

FILIPPE FEIJOLI BRANDÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO
CIVIL PARA SUA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DRENANTES DE
ATERROS SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011**

FILIPPE FEIJOLI BRANDÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL
PARA SUA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DRENANTES DE ATERROS
SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de novembro de 2011.

Ann Honor Munteer
(Co-Orientadora)

Maria Eugênia Gimenez Boscov
(Co-Orientadora)

Rubenei Novais Souza

Izabel Christina D Almeida Duarte de Azevedo
(Orientadora)

DEDICATÓRIA

Primeiramente a minha mãe, que apesar da distância sempre me apoiou e me deu força para continuar lutando através de seu amor e carinho, principalmente nos momentos mais difíceis.

A minha orientadora, professora Izabel Azevedo, pois sem ela minha pesquisa seria apenas trabalho e não aprendizado.

Ao grande amigo Renato Mareto por topa este grande desafio ao meu lado e por conseguir conduzir todas as etapas com competência.

A minha namorada Thais, que esteve sempre do meu lado me dando apoio e encorajando em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas a quem eu gostaria de expressar meus agradecimentos, mas como o espaço é reduzido, limitarei-me àquelas que mais influenciaram e que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, principalmente minha mãe Marlene, que, mesmo com todas as dificuldades que a vida apresentou, se mostrou com muita força para me apoiar em cada momento de minha vida.

Ao meu amigo Renato Mareto, que assumiu uma grande responsabilidade me ajudando em todas as etapas deste trabalho, até mesmo resolvendo os mais complexos problemas que foram surgindo durante as etapas desta pesquisa.

A minha grande orientadora, professora Izabel Azevedo, pela motivação, paciência, apoio e amizade em todos os momentos.

Às professoras conselheiras Maria Eugênia e Ann Honor, pelo apoio e valiosas sugestões para melhoria deste trabalho.

A minha namorada Thais, por estar sempre ao meu lado, compreensiva e me dando toda a força necessária para conclusão desse trabalho.

Aos professores Eduardo Marques e Enivaldo Minette pelos conselhos, amizade e por todo o apoio não só neste trabalho, mas em todos os momentos.

Ao Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas da UFV, pelo apoio.

A todos os meus amigos, pela amizade, colaboração e pelo estímulo, sem os quais este trabalho não teria sido tão gratificante.

A todos os funcionários e técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, pela valiosa ajuda nos ensaios e pelo carinho e amizade consolidados neste período de convivência.

Enfim, a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FILIPPE FEIJOLI BRANDÃO, filho de Marlene Gonçalves Feijoli e José Rubim da Silva Brandão, nasceu aos 29 dias do mês de março do ano de 1987, na cidade de Bom Jesus do Norte/ES.

Em julho de 2009, concluiu o curso de Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa/MG.

Iniciou, em agosto de 2009, o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

Em outubro de 2010 foi incorporado ao corpo técnico da empresa Petrobras, atuando até o presente momento como fiscal na implementação de empreendimentos companhia.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Considerações gerais.....	1
1.2 - Justificativa e objetivo.....	1
1.3 - Organização da dissertação.....	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 - Resíduos de construção e demolição (RCD).....	4
2.1.1 - Definição de RCD.....	4
2.1.2 - Geração de RCD.....	4
2.1.3 - Composição do RCD.....	5
2.1.4 - Classificação do RCD para reciclagem como agregado.....	6
2.1.5 - Gerenciamento e reciclagem do RCD.....	8
2.2 - Usinas de reciclagem.....	18
2.3 - Sistemas de drenagem de aterros de resíduos sólidos.....	24
2.4 - Colmatação de sistemas de drenagem.....	27
2.4.1 - Colmatação física.....	27
2.4.2 - Colmatação química.....	27
2.4.3 - Colmatação biológica.....	28
2.5 - Lixiviado.....	28
2.5.1 - Geração e características do lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos.....	28
2.5.2 - Composição.....	29
2.5.3 - Caracterização do Lixiviado de Aterros Sanitários.....	31

a) - pH.....	32
b) - Matéria Orgânica.....	32
c) - Nitrogênio.....	33
d) - Sólidos.....	33
e) - Metais	34
3 - METODOLOGIA.....	35
3.1 - Coleta e estocagem.....	35
3.2 - Preparação das amostras ensaiadas.....	37
3.3 - Ensaio de distribuição granulométrica nas amostras de RCD.....	38
3.4 - Ensaio de permeabilidade.....	41
3.5 - Ensaio de compressão confinada.....	44
3.6 - Caracterização do lixiviado utilizados nos ensaios.....	46
3.7 - Avaliação de colmatção dos RCD pelo lixiviado.....	46
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 - Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão.....	52
4.2 - Ensaio de permeabilidade.....	56
4.3 - Ensaio de resistência a compressão confinada.....	57
4.4 - Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão.....	62
4.5 - Caracterização do lixiviado do Aterro Sanitário de Sabará.....	69
4.6 - Avaliação de colmatção dos RCD pelo lixiviado.....	70
5 - CONCLUSÃO.....	75
5.1 - Conclusão.....	75
5.2 - Sugestões.....	76
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXO A.....	88
ANEXO B.....	93
ANEXO C.....	95
ANEXO D.....	100
ANEXO E.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos resíduos conforme Resolução CONAMA nº 307/2002.....	6
Tabela 2 – Municípios brasileiros com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição e classificados quanto à existência e tipo de processamento dos resíduos.....	10
Tabela 3 – Municípios brasileiros com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição e classificados quanto à forma de disposição dos resíduos no solo.....	13
Tabela 4 – Variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros.....	30
Tabela 5 – Composição e nomenclatura das amostras ensaiadas.....	37
Tabela 6 – Resultados do ensaio de permeabilidade.....	56
Tabela 7 – Deformação vertical na camada de RSU para cada tipo de resíduo de RCD.....	61
Tabela 8 – Comparação da caracterização físico-química do lixiviado.....	69
Tabela A1 – Amostra 1V: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	88
Tabela A2 – Amostra 2V: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	89
Tabela A3 – Amostra 1C: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	89
Tabela A4 – Amostra 2C: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	90
Tabela A5 – Amostra 1B: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	91
Tabela A6 – Amostra 2B: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	91
Tabela B1 – Amostra 1V: Resultados do ensaio de permeabilidade.....	93
Tabela B2 – Amostra 2V: Resultados do ensaio de permeabilidade.....	93
Tabela B3 – Amostra 1C: Resultados do ensaio de permeabilidade.....	94

Tabela B4 – Amostra 2C: Resultados do ensaio de permeabilidade.....	94
Tabela C1 – Amostra 1V: Ensaio de compressão confinada.....	95
Tabela C2 – Amostra 2V: Ensaio de compressão confinada.....	96
Tabela C3 – Amostra 1C: Ensaio de compressão confinada.....	96
Tabela C4 – Amostra 2C: Ensaio de compressão confinada.....	97
Tabela C5 – Amostra 1B: Ensaio de compressão confinada.....	98
Tabela C6 – Amostra 2B: Ensaio de compressão confinada.....	99
Tabela D1 – Amostra 1V: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	100
Tabela D2 – Amostra 2V: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	101
Tabela D3 – Amostra 1C: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	101
Tabela D4 – Amostra 2C: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	102
Tabela D5 – Amostra 1B: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	102
Tabela D6 – Amostra 2B: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	103
Tabela E1 – Amostra 1V: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD.....	104
Tabela E2 – Amostra 2V: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD.....	105
Tabela E3 – Amostra 1C: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD.....	106
Tabela E4 – Amostra 2C: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Origem do RCD no Brasil.....	5
Figura 2 – Distribuição da composição dos RCD em Recife, PE.....	6
Figura 3 – Separação dos RCD por tipo: (a) Tipo I; (b) Tipo II.....	8
Figura 4 – Vista do pátio de processamento da Usina de Reciclagem de Estoril.....	18
Figura 5 – Algumas das distribuições granulométricas que podem ser obtidas com o ajuste do britador da Usina de Reciclagem de Estoril.....	19
Figura 6 – Pilha de depósito de material tipo vermelho.....	20
Figura 7 – Pilha de depósito de material tipo cinza.....	20
Figura 8 – Trabalhadores realizando a seleção manual.....	21
Figura 9 – Materiais retirados na etapa de seleção manual.....	22
Figura 10 – Vista do britador	22
Figura 11 – Carregamento do britador.....	23
Figura 12 – Vista geral do britador em atividade.....	23
Figura 13 – Esteira conduzindo o material britado.....	24
Figura 14 – Representação típica de um sistema de drenagem do lixiviado.	26
Figura 15 – Estocagem do material tipo cinza de acordo com a distribuição granulométrica.....	36
Figura 16 – Estocagem do material tipo vermelho de acordo com a distribuição granulométrica.....	36
Figura 17 – Amostra preparada para realização do ensaio de granulometria	38
Figura 18 – Jogo de peneiras utilizado nos ensaios.....	40
Figura 19 – Cilindro preparado para os ensaios de permeabilidade e resistência a compressão.....	41
Figura 20 – Preparo das amostras no permeâmetro.....	42
Figura 21 – Realização do ensaio de permeabilidade com carga constante.	43
Figura 22 – Detalhe do controle de percolação de água na amostra.....	44
Figura 23 – Ensaio de compressão.....	45
Figura 24 – Esquema do ensaio com lixiviado.....	47

Figura 25 – Aparato de ensaio.....	50
Figura 26 – Bomba utilizada para transferência do lixiviado do reservatório inferior para o superior.....	50
Figura 27 – Detalhe do grupo de registros para a coleta de efluentes dos reservatórios intermediários.....	51
Figura 28 – Abastecimento do reservatório superior com lixiviado.....	51
Figura 29 – Amostra 1V: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	52
Figura 30 – Amostra 2V: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada.....	53
Figura 31 – Amostra 1C: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão.....	53
Figura 32 – Amostra 2C: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão.....	54
Figura 33 – Amostra 1B: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão.....	54
Figura 34 – Amostra 2B: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão.....	55
Figura 35 – Comparação das curvas de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão, para as amostras com denominação 1..	55
Figura 36 – Comparação das curvas de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão, para as amostras com denominação 2..	56
Figura 37 – Amostra 1V: Curva tensão versus deformação determinada no ensaio de compressão confinada.....	57
Figura 38 – Amostra 2V: Curva tensão versus deformação determinada no ensaio de compressão confinada.....	58
Figura 39 – Amostra 1C: Curva tensão versus deformação determinada no ensaio de compressão confinada.....	58
Figura 40 – Amostra 2C: Curva tensão versus deformação determinada no ensaio de compressão confinada.....	59
Figura 41 – Amostra 1B: Curva tensão versus deformação determinada no	59

ensaio de compressão confinada.....	
Figura 42 – Amostra 2B: Curva tensão versus deformação determinada no ensaio de compressão confinada.....	60
Figura 43 – Amostra após o ensaio de compressão.....	62
Figura 44 – Amostra 1V: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	63
Figura 45 – Amostra 2V: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	63
Figura 46 – Amostra 1C: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada.....	64
Figura 47 – Amostra 2C: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão.....	64
Figura 48 – Amostra 1B: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão.....	65
Figura 49 – Amostra 2B: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão.....	65
Figura 50 – Amostra 1V: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada.....	66
Figura 51 – Amostra 2V: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada.....	66
Figura 52 – Amostra 1C: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada.....	67
Figura 53 – Amostra 2C: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada.....	67
Figura 54 – Amostra 1B: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada.....	68
Figura 55 – Amostra 2B: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada.....	68
Figura 56 – Amostra 1V: Variação da vazão de lixiviado ao longo do tempo	70
Figura 57 – Amostra 2V: Variação da vazão de lixiviado ao longo do tempo	71
Figura 58 – Amostra 1C: Variação da vazão de lixiviado ao longo do tempo	71

Figura 59 – Amostra 2C: Variação da vazão de lixiviado ao longo do tempo	72
Figura 60 – Vazões medidas, suas médias e desvio padrão, e um ajuste linear aos valores medidos de maneira a fornecer uma idéia da tendência à colmatção do material drenante. (a) Amostra 1V; (b) Amostra 2V; (c) Amostra 1C; (d) Amostra 2C.....	72

RESUMO

BRANDÃO, Filipe Feijoli, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2011. **Caracterização de resíduos sólidos da construção civil para sua utilização em camadas drenantes de aterros sanitários.** Orientadora: Izabel Christina D Almeida Duarte de Azevedo. Coorientadores: Maria Eugênia Gimenez Boscov, Eduardo Antônio Gomes Marques e Ann Honor Mounteer.

O intenso crescimento populacional traz consigo uma preocupação ambiental, já que, diante da necessidade de exploração dos recursos naturais, a adoção de políticas de reciclagem faz-se fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável. Diante disso, neste trabalho procurou-se definir uma nova aplicação para os Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). Foram definidas duas distribuições granulométricas facilmente desenvolvidas em campo com duas amostras distintas de materiais reciclados, uma de resíduos oriundos, basicamente, de concreto e outra de resíduos oriundos, basicamente, de cerâmica. Foram caracterizadas suas propriedades geotécnicas como materiais de construção e verificados seus desempenhos como elementos de camadas drenantes, principalmente em aterros de resíduos sólidos. Visando expor os materiais às condições reais de uso foram realizados ensaios de permeabilidade vertical, compressão confinada em uma prensa hidráulica, distribuição granulométrica (antes e após o ensaio de compressão confinada) e avaliação de colmatação com lixiviado de um aterro sanitário existente. Os resultados obtidos demonstraram que os RCD-R oriundos de concreto são cerca de 80% menos deformáveis que os de cerâmica, indicando que seu uso em sistemas de drenagem é mais adequado, sob este aspecto. Entre amostras de mesmo tipo, a variação do módulo de deformabilidade em função da distribuição granulométrica foi de 32% para o resíduo de cerâmica e 28% para o resíduo de concreto, indicando que a deformabilidade dos resíduos oriundos de concreto é menos influenciada pela distribuição granulométrica. Foi observado que todas as amostras ensaiadas apresentarem uma quebra dos grãos, verificada nos ensaios

de distribuição granulométrica feitos antes e depois do ensaio de compressão confinada. No ensaio com lixiviado não se pode constatar que houve colmatação no período avaliado, mas recomenda-se a continuação do ensaio para que se tenham resultados mais conclusivos.

ABSTRACT

BRANDÃO, Filipe Feijoli, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, November 2011. **Characterization of construction waste for use as drainage materials in sanitary landfills.** Adviser: Izabel Christina D Almeida Duarte de Azevedo. Co-Advisers: Maria Eugênia Gimenez Boscov, Eduardo Antônio Gomes Marques and Ann Honor Munteer.

Intense population growth brings with it environmental concerns, since exploitation of natural resources, makes it essential to adopt recycling policies in order to achieve sustainable development. Therefore, this study sought to define a new application for recycling construction and demolition waste (CDW-R). Two size distributions that could be readily prepared in the field were defined for two different samples of recycled waste materials, one basically concrete and other basically ceramic. Tests were performed to simulate conditions of actual use of the materials in the field, and included vertical permeability, confined compression in a hydraulic press, particle size distribution (before and after the confined compression test) and evaluation of clogging by leachate from an existing landfill. The results showed that the CDW-R from concrete are about 80% less deformable than ceramic, indicating that their use in drainage systems is more suitable in this respect. Between samples of the same type, the variation of the modulus of deformability as a function of particle size distribution was 32% for the ceramic waste and 28% for concrete residue, indicating that the deformability of the waste from concrete is less influenced by particle size distribution. It was observed that All samples tested presented a decrease in particle size distribution after the confined compression test. In the leaching test can not be found that there was No clogging by leachate was observed during the evaluation period, but this study should be continued to produce more conclusive results.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) produzida atualmente no Brasil está diretamente relacionada ao desenvolvimento e ao crescimento do país. De acordo com Ulsen (2006), essa parcela chega a atingir 60% da massa total de resíduos sólidos urbanos, com geração per capita em torno de 500 kg/(hab.ano).

Em função dos grandes volumes gerados e da disposição inadequada desses resíduos, muitas vezes em áreas urbanas, encostas e leitos de rios, é importante que sejam encontradas alternativas para o uso desse material, diminuindo, assim, o consumo de bens minerais não renováveis, minimizando danos ao meio ambiente e gastos desnecessários com transporte e sua disposição em aterros.

