RCC em relação à massa seca de solo natural.

É importante ressaltar que esta pesquisa encontra-se em fase inicial e a metodologia usada nos ensaios de ressecamento fornecem basicamente dados de caráter qualitativo. Estudos adicionais devem ser realizados a respeito da metodologia do ensaio, bem como o processo de preparação de amostras, uma vez que estas camadas estão submetidas a um processo de compactação, o qual não foi simulado nestas análises.

Estudos adicionais têm sido realizados de forma a avaliar melhor as condições iniciais das amostras bem como o controle mais rigoroso do processo de secagem e molhagem, destacando neste sentido os estudos realizados por Costa (2015).

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro à pesquisa e ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB) por disponibilizar o espaço e os equipamentos do laboratório de Geotecnia para realização dos ensaios. Os autores também gostariam de agradecer ao Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal (SLU) pelo acesso ao sítio das obras do Aterro Sanitário Oeste do Distrito Federal.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 307. Estabelece Diretrizes, Critérios e Procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil. Diário Oficial da União. Brasília, 2006.
- COSTA, C.M.C. Avaliação da Fissuração por Ressecamento em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários Utilizando Materiais Alternativos Tese de Doutorado. Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015. 163p.
- LAKSHMIKANTA, M.R. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. PhD Thesis, Enginyeria del Terreny, Cartogràfica I Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009, 390p.
- UNESP. 5. Formas de disposição de resíduos. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res13.html> (Acessado em 28 de março de 2016)