Em julho de 2002, foi publicada no Diário Oficial da União a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. De acordo com esta resolução, os geradores são responsáveis pela redução, reutilização e reciclagem dos resíduos das atividades de construção, reforma, reparo e demolição de estruturas e estradas, devendo ter, como prioridade, a não geração de resíduos (CONAMA, 2002).

1.2 Justificativa e objetivo

Assim como a reciclagem de vidro, plástico, alumínio e papel tem se intensificado, a reciclagem de resíduos de construção e demolição é imprescindível dentro de um contexto de resgate do meio ambiente. Desse modo, surge uma perspectiva interessante com a possibilidade de se utilizar RCD reciclados (RCD-R) em substituição à brita convencional em camadas drenantes nas mais diversas aplicações da engenharia como, por exemplo:

- Em células de aterros sanitários;
- Em camadas capazes de reter água, em situações de chuvas de grande intensidade. A alta porosidade dos RCDs de faixas

granulométricas maiores (agregados N° 2, 3 e 4) poderia torná-los uma boa opção em áreas onde, historicamente, é difícil o escoamento de grandes volumes de água;

- Elementos de dreno em trincheiras e valas para conduzir o fluxo de águas pluviais em grandes áreas e/ou drenagem em áreas alagadas;
- Como elemento substitutivo em estacas de brita para acelerar recalques e melhorar a capacidade de carga em depósitos de solos moles;
- Como elemento de base filtrante em estações de tratamento de água e esgoto.

Este trabalho tem como objetivo principal investigar o potencial de utilização de RCD reciclados como material drenante, em substituição ao material natural, para uso em aterros de resíduos sólidos. Foram realizados ensaios de permeabilidade vertical, de compressão confinada, distribuição granulométrica (antes e após o ensaio de compressão confinada) e a avaliação da colmatção dos RCD pelo lixiviado de um aterro sanitário existente, em amostras com distribuições granulométricas pré-determinadas, facilmente desenvolvidas na prática de campo.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação foi dividida em 6 capítulos, incluindo este de introdução.

O Capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica dos assuntos abordados na dissertação. Apresentam-se alguns conceitos sobre os resíduos de construção e demolição (RCD), usinas de reciclagem de RCD, sistemas de drenagem de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) e sobre o lixiviado gerado nos aterros de RSU.

No Capítulo 3, descrevem-se a metodologia utilizada, os equipamentos e os ensaios realizados.

No Capítulo 4, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios.

No Capítulo 5, são apresentadas conclusões gerais sobre o trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

No Capítulo 6, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas.

No Anexo A, estão apresentados os resultados dos ensaios de distribuição granulométrica, anteriores ao ensaio de compressão confinada para as amostras ensaiadas.

No Anexo B, apresentam-se os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C.

No Anexo C, constam os resultados dos ensaios de compressão confinada, incluindo o módulo de compressibilidade secante determinado em cada leitura.

No Anexo D estão apresentados os resultados dos ensaios de distribuição granulométrica, posterior ao ensaio de compressão confinada para as amostras ensaiadas.

No Anexo E apresentam-se os resultados das leituras e o cálculo da vazão nas amostras 1V, 2V, 1C e 2C, obtidos no ensaio de colmatção dos RCD pelo lixiviado.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)

2.1.1 Definição de RCD

A Resolução CONAMA Nº 307 (CONAMA, 2002) define o termo Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como sendo materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e escavação de terrenos, como: tijolos e blocos cerâmicos, peças de concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras naturais e reconstituídas, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

2.1.2 – Geração de RCD

A indústria da construção no Brasil possui características ainda artesanais, o que contribui para uma elevada geração de resíduos. Pode-se considerar que os RCD são gerados em três etapas: durante a construção, a manutenção e a demolição.

No Brasil, os RCD têm diferentes origens, mas destaca-se a grande quantidade de resíduos gerada em reformas, ampliações e demolições, conforme a Figura 1 (Pinto e González, 2005, p. 16)

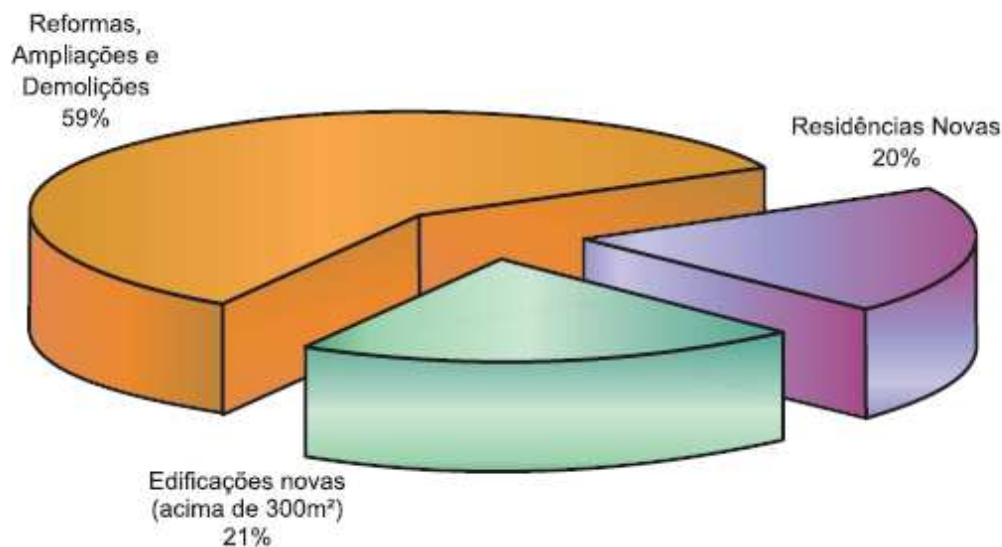


Figura 1 – Origem do RCD no Brasil (% da massa total)

Em alguns municípios brasileiros, mais de 75% dos RCD são provenientes de construções informais (obras não licenciadas), enquanto que de 15% a 30% são oriundos de obras formais (licenciadas pelo poder público) (PINTO, 2005).

2.1.3 Composição do RCD

O canteiro de obras é caracterizado por ser um ambiente dinâmico, sujeito a constantes modificações devido ao cronograma de execução dos serviços e pelas diversas tecnologias utilizadas. Estes fatores contribuem para que os RCD apresentem uma composição marcada por alta heterogeneidade.

Aspectos como o nível de desenvolvimento técnico da indústria da construção local; qualidade e treinamento da mão-de-obra disponível; técnicas de construção e demolição empregadas; programas de qualidade e redução de perdas utilizadas; processos de reciclagem e reutilização adotados no canteiro de obras; disponibilidade e predominância de materiais na região; desenvolvimento econômico do local; demanda de novas construções podem, também, interferir na quantidade, composição e características dos RCD (OLIVEIRA et al., 2004). Dessa forma, a composição dos RCD está diretamente relacionada à região em que esses resíduos são gerados.

Na Figura 2 encontra-se um gráfico, com a distribuição da composição dos RCD na cidade de Recife, PE (SOUZA et al., 2004).

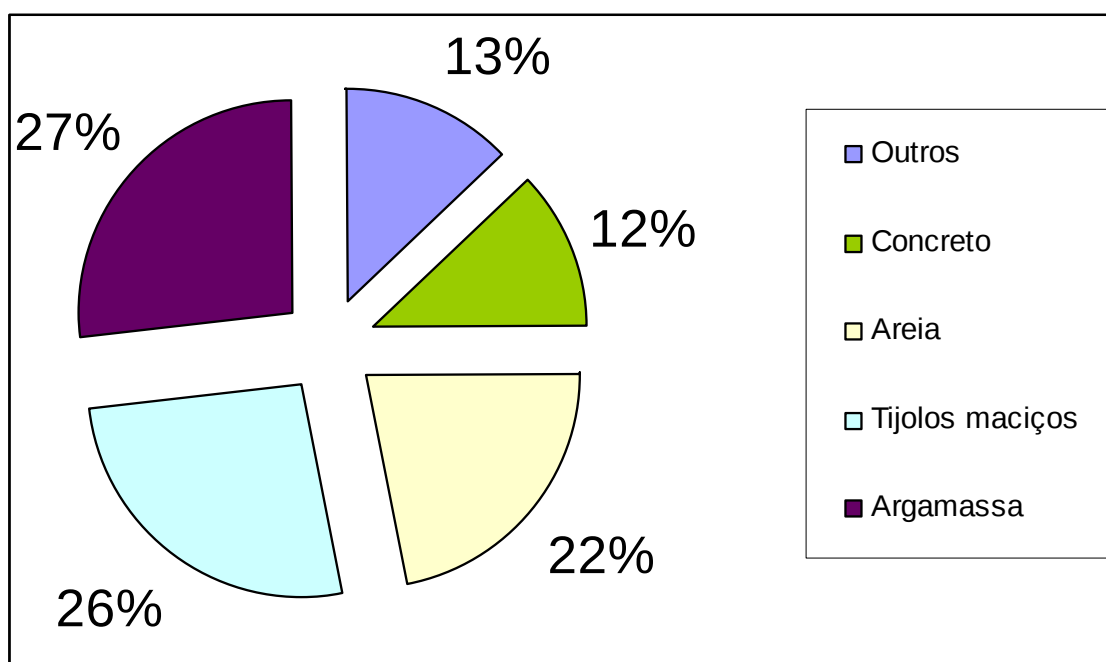


Figura 2 – Distribuição da composição dos RCD em Recife, PE (SOUZA et al., 2004)

2.1.4 Classificação dos RCD para reciclagem como agregado

De acordo com a Resolução N° 307/2002 do CONAMA, os resíduos de construção civil e de demolição são classificados em quatro tipos, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos resíduos conforme Resolução CONAMA n° 307/2002.

Classificação	Tipologia
Classe A	São resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos proveniente de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos, etc), argamassas e concreto; c) de

	processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios, etc.) produzido nos canteiros de obras;
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, etc;
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
Classe D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: amianto, tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Fonte: Resolução N° 307/2002 do CONAMA

Segundo Angulo et al. (2005), apesar de sua grande variabilidade, os RCD de Classe A (compostos por rochas, solos, cerâmicas, concretos, argamassas, etc. sendo todos os materiais de origem mineral) representam cerca de 90% da massa dos RCD no Brasil (BRITO, 1998), na Europa (EC, 2000) e em alguns países asiáticos (HUANG et al., 2002).

A norma brasileira ABNT NBR15116/2004 também recomenda a classificação da fração mineral em resíduos de concreto e misto. Entretanto, é prática comum a classificação dos RCD em duas classes segundo a cor predominante:

- Tipo I ou cinza: componentes de construção de natureza cimentícia, que incluem concretos e argamassas;
- Tipo II ou vermelho: componentes de construção de natureza cerâmica, principalmente cerâmica vermelha.

A classificação dos RCD é realizada em etapa anterior à britagem (a etapa de britagem está descrita posteriormente, no item relacionado a usina de reciclagem), de modo que sejam processados separadamente segundo o

mesmo procedimento. A Figura 3 mostra a diferença visual entre os dois resíduos.



Figura 3 – Separação dos RCD por tipo: (a) Tipo II; (b) Tipo I.

2.1.5 Gerenciamento e Reciclagem dos RCD

Os RCD possuem baixo potencial para causar danos ao meio ambiente, mas o impacto associado a eles está relacionado ao grande volume gerado e à ausência de gestão adequada.

A ausência de uma política de disposição adequada do resíduo resulta em áreas conhecidas como “bota-fora” e aterros clandestinos, provocando o assoreamento de córregos, entupimento de bueiros e galerias, degradação das áreas urbanas (PINTO, 1999; GAVILAN; BERNOLD, 1994; ZORDAN, 1997) e proliferação de animais peçonhentos e roedores (PINTO, 1999) afetando a saúde da população circunvizinha.

Nas Tabelas 2 e 3, apresentam-se os municípios brasileiros com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, classificados quanto à existência e tipo de processamento dos resíduos, e por forma de disposição dos resíduos no solo, respectivamente, de acordo com o censo realizado pelo IBGE (2008).

Tabela 2 – Municípios brasileiros com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição e classificados quanto à existência e tipo de processamento dos resíduos, de acordo com as Grandes Regiões e as Unidades da Federação (IBGE, 2008)

Grandes regiões e Unidades da Federação	Municípios							
	Total	Com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição						
		Total	Existência e tipo de processamento dos resíduos					
			Total	Triagem simples dos resíduos de construção e demolição reaproveitáveis (classe A e B)	Triagem e trituração simples dos resíduos classe A	Triagem e trituração dos resíduos classe A, com classificação granulométrica dos agregados reciclados	Reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos	Outro
Brasil	5564	4031	392	124	14	20	79	204
Norte	449	293	29	5	-	-	6	18
Rondônia	52	28	9	-	-	-	3	6
Acre	22	6	-	-	-	-	-	-
Amazonas	62	39	6	3	-	-	2	1
Roraima	15	1	1	-	-	-	1	-

Pará	143	117	12	2	-	-	-	10
Amapá	16	4	-	-	-	-	-	-
Tocantins	139	98	1	-	-	-	-	1
Nordeste	1793	1454	178	38	4	6	32	118
Maranhão	217	139	6	3	2	1	-	3
Piauí	223	121	1	-	-	-	-	1
Ceará	184	167	31	2	-	1	2	28
Rio Grande do Norte	167	141	42	4	-	-	3	38
Paraíba	223	189	6	4	1	1	1	3
Pernambuco	185	157	23	5	-	1	5	12
Alagoas	102	87	22	9	1	2	10	6
Sergipe	75	69	5	-	-	-	-	5
Bahia	417	384	42	11	-	-	11	22
Sudeste	1668	1272	109	50	7	12	25	38
Minas Gerais	853	682	45	15	2	2	11	19
Espírito Santo	78	60	3	2	-	-	-	1
Rio de Janeiro	92	64	9	6	1	-	1	1
São Paulo	645	466	52	27	4	10	13	17
Sul	1188	639	54	24	3	2	14	16
Paraná	399	272	22	10	-	1	6	6
Santa Catarina	293	111	11	4	3	1	2	4

Rio Grande do Sul	496	256	21	10	-	-	6	6
Centro-Oeste	466	373	22	7	-	-	2	14
Mato Grosso do Sul	78	60	10	1	-	-	-	10
Mato Grosso	141	80	5	1	-	-	2	2
Goiás	246	232	6	4	-	-	-	2
Distrito Federal	1	1	1	1	-	-	-	-
Nota: O município pode apresentar mais de um tipo de processamento dos resíduos de construção e demolição								

Tabela 3 – Municípios brasileiros com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição e classificados quanto à forma de disposição dos resíduos no solo, de acordo com as Grandes Regiões e as Unidades da Federação (IBGE, 2008)

Grandes regiões e Unidades da Federação	Municípios									
	Total	Com serviço de manejo dos resíduos de construção e demolição								
		Total	Forma de disposição no solo							
			Disposição em vazadouro, em conjunto com os demais resíduos	Disposição/ utilização sob controle em aterro convencional, em conjunto com os demais resíduos	Disposição sob controle, em pátio ou galpão de estocagem da prefeitura, específico para resíduos especiais	Disposição transitória sob controle, em aterro da prefeitura específico para resíduos especiais	Disposição transitória sob controle, em aterro de terceiros específico para resíduos especiais	Utilização definitiva e sob controle dos resíduos como material de aterro, pela prefeitura, após triagem e remoção dos resíduos classes B, C e D	Utilização definitiva e sob controle dos resíduos como material de aterro, por terceiros, após triagem e remoção dos resíduos classes B, C e D	Outra
Brasil	5564	4031	1330	442	176	267	181	503	292	1235
Norte	449	293	148	27	5	13	11	16	12	71
Rondônia	52	28	7	5	3	-	-	-	-	7
Acre	22	6	5	-	-	-	-	-	-	1

Amazonas	62	39	11	3	-	2	3	6	4	12
Roraima	15	1	-	-	-	-	-	-	-	1
Pará	143	117	61	5	2	5	4	9	8	36
Amapá	16	4	4	-	-	-	-	-	-	-
Tocantins	139	98	60	14	-	6	4	1	-	14
Nordeste	1793	1454	744	92	21	46	56	143	114	391
Maranhão	217	139	114	3	2	1	2	2	4	22
Piauí	223	121	99	2	-	2	-	-	2	21
Ceará	184	167	50	8	-	8	15	24	27	43
Rio Grande do Norte	167	141	65	6	3	4	5	36	6	31
Paraíba	223	189	77	4	1	2	2	7	1	108
Pernambuco	185	157	52	14	1	5	4	22	19	52
Alagoas	102	87	46	10	6	4	7	10	6	13
Sergipe	75	69	34	3	-	2	4	10	10	12
Bahia	417	384	207	42	8	18	17	32	39	89
Sudeste	1668	1272	207	202	105	126	65	220	97	391
Minas Gerais	853	682	153	127	32	49	22	130	64	172
Espírito Santo	78	60	6	8	1	-	5	19	7	22
Rio de Janeiro	92	64	16	9	3	8	4	11	3	19
São Paulo	645	466	32	58	69	69	34	60	23	178

Sul	1188	639	77	74	33	37	37	73	51	284
Paraná	399	272	46	29	25	19	19	19	9	114
Santa Catarina	293	111	8	10	4	4	8	6	12	65
Rio Grande do Sul	496	256	23	35	4	14	10	48	30	105
Centro-Oeste	466	373	154	47	12	45	12	51	18	98
Mato Grosso do Sul	78	60	11	3	5	25	1	14	-	10
Mato Grosso	141	80	41	16	5	11	3	4	4	2
Goiás	246	232	101	27	2	8	8	33	14	85
Distrito Federal	1	1	1	1	-	1	-	-	-	1
Nota: O município pode apresentar mais de um tipo de processamento dos resíduos de construção e demolição										

A disposição de RCD em aterros sanitários, no Brasil, foi proibida pela Resolução Nº 307/2002 do CONAMA como forma de estimular a reciclagem, mas continua ocorrendo em função, essencialmente, dos custos de transporte (SYMONDS, 1999; PINTO, 1999; HENDRIKS, 2000). Segundo Ângulo e John (2002a), componentes orgânicos (plásticos, tintas, óleos, asfaltos e madeiras), amianto e algumas substâncias inorgânicas (como manganês) presentes nos RCD devem ser triados, pois podem vir a contaminar o solo, bem como sofrer eventual lixiviação e atingir o lençol freático (PENG et al., 1997).

A partir da publicação da resolução CONAMA N. 307/2002, que estabelece que os geradores de resíduos são responsáveis pelo destino final dos mesmos, as construtoras, principalmente as de maior porte, aumentaram o investimento na redução das perdas durante a construção e no reaproveitamento do resíduo gerado (Barbosa et al., 2008).

A reciclagem dos RCD na construção civil pode trazer diversos 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 conseqüências negativas, como enchentes e assoreamento de rios e córregos; além de preservação das reservas naturais de matéria-prima.

A forma mais difundida de tratamento dos RCD consiste na segregação da fração mineral, que é triturada até a granulometria desejada e que pode ser utilizada na própria indústria da construção civil, como em pavimentos e na construção de acessos e ruas.

Uma das alternativas é o uso do agregado miúdo reciclado de RCD, em substituição do agregado miúdo natural, pó-de-pedra, em estacas de compactação para melhoramento de solos. De acordo com Gusmão (2005), a técnica de estacas de compactação vem sendo utilizada com sucesso na cidade de Recife, PE, desde a década de 70.

Silva et al. (2008) utilizaram a fração menor que 4,8 mm de resíduo de concreto beneficiado em substituição ao pó-de-pedra, em ensaios de caracterização, compactação e resistência ao cisalhamento direto. Os autores verificaram que, do ponto de vista técnico, é viável a utilização de RCD reciclado como agregado no preenchimento de estacas de compactação para melhoramento de solo em obras de fundação.

Outra possibilidade é o aproveitamento dos resíduos de concreto na confecção de tijolos prensados de solo-cimento. O uso do solo-cimento na construção de habitações populares permite grande economia, com redução de custos que pode atingir até 40% de uma construção convencional. Contribui para isso o baixo custo do solo, que é o material usado em maior quantidade, além de redução de custos com transporte e energia, existindo ainda a possibilidade de redução de custos com mão-de-obra, pois o processo não requer, em grande número, profissionais especializados em construção (ABCP, 1999).

A idéia de misturar resíduos de construção na fabricação de tijolos de solo-cimento surgiu em função da possibilidade de melhorar suas características mecânicas, uma vez que as características físicas dos resíduos de argamassa e concreto se assemelham às dos pedregulhos (Ferraz e Sengantini, 2004).

Souza et al. (2007) avaliaram a possibilidade de aproveitamento dos resíduos de concreto na confecção de tijolos prensados de solo-cimento. Foram realizados ensaios de caracterização do solo utilizado, das composições desse solo com resíduos de concreto e das misturas de solo-cimento produzidas com essa composição, em diferentes porcentagens. Verificou-se que a adição dos resíduos proporcionou melhoria nas propriedades mecânicas do solo-cimento, além de favorecer a redução do consumo de cimento, mostrando haver possibilidade de se utilizar dosagens com menos de 6% de cimento na confecção dos tijolos.

Em obras de pavimentação, um bom exemplo é o trabalho realizado nas vias internas do campus da USP na Zona Leste de São Paulo. Todo o sistema viário, com mais de 2 km de extensão, foi pavimentado com camadas de agregado reciclado de entulho de obra e revestido com asfalto borracha, tendo sido denominado “pavimento ecológico”. Nessa obra, para maior controle de várias propriedades que permitissem melhor entendimento desse material, nessa obra foram realizados ensaios de medida de deformabilidade no campo que resultaram na conclusão de que os agregados reciclados mostram-se muito similares à brita graduada simples, aconselhando-se seu uso em camadas de subleito ou como sub-base (Bernucci, et al., 2009).

2.2 Usinas de reciclagem

No Brasil, existem aproximadamente 12 usinas de reciclagem da fração mineral de RCD, com escala de produção inferior a 100 t/dia (ÂNGULO et al., 2005). As usinas são geralmente estacionárias e as operações realizadas consistem basicamente, na seleção manual, na cominuição (britagem) e separação granulométrica dos RCD. Algumas possuem separadores magnéticos, transportadores de correia e sistema de abatimento de pó (ANGULO et al., 2002b; ANGULO et al., 2003b).

A Usina de Reciclagem de Estoril, localizada no bairro Estoril, em Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais (Figura 4), com área aproximada de 6.500 m², recebe, em média, 131 t/dia (2.752 t/mês) e processa 122 t/dia (2.550 t/mês) de RCD. A parcela rejeitada na inspeção do material é destinada ao aterro sanitário.



Figura 4 – Vista do pátio de processamento da Usina de Reciclagem de Estoril

Inicialmente, o material que chega à usina é classificado visualmente, de acordo com sua cor, em cinza (Tipo I) ou vermelho (Tipo II). Os dois tipos de RCD são dispostos em áreas distintas (Figuras 6 e 7) e processados separadamente. De acordo com a necessidade, ajusta-se o britador para a granulometria desejada do material reciclado. Na Figura 5 apresentam-se algumas das distribuições granulométricas dos RCD reciclados pela Usina de Estoril.



Figura 5 – Algumas das distribuições granulométricas que podem ser obtidas com o ajuste do britador da Usina de Reciclagem de Estoril



Figura 6 – Pilha de depósito de material tipo vermelho



Figura 7 – Pilha de depósito de material tipo cinza

As operações realizadas na Usina de Estoril, cujas etapas estão apresentadas nas Figuras 8 a 13, consistem: (a) na seleção manual dos RCD, em que são retirados os materiais que não podem ser processados, como plásticos, vidro, metais, etc.; (b) na separação magnética do material metálico, operação realizada antes da britagem por meio de separador magnético de baixa intensidade, localizado na correia transportadora e; (c) na britagem do material, realizada após o ajuste do britador operante na usina para se obter a distribuição granulométrica definida e posterior classificação granulométrica.



Figura 8 – Trabalhadores realizando a seleção manual



Figura 9 – Materiais retirados na etapa de seleção manual



Figura 10 – Vista do britador



Figura 11 – Carregamento do britador



Figura 12 – Vista geral do britador em atividade



Figura 13 – Esteira conduzindo o material britado

2.3 Sistemas de drenagem de aterros de resíduos sólidos

A implantação de um aterro sanitário de RSU envolve uma série de estudos preliminares, que não serão abordados nesta pesquisa.

No Brasil, o projeto de um aterro de RSU deve obedecer às diretrizes especificadas na norma técnica ABNT NBR 8419 de 1996. Entre outros elementos, a obra de um aterro envolve a construção de uma camada de impermeabilização na base das células de resíduos, sistemas de drenagem das águas pluviais, dos lixiviados e dos gases e sistema de tratamento de percolados. Sobre a camada de impermeabilização se constrói uma camada

drenante, para direcionar o lixiviado gerado para os tubos coletores e para o sistema de tratamento.

No dimensionamento da camada drenante e da rede coletora, é importante estabelecer a vazão de lixiviado que será gerada no aterro com base no balanço hídrico. A diferença entre a quantidade de água precipitada e a escoada superficialmente (*run-off*) é o que infiltra no aterro através da camada de cobertura e atinge os resíduos. A soma desse valor com a quantidade de líquido gerado pela decomposição bacteriana dos resíduos menos o valor devido à evapotranspiração fornece a vazão de lixiviado. O valor da vazão vai depender do clima da região onde o aterro está localizado e, conseqüentemente, os sistemas de drenagem devem ser dimensionados para cada situação.

As camadas drenantes, fundamentais para o bom funcionamento do aterro, devem apresentar permeabilidade elevada para coletar e transportar os efluentes gerados, em velocidade maior do que a de produção. Entretanto, um fator importante e que deve ser levado em consideração é a possibilidade de colmatção do sistema ao longo do tempo, que poderá vir a interromper o fluxo de efluentes dando origem a pressões internas na pilha de resíduos.

O sistema interno de drenagem dos aterros de RSU é constituído pelos sistemas de drenagem de gases e de líquidos. Os sistemas de drenagem de lixiviados e de gases são importantes para aliviar as pressões internas na pilha de resíduos, que podem vir a instabilizar o aterro. Além de permitir o controle de saída de gases e dos lixiviados, principais fatores de risco de contaminação da atmosfera (emissões gasosas), da superfície e subsolo (efluentes líquidos), esses sistemas possibilitam também acelerar a estabilização dos recalques do aterro.

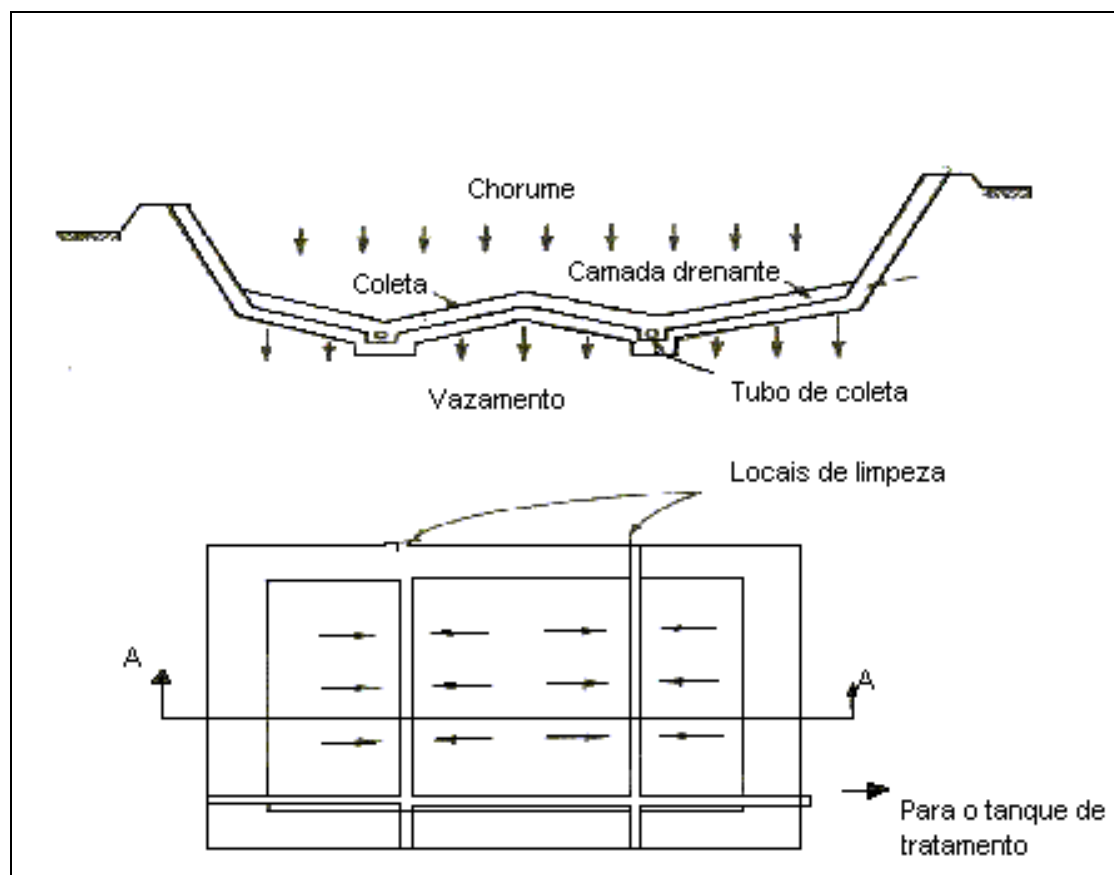
O sistema de drenagem de gases tem a função de drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica resultante do processo de digestão. O material drenante utilizado na vertical tem, em geral, granulometria mais grosseira do que aquele usado na drenagem de líquidos. Estes drenos verticais são orientados desta forma para permitir a difusão dos gases em direção à atmosfera e atravessam o aterro no sentido vertical, do solo até a camada final de cobertura. Lembrando que o sistema de drenagem de gases

também é composto por camadas horizontais de areia que conduzem os gases gerados para os drenos verticais.

O sistema de drenagem de lixiviados tem a função de conduzir todo lixiviado produzido para um local específico, onde ocorre a deposição e o tratamento adequado. Este sistema de drenagem é caracterizado por ser composto de materiais com alta permeabilidade, sendo comum a utilização de uma camada de brita com tubos coletores.

Para o dimensionamento do sistema de drenagem, inicialmente calcula-se a vazão dos lixiviados que percolam pelo sistema, levando em conta a área e a camada do aterro em questão. Após este cálculo se define o sistema de drenagem e calculam-se as dimensões de seus componentes.

Na Figura 14, ilustra-se uma representação típica de um sistema de drenagem de lixiviado.



(Fonte: Afonso, 2005)

Figura 14 – Representação típica de um sistema de drenagem do lixiviado

(Fonte: Afonso, 2005)

A possibilidade de substituir a brita, tradicionalmente empregada na construção dos sistemas internos de drenagem, por agregados graúdos de RCD reciclados poderá se traduzir em opção real aos projetistas, tendo em vista a economia da obra, já que os RCD reciclados representam custos 60% menores (Afonso, 2005). Para isso, entretanto, são necessários ensaios para determinar seu comportamento mecânico e químico.

2.4 Colmatação de sistemas de drenagem

A colmatação consiste na redução da área transversal dos espaços vazios de um determinado meio poroso, disponíveis ao fluido percolante. É um processo que ocorre ao longo do tempo, comprometendo a eficiência do sistema drenante (REMÍGIO, 2006). À medida que os espaços disponíveis diminuem, a capacidade drenante do meio poroso é reduzida.

Segundo PALMEIRA (2003), a queda da capacidade drenante é um fenômeno puramente físico. No entanto, a colmatação do meio poroso pode se dar devido a causas físicas, químicas e microbiológicas, de acordo com o material que está sendo drenado ou filtrado.

2.4.1 Colmatação física

PALMEIRA & GARDONI (2000) descreveram que a falta de compatibilidade entre as dimensões das partículas de solo e a dimensão dos poros do elemento drenante causa a sua colmatação, conduzindo a uma redução da capacidade de descarga do dreno, aumento da poropressão e perda do controle do fluxo pré-estabelecido.

2.4.2 Colmatação química

As reações químicas entre os elementos dissolvidos no fluido percolante, que resultam na formação de precipitados, diminuindo o espaço disponível para a passagem do fluido, podem ser apresentadas como causa para a colmatação química (REMÍGIO, 2006).

2.4.3 Colmatação biológica

A colonização microbiana na camada drenante pode ser apresentada como a causa da colmatação microbiológica. BAVEYE et al. (1998) apresentaram algumas formas sob as quais microrganismos podem provocar a colmatação, como sendo:

- Acúmulo de células microbianas e seus produtos celulares – as células microbianas podem ocupar os espaços vazios por meio de formação de biofilmes ou formando agregados de células;
- Produção de gases – os gases de origem microbiológica promovem a redução do espaço disponível para o fluxo do líquido percolante;
- Acumulação de sais insolúveis de sulfeto – os sulfetos são precipitados que resultam do processo químico de redução do sulfato catalisado pela ação de bactérias sulfato-redutoras. Esses processos são bastante comuns na natureza e ocorrem normalmente em meios anaeróbicos ricos em matéria orgânica;
- Atividade de ferrobactérias – A colmatação provocada pela precipitação de compostos de ferro é resultante do processo de oxidação de íons ferrosos dissolvidos no fluido percolante em função das condições termodinâmicas do meio favorável ao processo.

2.5 Lixiviado

2.5.1 Geração e características do lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos

De acordo com a norma brasileira NBR 8849/1985 (ABNT, 1985), lixiviado é o líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que apresenta cor escura, mau cheiro e elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

Os lixiviados de aterros de resíduos sólidos urbanos são resultado da interação entre o processo de biodegradação da fração orgânica desses

resíduos e da infiltração de águas pluviais que solubilizam componentes orgânicos e inorgânicos. Consequentemente, o fator determinante na vazão de lixiviados de um aterro sanitário é o volume de águas pluviais infiltradas, enquanto o fator determinante das características físicas, químicas e microbiológicas são as características dos resíduos aterrados (PROSAB, 2009).

O lixiviado contém componentes orgânicos e inorgânicos, além de substâncias tóxicas provenientes de resíduos perigosos dispostos nos aterros. Substâncias perigosas presentes na massa de resíduos podem causar danos ambientais se atingirem as águas subsuperficiais, e se emitirem gases voláteis para a atmosfera. Os efeitos danosos podem se estender à comunidade animal e vegetal aquática e aos seres humanos que dela se utilizam (PROSAB, 2009).

2.5.2 Composição

As características físicas, químicas e biológicas do lixiviado dependem do tipo de resíduo aterrado, do grau de decomposição, do clima, da estação do ano, da idade do aterro, da profundidade do resíduo aterrado, do tipo de operação do aterro entre outros fatores. É possível afirmar que a composição do lixiviado pode variar consideravelmente de um local para outro, como também em um mesmo local e entre épocas do ano (REINHART; GROSH, 1998). Acredita-se que o seu potencial poluidor seja inversamente proporcional ao tempo de aterramento, a despeito do fato de que em aterros em operação essa constatação não seja tão evidente (PROSAB, 2009).

A composição do lixiviado é mais diretamente influenciada, contudo, pelas características dos resíduos e sua decomposição. As taxas e características da produção de líquidos e biogás variam ao longo do processo de biodegradação e refletem o processo que acontece no interior do aterro. A duração das etapas de produção do lixiviado e, consequentemente, sua composição, depende das condições físicas, químicas e microbiológicas que se desenvolvem dentro do aterro ao longo do tempo (POHLAND; HARPER, 1986).

O lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos é constituído, basicamente, de uma mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas,

compostos em solução e em estado coloidal e diversas espécies de micro-organismos (ANDRADE, 2002).

Os aterros sanitários mais comuns recebem uma mistura de resíduos domésticos, comerciais e resíduos industriais mistos, mas excluem quantidades significativas de resíduos químicos específicos. Dessa maneira, o lixiviado pode ser caracterizado como uma solução aquosa com quatro grupos de poluentes: material orgânico dissolvido (ácidos graxos voláteis e compostos orgânicos mais refratários como ácidos húmicos e fúlvicos), macro componentes inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), metais pesados (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) e compostos orgânicos xenobióticos originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações (hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, pesticidas, entre outros) (CHRISTENSEN et al., 1994 apud KJELDSEN et al., 2002).

Na Tabela 4 apresentam-se faixas de valores para os componentes do lixiviado em aterros sanitários brasileiros.

Tabela 4 – Variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros

Variável	Faixa máxima	Faixa mais provável	FVMP (%)
pH	5,7 – 8,6	7,2 – 8,6	78
Alcalinidade total (mg L^{-1} de CaCO_3)	750 – 11.400	750 – 7.100	69
Dureza (mg L^{-1} de CaCO_3)	95 – 3.100	95 – 2.100	81
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	2.950 – 2.500	2.950 – 17-660	77
DBO (mg L^{-1} de O_2)	<20 – 30.000	<20 – 8.600	75
DQO (mg L^{-1} de O_2)	190 – 80.000	190 – 22.300	83
Óleos e graxas (mg L^{-1})	10 – 480	10 – 170	63
Fenóis (mg L^{-1} de $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$)	0,9 – 9,9	0,9 – 4,0	58
NTK (mg L^{-1} de N)	80 – 3.100	Não há	-
N-amoniacal (mg L^{-1} de N)	0,4 – 3.000	0,4 – 1.800	72
N-orgânico (mg L^{-1} de N)	5 – 1.200	400 – 1.200	80
N-nitrito (mg L^{-1} de N)	0 – 50	0 – 15	69
N-nitrato (mg L^{-1} de N)	0 – 11	0 – 3,5	69
P-total (mg L^{-1})	0,1 – 40	0,1 – 15	63

Sulfeto (mg L ⁻¹)	0 – 35	0 – 10	78
Sulfato (mg L ⁻¹)	0 – 5.400	0 – 1.800	77
Cloreto (mg L ⁻¹)	500 – 5.200	500 – 3.000	72
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	3.200 – 21.900	3.200 – 14.400	79
Sólidos totais fixos (mg L ⁻¹)	630 – 20.000	630 – 5.000	60
Sólidos totais voláteis (mg L ⁻¹)	2.100 – 14.500	2.100 – 8.300	74
Sólidos suspensos totais (mg L ⁻¹)	5 – 2.800	5 – 700	68
Sólidos suspensos voláteis (mg L ⁻¹)	5 – 530	5 – 200	62
Ferro (mg L ⁻¹)	0,01 – 260	0,01 – 65	67
Manganês (mg L ⁻¹)	0,04 – 2,6	0,04 – 2,0	79
Cobre (mg L ⁻¹)	0,005 – 0,6	0,05 – 0,15	61
Níquel (mg L ⁻¹)	0,03 – 1,1	0,03 – 0,5	89
Cromo (mg L ⁻¹)	0,003 – 0,8	0,003 – 0,5	89
Cádmio (mg L ⁻¹)	0 – 0,26	0 – 0,065	67
Chumbo (mg L ⁻¹)	0,01 – 2,8	0,01 – 0,5	64
Zinco (mg L ⁻¹)	0,01 – 8,0	0,01 – 1,5	70

FVMP – Frequência de ocorrência dos valores mais prováveis

Fonte: SOUTO E POVINELLI (2007)

2.5.3 Caracterização do lixiviado de aterros sanitários

A caracterização de efluentes em geral pode ser realizada em três níveis: identificação individual dos compostos, identificação de classes de compostos e determinação de parâmetros coletivos específicos e não específicos (BARKER; STUCKEY, 1999).

Os parâmetros coletivos não específicos ou convencionais são métodos padronizados na literatura e usualmente empregados na caracterização de efluentes.

Os principais parâmetros físico-químicos utilizados na caracterização convencional do lixiviado são: o potencial hidrogeniônico (pH), a DBO, a DQO, o nitrato, o nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e nitrogênio amoniacal (N-NH₃), série de sólidos, metais pesados (Cd, Ni, Zn, Cu e Pb, principalmente) e outros metais (por exemplo Al e Fe) (PROSAB, 2009).

a) pH

O pH é um parâmetro que retrata o processo de decomposição biológica da matéria orgânica. Em processos de biodegradação anaeróbia, o desenvolvimento dos microorganismos está relacionado diretamente às faixas predominantes de pH. Os ácidos orgânicos voláteis são excelentes indicadores do grau de degradabilidade e do andamento dos processos anaeróbios, pois são gerados na fase acidogênica (aterros jovens) e consumidos na fase metanogênica. O desenvolvimento de arqueas metanogênicas ocorre em faixas de pH entre 6,7 e 7,4 (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993).

b) Matéria orgânica

Os estudos de caracterização da matéria orgânica realizados no Brasil se limitam a determinar a matéria orgânica no efluente, em forma de DQO e DBO (AMARAL, 2007).

A relação DBO/DQO tem sido usada como um indicador do nível de degradação biológica do lixiviado, apesar de suas limitações. Para aterros jovens, os valores da relação DBO/DQO variam entre 0,5 e 0,8, pois uma fração considerável da DQO corresponde a ácidos graxos voláteis; para aterros antigos esses valores caem para a faixa de 0,04 a 0,08, pois a maior parte dos compostos biodegradáveis já foi degradada.

Um dos problemas relacionados à caracterização do lixiviado é a descrição pouco precisa da natureza dessa matéria orgânica. Tão importante quanto saber a carga de matéria orgânica é saber qual a constituição dessa fração no lixiviado, pois ali podem estar presentes substâncias com características tóxicas. Várias substâncias orgânicas, já identificadas no lixiviado, como dodecano, clorofórmio, tetracloreto de carbono, benzeno, tolueno, xileno, fenol, clorofenóis, nitrofenóis, antraceno e diclorometano, entre outros, se destacam por seu comprovado potencial carcinógeno ou co-carcinógeno (SCHWARZENBACK et al., 1993).

c) Nitrogênio

O nitrogênio é constituinte natural de proteínas, clorofila e vários outros compostos biológicos, podendo também ser encontrado em despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e em fertilizantes. O nitrogênio altera-se entre várias formas e estados de oxidação, sendo as de maior interesse, nitrato (NO_3^-), amônia (NH_3) e nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão). O objetivo de se determinar estas formas é que o nitrogênio é um componente de grande importância em termos de geração e controle de poluição das águas, principalmente por ser um elemento indispensável ao crescimento de algas. Em excesso, entretanto, pode levar à eutrofização de lagos e represas.

Associa-se o nitrato à doença conhecida como metahemoglobinemia (síndrome do bebê azul), na atmosfera, nitratos provocam a formação de chuva ácida.

Outro aspecto do nitrogênio é o fato de ser fonte para o crescimento dos microorganismos responsáveis pelo “Tratamento de Esgotos”. Com relação à amônia, pode-se frisar que, quando presente na atmosfera em concentrações superiores a 50 ppm, forte odor é produzido.

O conhecimento da concentração de nitratos e de outras formas do nitrogênio permite avaliar o grau de oxidação em rios e estuários e os níveis de purificação obtidos em processos biológicos de tratamento (PROSAB, 2009).

d) Sólidos

Todos os contaminantes da água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a concentração de sólidos. A presença de sólidos suspensos nas águas leva a um aumento da turbidez, influenciando diretamente na entrada de luz e diminuindo o valor de saturação do oxigênio dissolvido.

O termo sólidos sedimentáveis é aplicado aos sólidos em suspensão que sedimentam, sob condições específicas, em razão da influência da gravidade. A distinção entre sólidos dissolvidos e suspensos refere-se ao tamanho das partículas e sua capacidade de passar por um papel filtro de abertura específica ($< 2 \mu\text{m}$). Ao se submeter os sólidos a uma temperatura

elevada (550 ± 50 °C) a fração orgânica é volatilizada, permanecendo após a combustão apenas a fração inorgânica. Portanto, os sólidos voláteis representam uma estimativa da matéria orgânica nos sólidos, ao passo que os sólidos não voláteis (fixos) representam a matéria inorgânica ou mineral (MORAVIA, 2007).

e) Metais

Os diversos tipos de embalagens (ferrosas ou não) dispostas pós-uso em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos são a principal fonte de metais encontrados nos lixiviados. Outra fonte eventual dessas substâncias é o material utilizado na cobertura dos RSU.

A concentração de metais, como Fe, Mn, Zn, Cu, Pb e Cd pode ser elevada em aterros jovens, devido ao ambiente ácido que permite a solubilização dos íons metálicos. Com o passar do tempo, o pH tende a aumentar e essas concentrações tendem a diminuir.

3 – METODOLOGIA

3.1 Coleta e estocagem

O material usado nos ensaios foi coletado no pátio da Estação de Reciclagem de Entulho, no bairro Estoril, em Belo Horizonte, MG, administrada pela Prefeitura Municipal.

Os resíduos coletados foram transportados em tambores até o Laboratório de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Viçosa, onde foram armazenados em baias ao ar livre (nas mesmas condições de estocagem a que estão submetidos na Estação de Reciclagem), divididos por tipo, cinza e vermelho, e por granulometria. A separação granulométrica foi realizada por meio de peneiras com aberturas de 4,8 mm, 12,5 mm, 25 mm, 50 mm e 75 mm para se obter, segundo os critérios de ensaio, dimensões correspondentes às das britas 1, 2, 3 e 4, conforme preconizava a NBR 7211 (a separação em brita 1, 2, 3 e 4 ainda é a mais utilizada atualmente).

Para se ter um parâmetro de comparação entre o comportamento, após a introdução de uma camada de aterro, do material proposto e o utilizado na prática de campo, foram separadas amostras de brita nas mesmas faixas granulométricas do RCD. As amostras de brita foram utilizadas nos ensaios de distribuição granulométrica e no ensaio de resistência à compressão confinada.



Figura 15 – Estocagem do material tipo cinza de acordo com a distribuição granulométrica

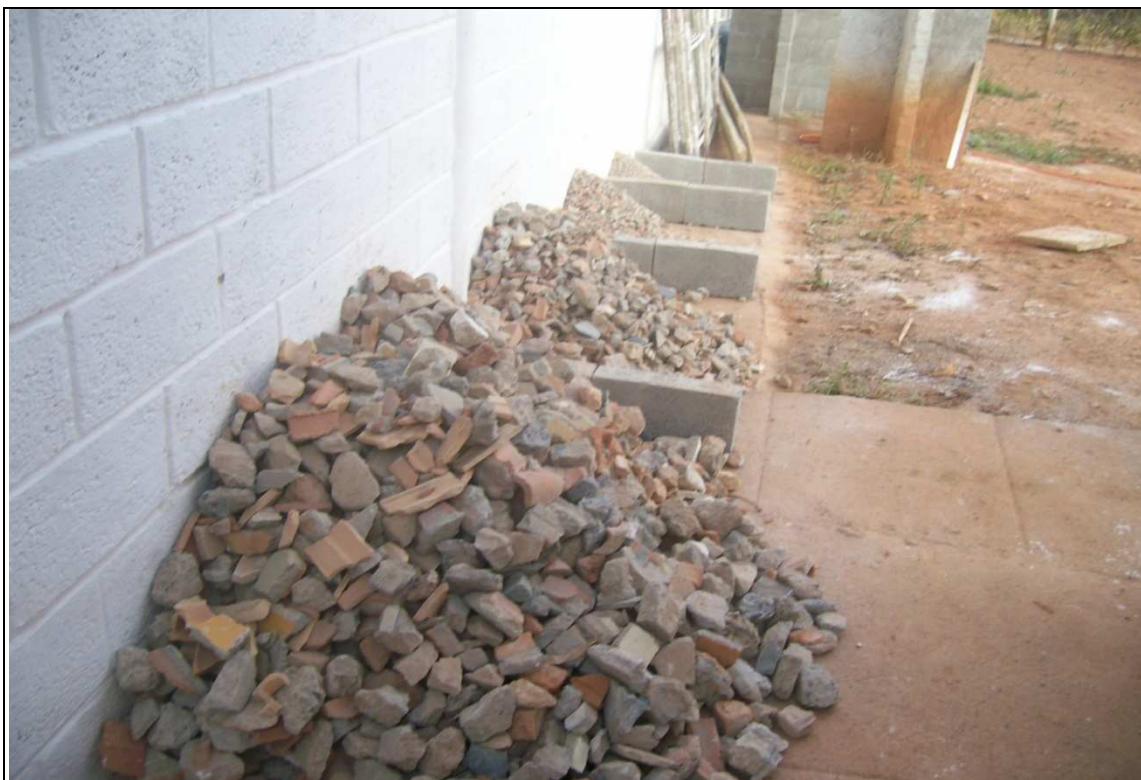


Figura 16 – Estocagem do material tipo vermelho de acordo com a distribuição granulométrica

3.2 Preparação das amostras ensaiadas

Procurou-se estabelecer um critério de preparação das amostras que pudesse ser facilmente reproduzido no campo. Foram definidas, com base no volume, duas amostras para cada tipo de material, conforme resumido na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição e nomenclatura das amostras ensaiadas.

AMOSTRA	MATERIAL	CONSTITUIÇÃO
1V	Vermelho	Material vermelho constituído por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 75 mm e retido na 50 mm; passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm; e passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm
2V	Vermelho	Material vermelho constituído por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm, passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm e passante na peneira 12,5 mm e retido na 4,8 mm
1C	Cinza	Material cinza constituído por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 75 mm e retido na 50 mm, passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm e passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm
2C	Cinza	Material cinza constituído por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras:: passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm, passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm e passante na peneira 12,5 mm e retido na 4,8 mm
1B	Brita	Amostra de brita constituída por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 75 mm e retido na 50 mm, passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm e passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm

2B	Brita	Amostra de brita constituída por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm, passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm e passante na peneira 12,5 mm e retido na 4,8 mm
----	-------	---

C – cinza; V – vermelho; B – brita.

3.3 Ensaio de distribuição granulométrica nas amostras de RCD

Para cada amostra definida no item 3.2, foi realizado um ensaio de distribuição granulométrica, conduzido de acordo com o especificado na norma NBR NM 248/2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.



Figura 17 – Amostra preparada para realização do ensaio de granulometria

Amostras de cada material eram levadas à estufa a 105 ± 5 °C, por 24 horas e, em seguida, era determinada a massa de cada uma à temperatura ambiente.

O peneiramento do material era realizado em peneiras das séries normal e intermediária, encaixadas em ordem crescente de abertura de malha de baixo para cima, com fundo e tampa. O conjunto era montado em um agitador mecânico e pequenas porções de cada amostra, uma por vez, era colocada na peneira do topo e agitada. O material retido em cada peneira era separado em uma bandeja identificada e tinha sua massa medida.



Figura 18 – Jogo de peneiras utilizado nos ensaios

Tomou-se o cuidado de ao retirar o material das peneiras, limpá-las cuidadosamente com um pincel de cerdas macias. O material retirado com o pincel da face superior da malha de cada peneira era somado ao retido, e o da face inferior ao material passante.

Não foi realizada a análise granulométrica do material passante na peneira de abertura de malha igual a 2,38 mm porque este é carregado pelo líquido percolante, não constituindo, desse modo, fração de material importante à estrutura da camada drenante.

3.4 Ensaio de permeabilidade

Um cilindro especial (Figura 19), de diâmetro 15,20 cm e altura 18,00 cm foi confeccionado para funcionar como um permeâmetro, no ensaio de permeabilidade e ser utilizado no ensaio de compressão dos RCD. As dimensões do cilindro atendem às limitações impostas pela prensa utilizada.



Figura 19 – Cilindro preparado para os ensaios de permeabilidade e resistência a compressão

A amostra preparada era colocada no permeâmetro (Figura 20) que era, em seguida, preenchido com água e fechado até completa vedação. A amostra

era, então, saturada, e em seguida, o ensaio de permeabilidade à carga constante era iniciado.



Figura 20 – Preparo da amostra no permeâmetro

Mediam-se a carga hidráulica aplicada e a temperatura ambiente, e realizavam-se quatro leituras de vazão. Um volume de água percolado através do corpo de prova era recolhido num intervalo de tempo conhecido, e calculava-se a massa de água. Esses dados eram inseridos em uma planilha EXCEL que retornava o valor do coeficiente de permeabilidade (k em cm/s) para a temperatura de 20°C.



Figura 21 – Realização do ensaio de permeabilidade com carga constante



Figura 22 – Detalhe do controle de percolação de água na amostra

3.5 Ensaio de compressão confinada

Como os sistemas de drenagem de lixiviados e de gases em aterros sanitários de RSU ficam localizados sob camadas de resíduos, construídas em etapas e cuja altura final pode alcançar dezenas de metros, esse ensaio tem por objetivo avaliar a deformabilidade dos agregados de RCD reciclados para diversos níveis de carregamento.

Desse modo, após a realização do ensaio de permeabilidade, drenava-se a água da amostra, abria-se o permeâmetro e iniciava-se o ensaio de compressão confinada.

Uma tampa superior, que se encaixava perfeitamente no interior do permeâmetro, foi especialmente confeccionada para este ensaio. O conjunto, permeâmetro e tampa superior, era colocado numa prensa manual, normalmente usada para realização de ensaios do tipo *Califórnia Bearing Ratio* (CBR). Nesse momento, zeravam-se os extensômetros usados para medir a deformação no anel dinamométrico e a variação da altura do corpo de prova e o ensaio tinha início. A carga era aplicada à velocidade constante, sendo que a

leitura da variação da altura do corpo de prova era realizada em incrementos pré-estabelecidos da força aplicada, a fim de garantir que no estágio final do ensaio, o carregamento tinha sido aplicado até se obter uma tensão máxima de 475 kPa. Considerando um aterro de resíduos sólidos urbanos em que o valor do peso específico encontre-se na faixa compreendida entre 10 e 19 kN/m³ (SILVEIRA, 2004), pode-se garantir que a carga máxima aplicada reflita a situação real de uma célula de resíduos, com altura mínima de 25 metros (entre 25 e 47 metros).

O módulo de compressibilidade secante para um carregamento axial confinado é o ângulo definido pela secante à curva tensão versus deformação, partindo da origem até o valor da força aplicada (Lambe, 1969). Portanto, para cada incremento de carga aplicado, o valor de módulo de compressibilidade correspondente é determinado por meio da equação:

$$D = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\varepsilon_v}$$



Figura 23 – Ensaio de compressão

3.6 Caracterização do lixiviado utilizado nos ensaios

No sentido de representar o mais próximo possível uma situação real, utilizou-se o lixiviado coletado no Aterro Sanitário de Sabará, MG. Para caracterizar esse material foram realizadas análises em laboratório, como: pH, DBO, DQO, nitrogênio total Kjeldahl (Ntotal), nitrogênio amoniacal (Namoniacal), nitrato, oxigênio dissolvido (OD), sólidos totais (ST), sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, sólidos sedimentáveis, carbono orgânico total (COT) e metais.

As análises foram realizadas no Laboratório de Matéria Orgânica do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, e foram estabelecidas conforme as recomendações apresentadas no capítulo de revisão bibliográfica.

3.7 Avaliação de colmatação dos RCD pelo lixiviado

O ensaio proposto para avaliar a colmatação dos RCD, cujo esquema é apresentado na Figura 24, consistiu na percolação do lixiviado pelos resíduos acondicionados em diferentes reservatórios e na leitura periódica do volume percolado.

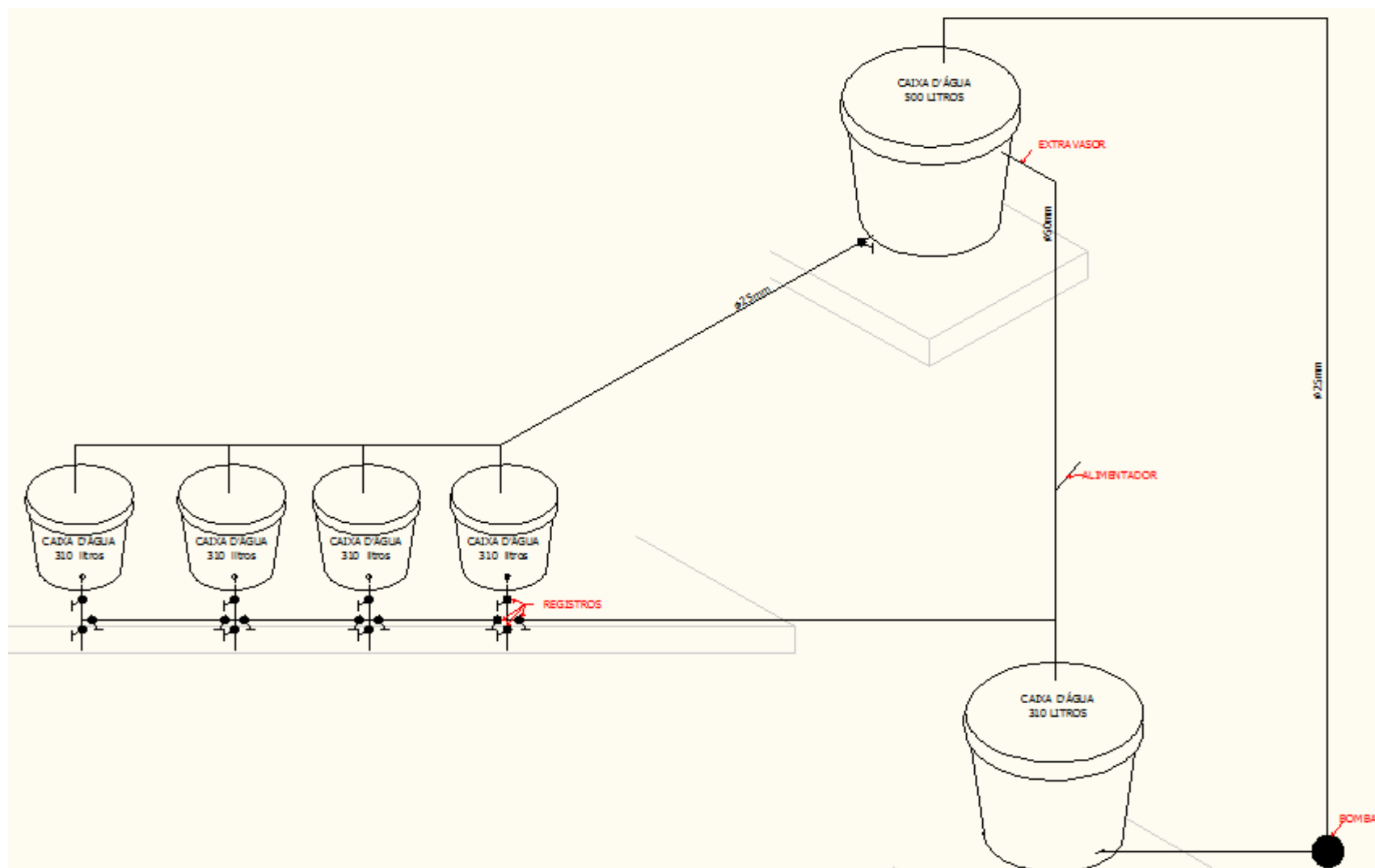


Figura 24 – Esquema do ensaio com lixiviado

No Campo Experimental de Resíduos Sólidos do DEC-UFV, foram instalados seis reservatórios para realização deste ensaio, um superior, um inferior e quatro intermediários. Inicialmente, as amostras de RCD, preparadas conforme a Tabela 5 foram colocadas nos reservatórios intermediários, um tipo de amostra em cada reservatório. Os reservatórios, preenchidos com as amostras de RCD, foram então tampados. Inicialmente houve uma dificuldade para a garantia da vedação dos reservatórios, tendo em vista que foram utilizadas caixas d'água de polietileno que não são projetadas para este tipo de atividade. Uma bomba hidráulica submersa bombeava o lixiviado do reservatório inferior para o superior que, por sua vez, o redistribuía para os quatro intermediários, de modo que a carga hidráulica permanecesse constante ao longo do ensaio.

No topo de cada reservatório intermediário foram instalados tubos abertos para atmosfera, os suspiros, para permitir a atividade biológica no interior de cada reservatório, na tentativa em representar, de forma aproximada, o que ocorre em aterros de resíduos sólidos urbanos.

Nas Figuras 25, 26 e 27, apresentam-se, respectivamente, o aparato montado para o ensaio; a bomba utilizada para a transferência do lixiviado do reservatório inferior para o superior; e um detalhe do grupo de registros para a coleta de efluente dos reservatórios intermediários, estes conjuntos de registros e tubos recebem todo o carregamento devido ao peso do lixiviado que percolam intermitentemente pelos tubos e por isso apresentaram problemas no início, tendo um abaulamento considerável, assim foi necessária a construção de escoras de madeira nos pontos mais críticos, na Figura 25 pode-se notar a presença destas escoras de madeira.

O ensaio teve início com o enchimento do reservatório superior com o lixiviado do Aterro Sanitário de Sabará, MG, ilustrado na Figura 28. Em seguida, permitiu-se o fluxo do lixiviado do reservatório superior para os reservatórios intermediários para que começasse a percolar as amostras de RCD e, então, o reservatório superior foi novamente abastecido com o lixiviado, após este procedimento o lixiviado foi liberado para percolar permanentemente pelo sistema.

O ensaio na amostra de um reservatório era realizado da seguinte maneira:

- Bloqueava-se a entrada de lixiviado nos demais reservatórios intermediários, para permitir vazão máxima na amostra desejada. Para tentar minimizar as perdas de carga devido ao sistema; o nível do reservatório superior era mantido no máximo e o maior possível no reservatório ensaiado;
- Em um recipiente grande, de massa conhecida, despejava-se o efluente extravasado pela torneira de saída do reservatório em questão, em um intervalo de tempo cronometrado;
- Pesava-se o volume de efluente recolhido;
- Determinava-se a vazão de lixiviado que percolou a amostra daquele reservatório. A coleta de efluente e o cálculo da vazão foram realizados em triplicata, em cada data de leitura.

Findo o procedimento de coleta em um reservatório, abriam-se os registros de todos os reservatórios para permitir que a percolação de lixiviado ocorresse normalmente.

A vazão é calculada indiretamente. Conhecido o peso do efluente coletado de dado reservatório e admitindo um peso específico para o lixiviado de $10,04 \text{ kN m}^{-3}$ (MONTEIRO; SANTOS; JUCÁ, 1997), determinava-se o volume de efluente e, a partir daí, com o intervalo de tempo medido, calculava-se a vazão. A diminuição da vazão no reservatório, ao longo do tempo em que foram realizadas as coletas é atribuída à colmatação nos RCD pelo lixiviado.

O ensaio foi iniciado em 07/07/2011, buscando realizar as demais leituras semanalmente.



Figura 25 – Aparato de ensaio



Figura 26 – Bomba utilizada para transferência do lixiviado do reservatório inferior para o superior



Figura 27 – Detalhe do grupo de registros para coleta de efluente dos reservatórios intermediários



Figura 28 – Abastecimento do reservatório superior com lixiviado

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão

Os resultados dos ensaios de granulometria, anteriores ao ensaio de compressão confinada, realizados nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C em termos do percentual retido nas peneiras, do percentual acumulado, bem como as curvas granulométricas encontram-se, respectivamente, no Anexo A e nas Figuras 29, 30, 31 e 32. No Anexo A também estão apresentados os resultados do ensaio de distribuição granulométrica utilizando brita, sendo apresentado o gráfico de cada distribuição nas Figuras 33 e 34.

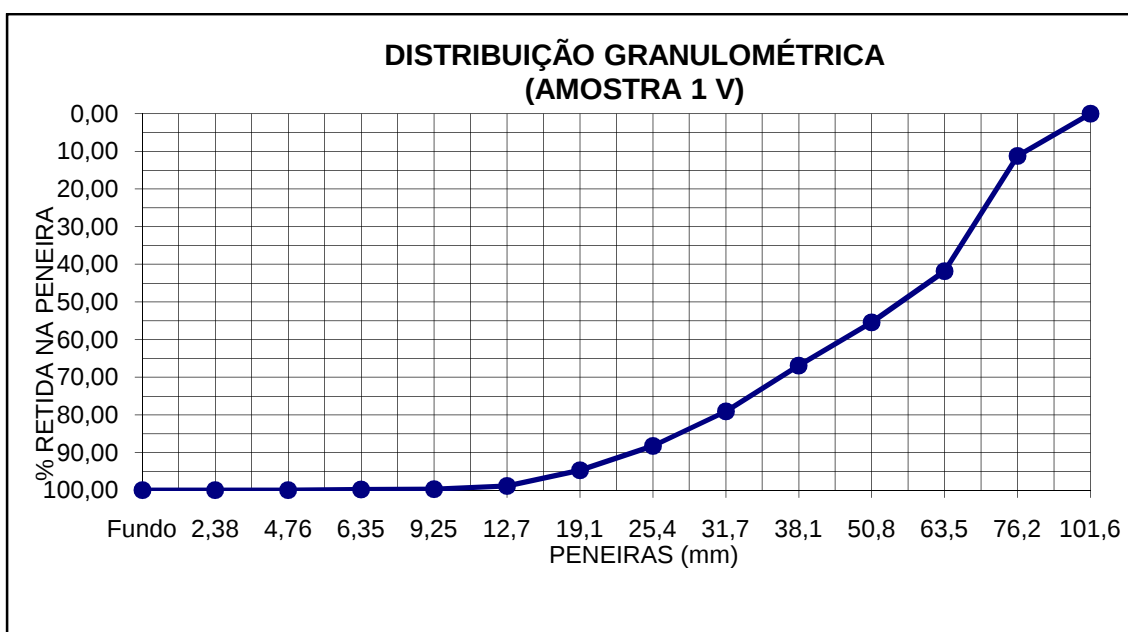


Figura 29 – Amostra 1V: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

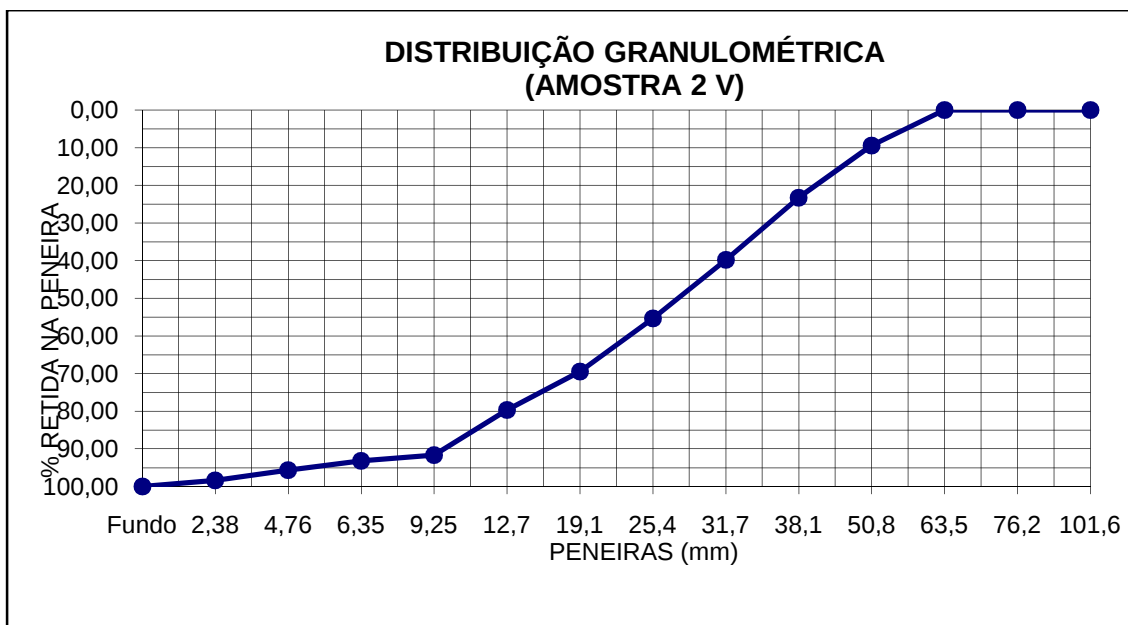


Figura 30 – Amostra 2V: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

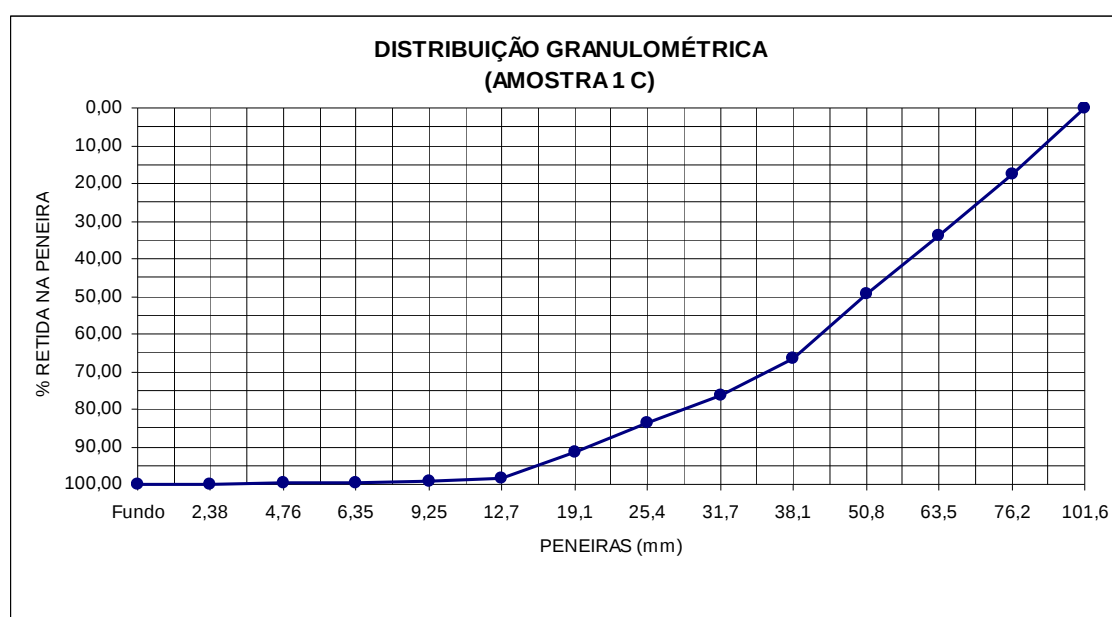


Figura 31 – Amostra 1C: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão

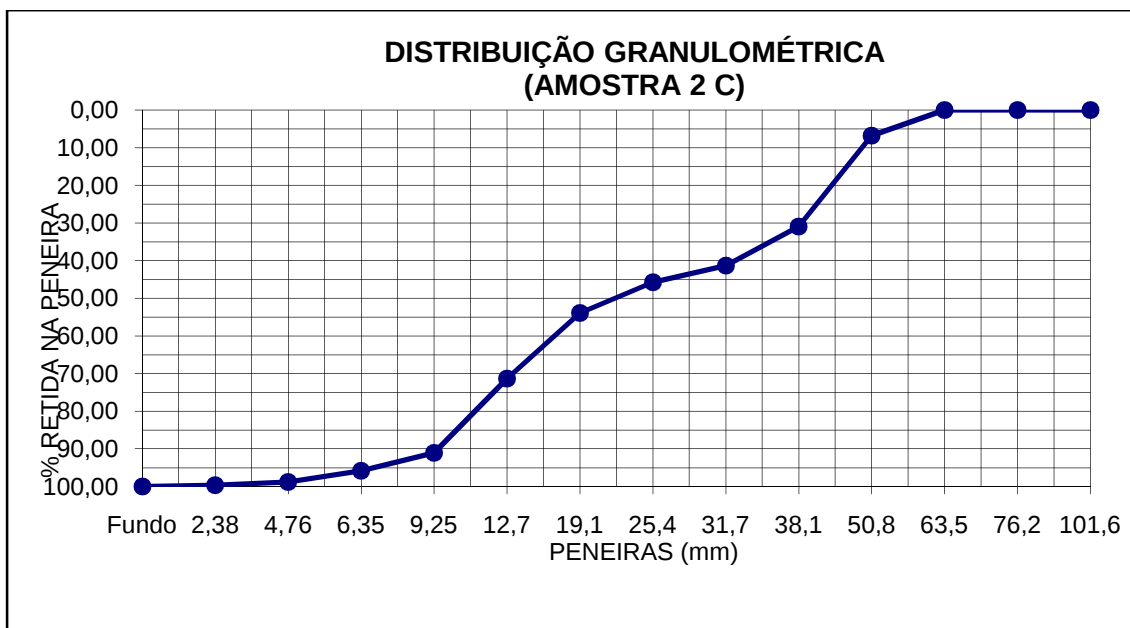


Figura 32 – Amostra 2C: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão

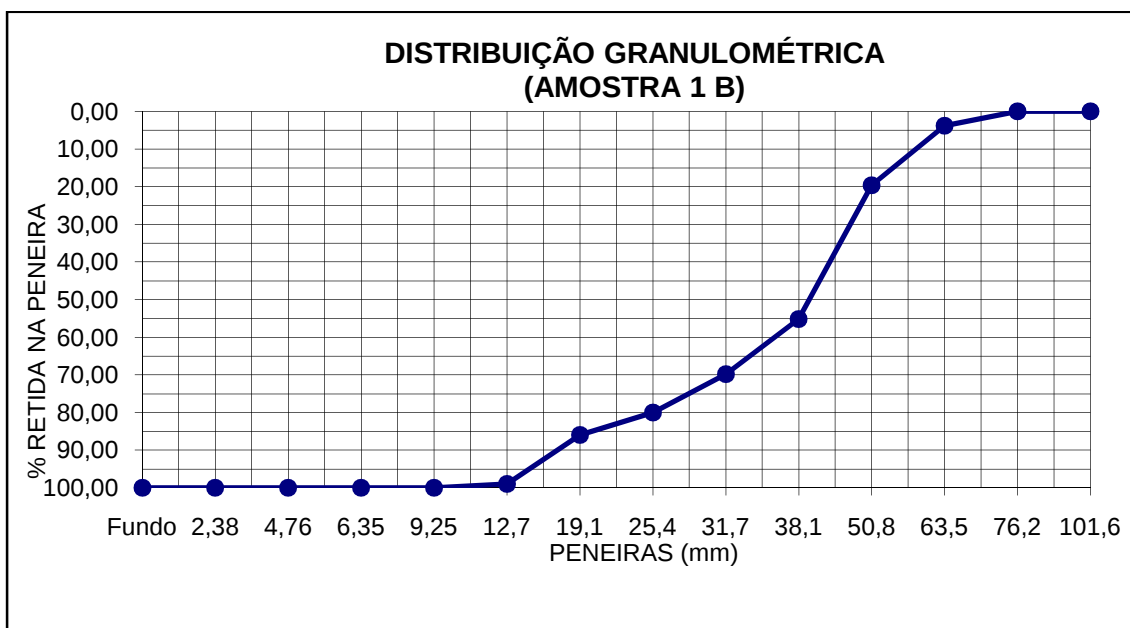


Figura 33 – Amostra 1B: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão

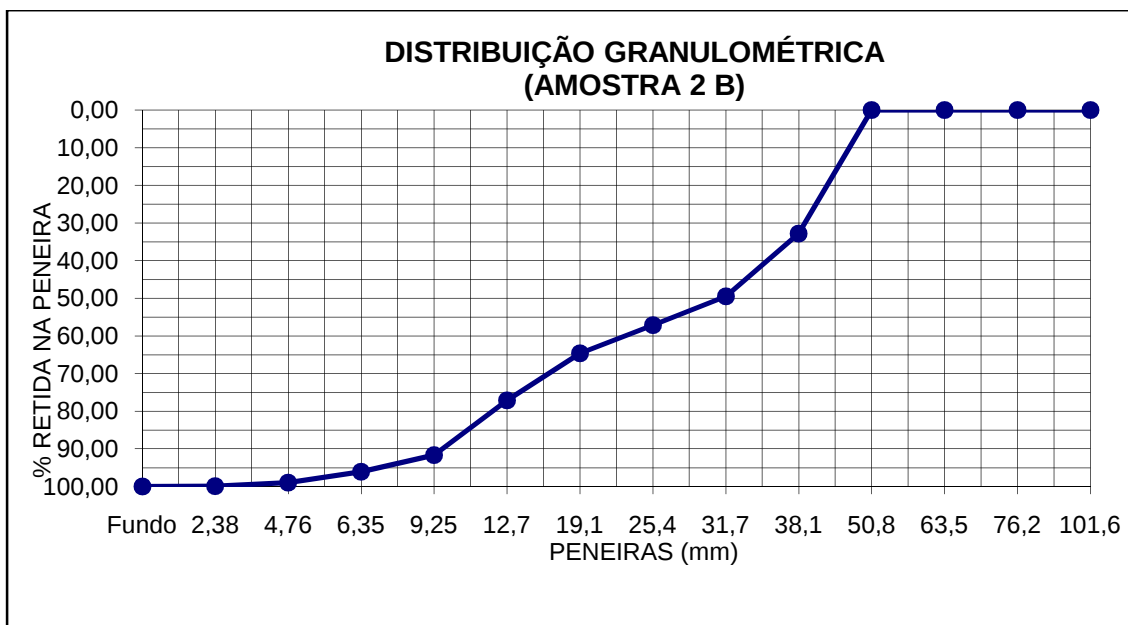


Figura 34 – Amostra 2B: Curva de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão

Verificou-se serem muito próximas as distribuições granulométricas iniciais para as amostras com a denominação 2 (2B, 2C e 2V), o que não aconteceu, no entanto, para as amostras com a denominação 1 (1B, 1C e 1V), conforme ilustram as Figuras 35 e 36.

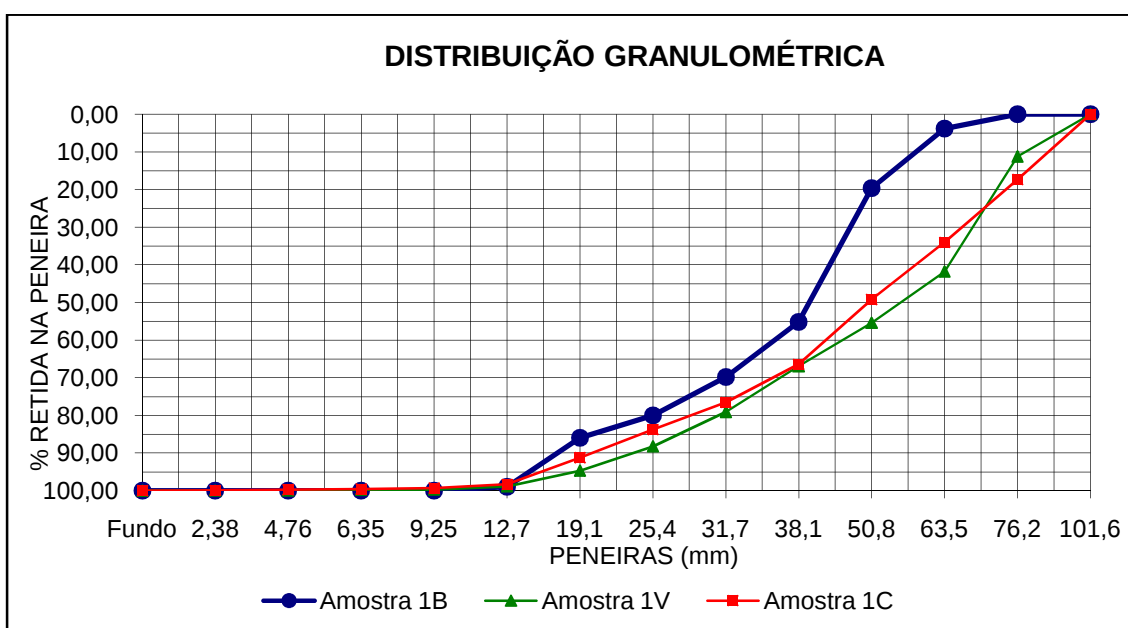


Figura 35 – Comparação das curvas de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão, para as amostras com denominação 1

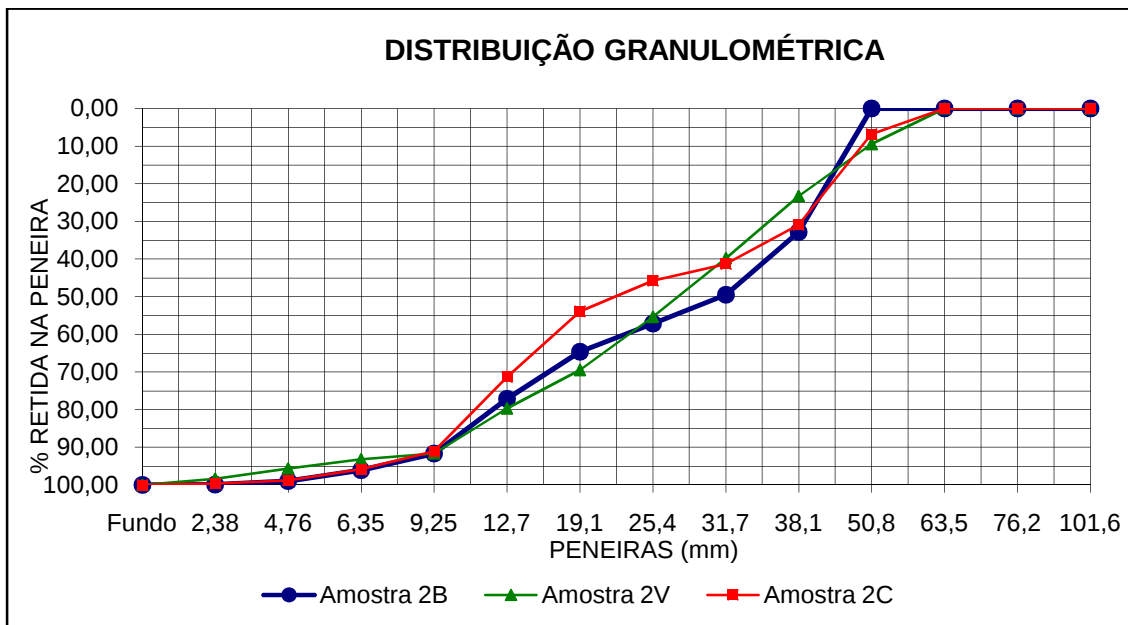


Figura 36 – Comparação das curvas de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão, para as amostras com denominação 2

4.2 Ensaio de permeabilidade

Os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C encontram-se no Anexo B, em que k é o coeficiente de permeabilidade. Na Tabela 6 estão apresentados os valores obtidos no ensaio de permeabilidade.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de permeabilidade

Amostra	k (cm/s)
1V	9,25E-03
2V	2,91E-03
1C	9,30E-03
2C	7,29E-03

Conforme esperado, as amostras do tipo 1 apresentaram um valor para o coeficiente de permeabilidade superior ao encontrado nas amostras do tipo 2, frisando que o coeficiente de permeabilidade para amostra 1V ficou cerca de três vezes maior para a amostra 2V, enquanto o coeficiente de permeabilidade da amostra 1C ficou apenas 27% maior que o encontrado para a amostra 2C, valendo ressaltar que a variação encontrada para os valores de coeficiente de permeabilidade entre as amostras 1C e 1V foi de apenas 0,5%.

4.3 Ensaio de compressão confinada

Os resultados dos ensaios de compressão confinada, incluindo o módulo de compressibilidade secante determinado em cada leitura, realizados nas amostras 1V, 2V, 1C, 2C, 1B e 2B estão organizados no Anexo C. Nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42 apresentam-se as curvas tensão *versus* deformação para cada amostra.

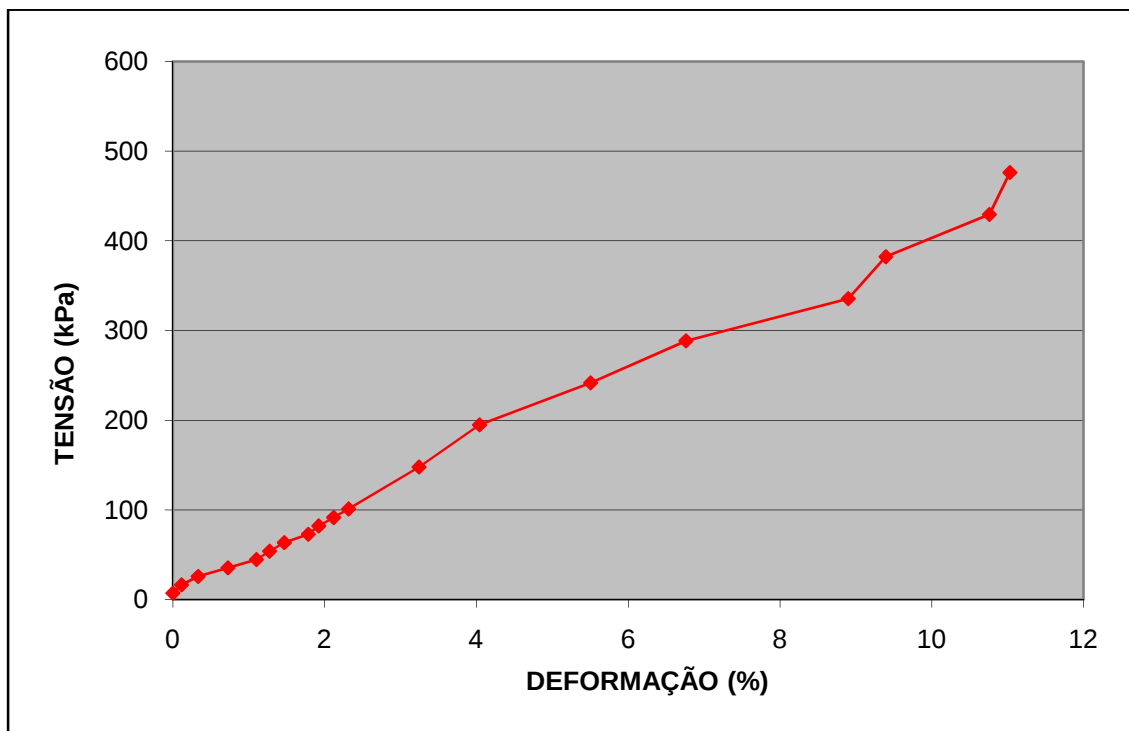


Figura 37 – Amostra 1V: Curva tensão *versus* deformação determinada no ensaio de compressão confinada

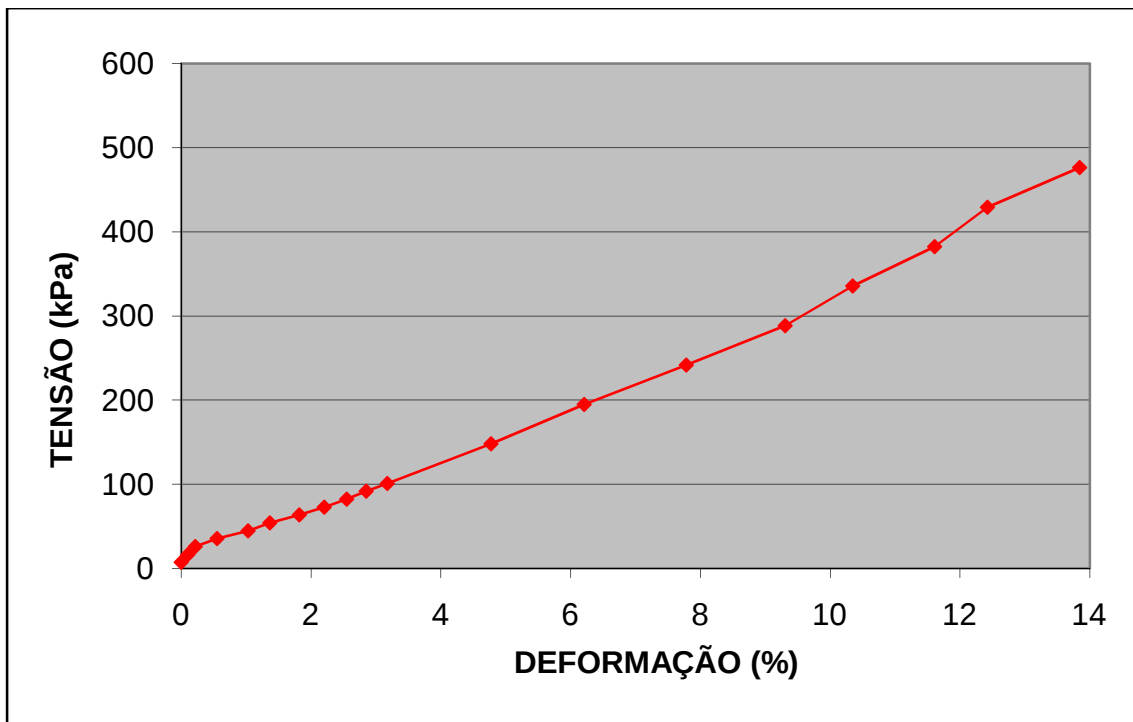


Figura 38 – Amostra 2V: Curva tensão *versus* deformação determinada no ensaio de compressão confinada

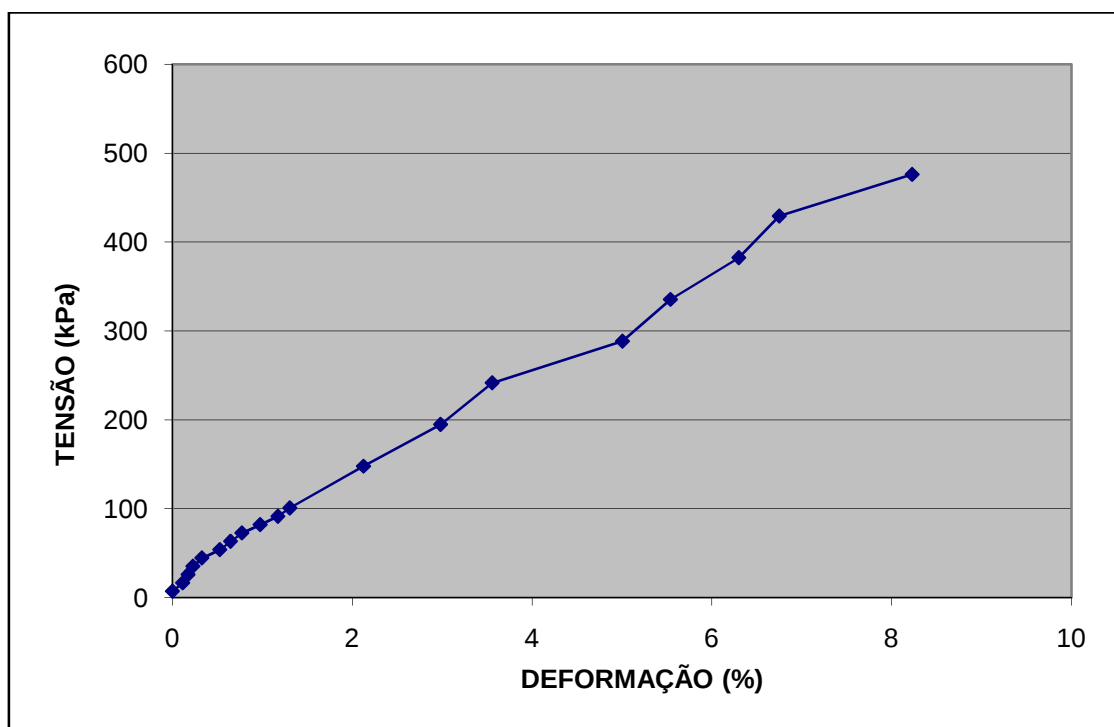


Figura 39 – Amostra 1C: Curva tensão *versus* deformação determinada no ensaio de compressão confinada

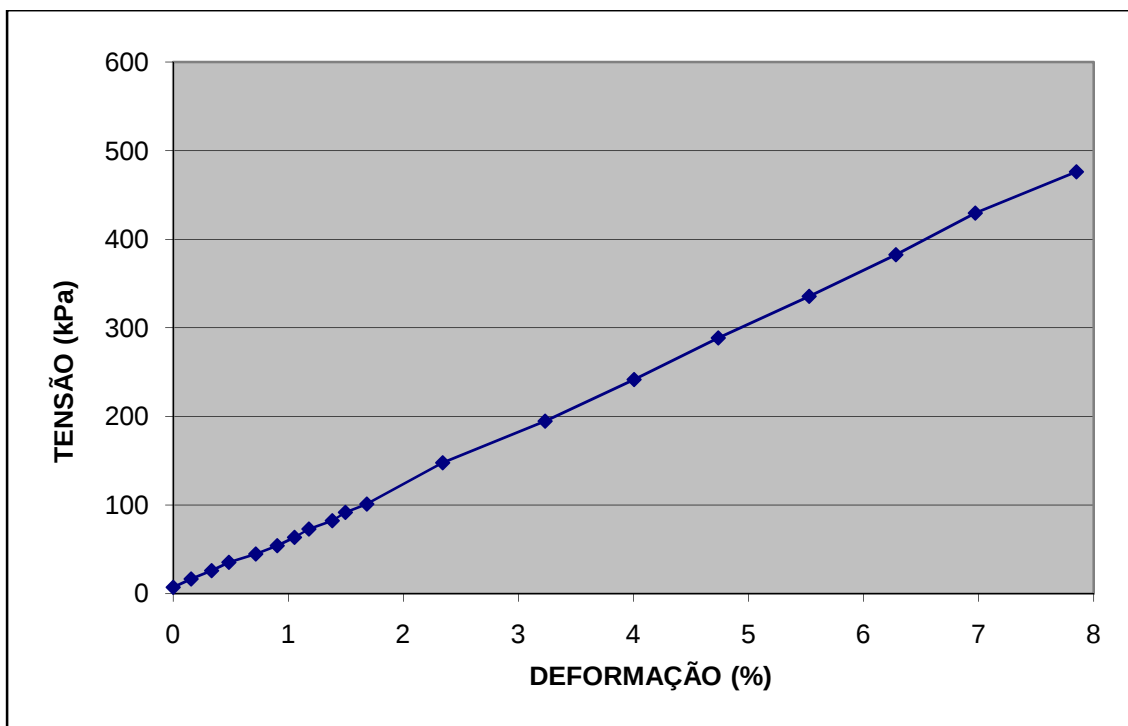


Figura 40 – Amostra 2C: Curva tensão *versus* deformação determinada no ensaio de compressão confinada

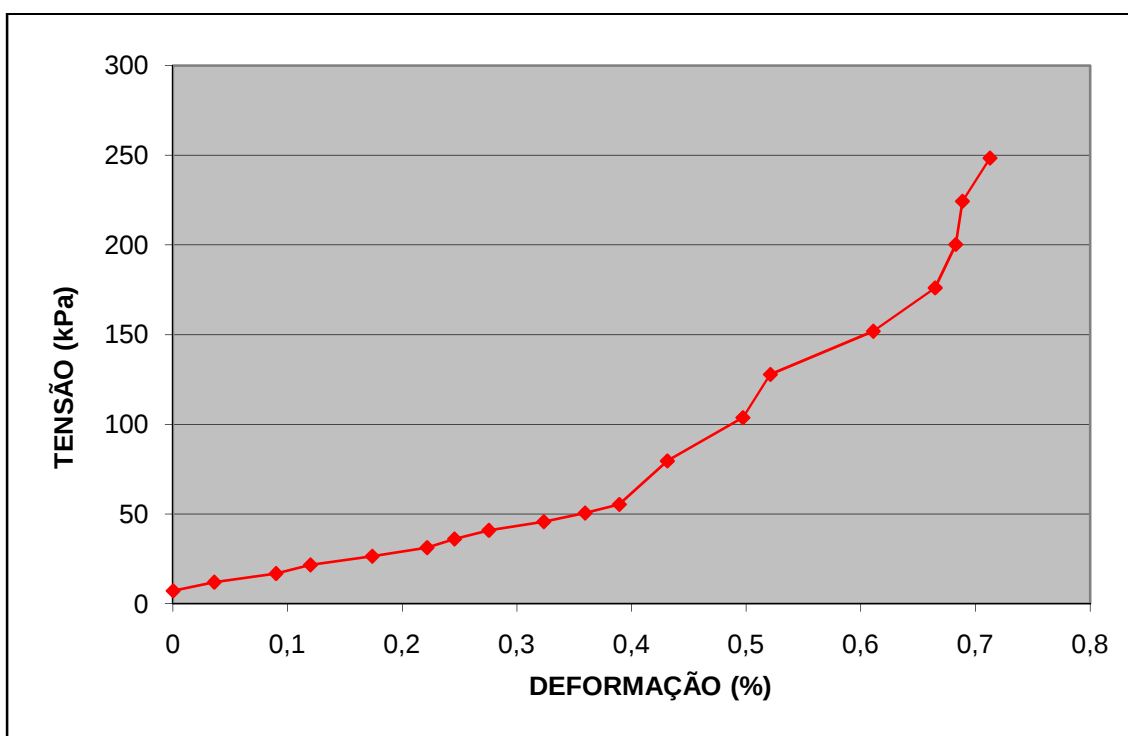


Figura 41 – Amostra 1B: Curva tensão *versus* deformação determinada no ensaio de compressão confinada

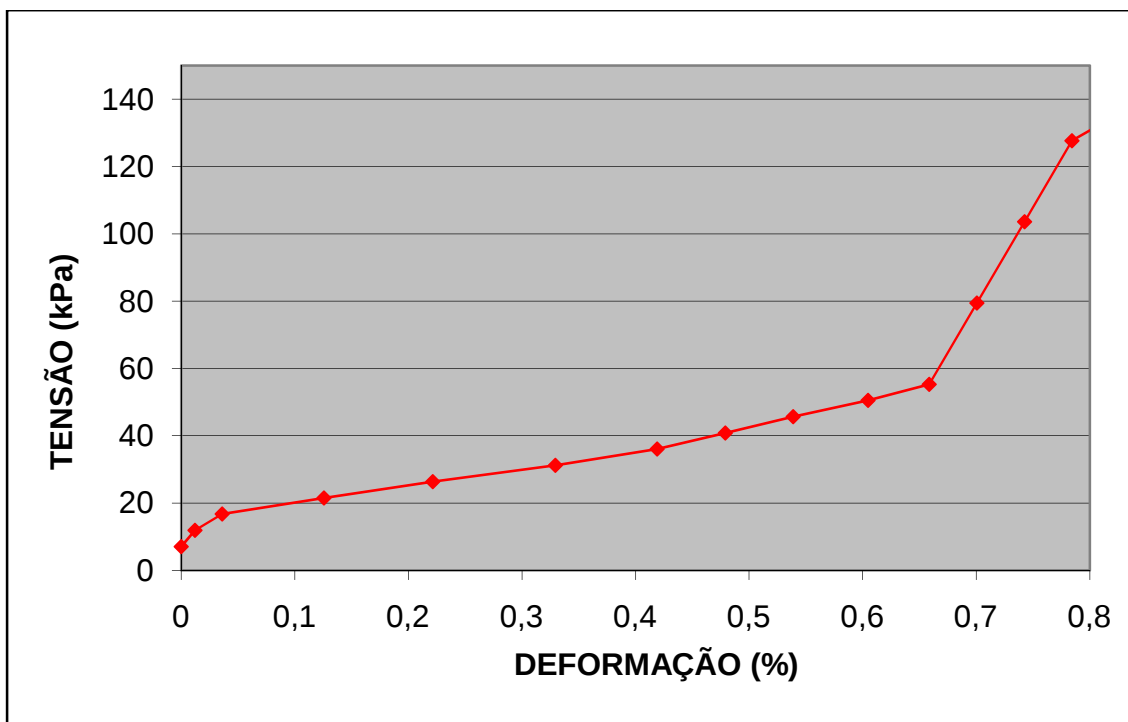


Figura 42 – Amostra 2B: Curva tensão *versus* deformação determinada no ensaio de compressão confinada

No ensaio de compressão confinada objetivou-se verificar a ocorrência de deformações e quebra de material suficiente para comprometer a integridade e eficiência do sistema de drenagem.

Os valores encontrados para o módulo de compressibilidade secante para as amostras 1C e 2C são maiores do que aqueles encontrados para as amostras 1V e 2V. Como já se antecipava, os resíduos do tipo cinza, por serem compostos de argamassas e concreto, são menos deformáveis do que os do tipo vermelho e, portanto, apresentam maior módulo de compressibilidade secante. Seguindo o mesmo raciocínio, observa-se que o valor encontrado de módulo de compressibilidade nas amostras 1B e 2B são superiores aos encontrados no material tipo cinza e tipo vermelho.

Considerando, por exemplo, um ponto no sistema de drenagem de lixiviados com espessura de um metro sob uma camada de RSU de 10,0 m de espessura, a tensão vertical no ponto é cerca de 100 kPa, admitindo um valor de peso específico para os resíduos de 10 kNm^{-3} . Com o valor de tensão, determina-se o valor da deformação vertical correspondente, a partir das curvas tensão *versus* deformação longitudinal obtidas dos ensaios de

compressão confinada para cada tipo de resíduo (Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42); e com o valor da deformação longitudinal, é possível determinar a variação da altura, ou recalque, da camada de RSU acima do sistema de drenagem. Os resultados de recalque para cada tipo de RCD e para as amostras de brita encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Deformação vertical da camada de RSU para cada tipo de resíduo de RCD

Amostra	Módulo de deformabilidade (kPa)	Deformação vertical (%)
1V	4000	2,5
2V	3000	3,3
1C	7200	1,4
2C	5600	1,8
1B	19400	0,5
2B	13000	0,8

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7, verifica-se que os RCD beneficiados do tipo cinza são cerca de 80% menos deformáveis que os do tipo vermelho, indicando que seu uso em sistemas de drenagem é mais adequado, sob este aspecto, valendo ressaltar a diferença entre o módulo de deformabilidade encontrados para os resíduos de construção quando comparados ao da brita, sendo a brita 2,5 vezes maior, em média, do que o material tipo cinza e 4,5 vezes maior, em média, que o vermelho. Entre amostras de mesmo tipo, a variação do módulo de deformabilidade em função da granulometria foi de 32% para o vermelho e 28% para o cinza, indicando que a deformabilidade dos resíduos do tipo cinza é menos influenciada pela granulometria, no entanto, a brita apresentou uma variação de 60%, deixando evidente que a brita é mais influenciada pela granulometria que os resíduos de construção.

No entanto, nota-se uma grande diferença entre os resultados obtidos com brita, chegando a ser cinco vezes menor na amostra 1B, comparando com a 1V e cerca de quatro vezes menor comparando a amostra 2B com a 2V.

4.4 Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão

Verificou-se que, após o ensaio de compressão confinada, as amostras apresentavam sinais de fragmentação (Figura 43). Em vista disso, foram realizados novos ensaios de distribuição granulométrica para que se pudesse avaliar a variação na distribuição granulométrica antes e depois de as amostras terem sido submetidas à compressão confinada e, portanto, deformadas.



Figura 43 – Amostra após o ensaio de compressão

Os resultados dos ensaios realizados nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C em termos do percentual retido nas peneiras, do percentual acumulado, bem como as curvas granulométricas encontram-se, respectivamente, no Anexo D e nas Figuras 44, 45, 46 e 47. No Anexo D também estão apresentados os resultados do ensaio de distribuição granulométrica utilizando brita, sendo apresentado o gráfico de cada distribuição nas Figuras 48 e 49.

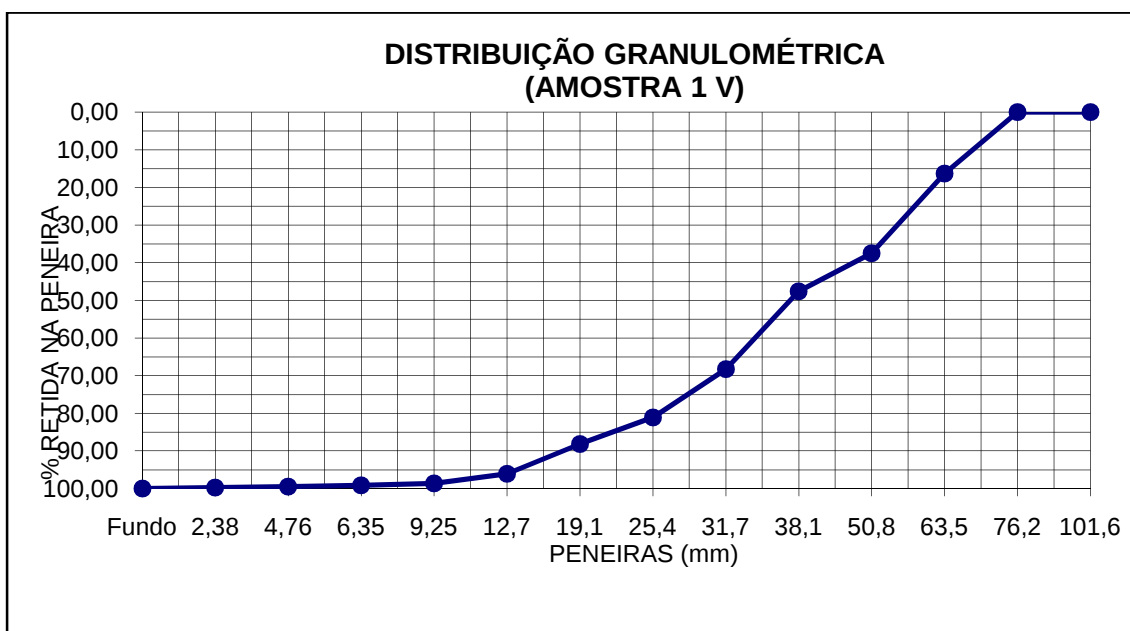


Figura 44 – Amostra 1V: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

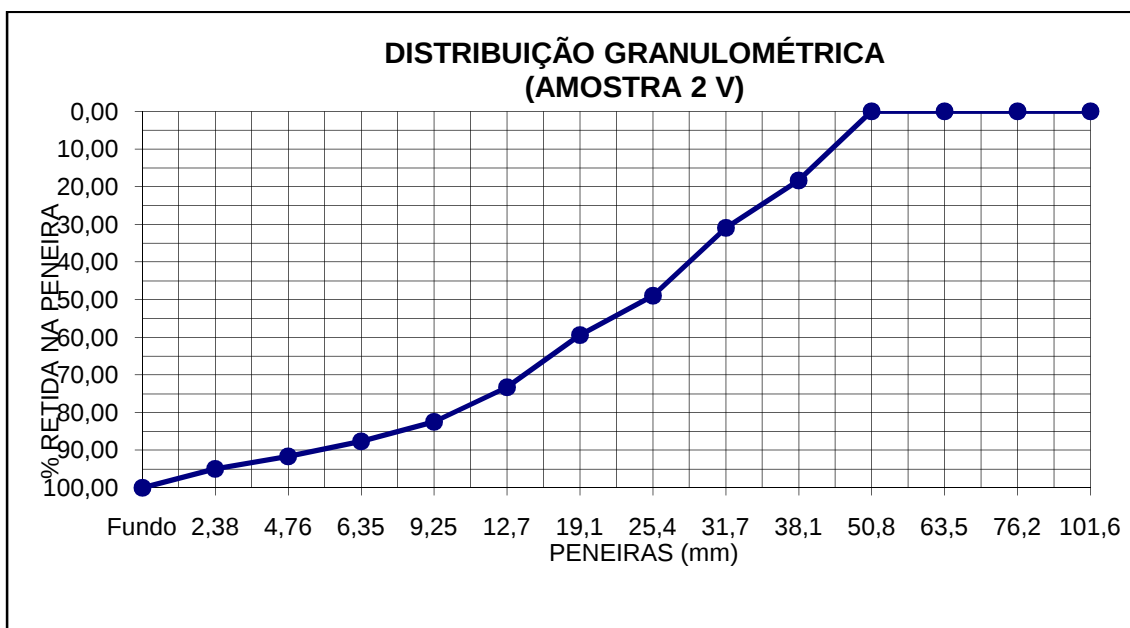


Figura 45 – Amostra 2V: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

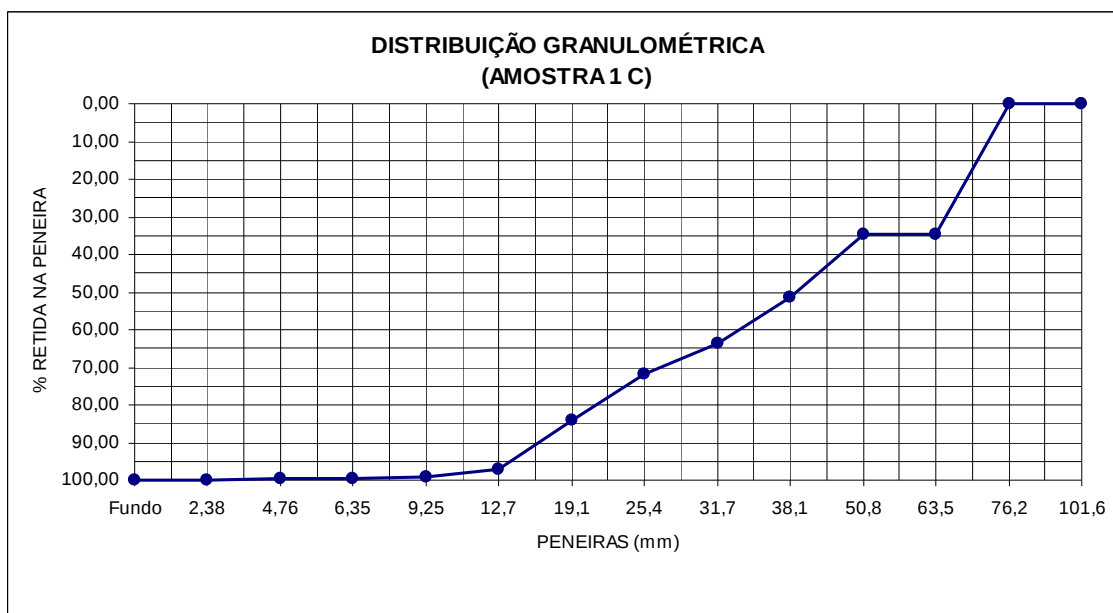


Figura 46 – Amostra 1C: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

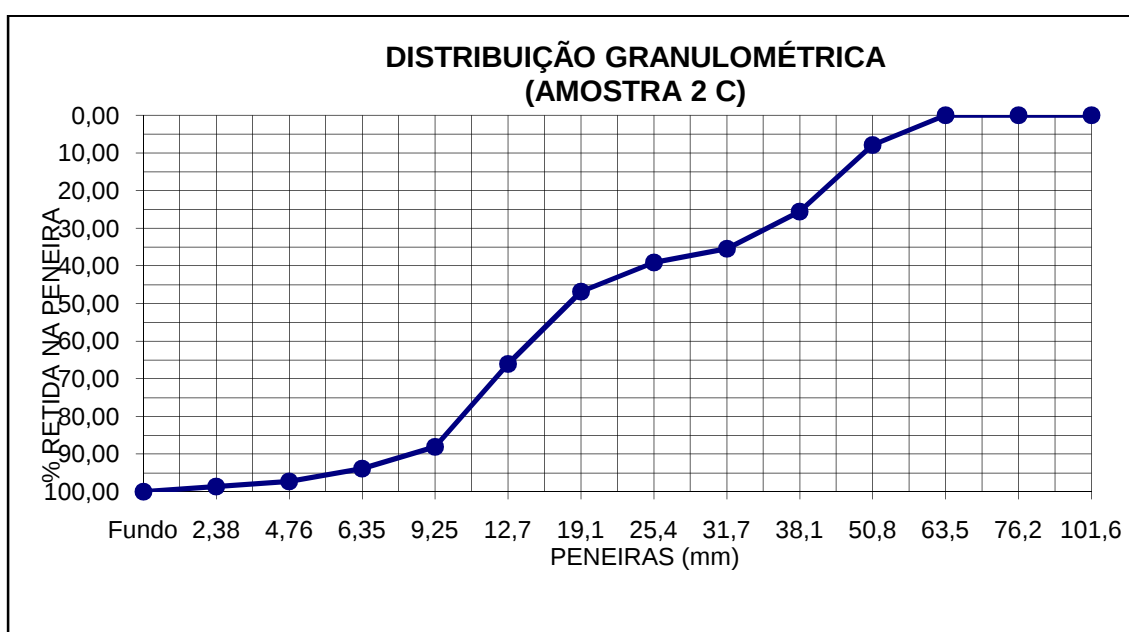


Figura 47 – Amostra 2C: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão

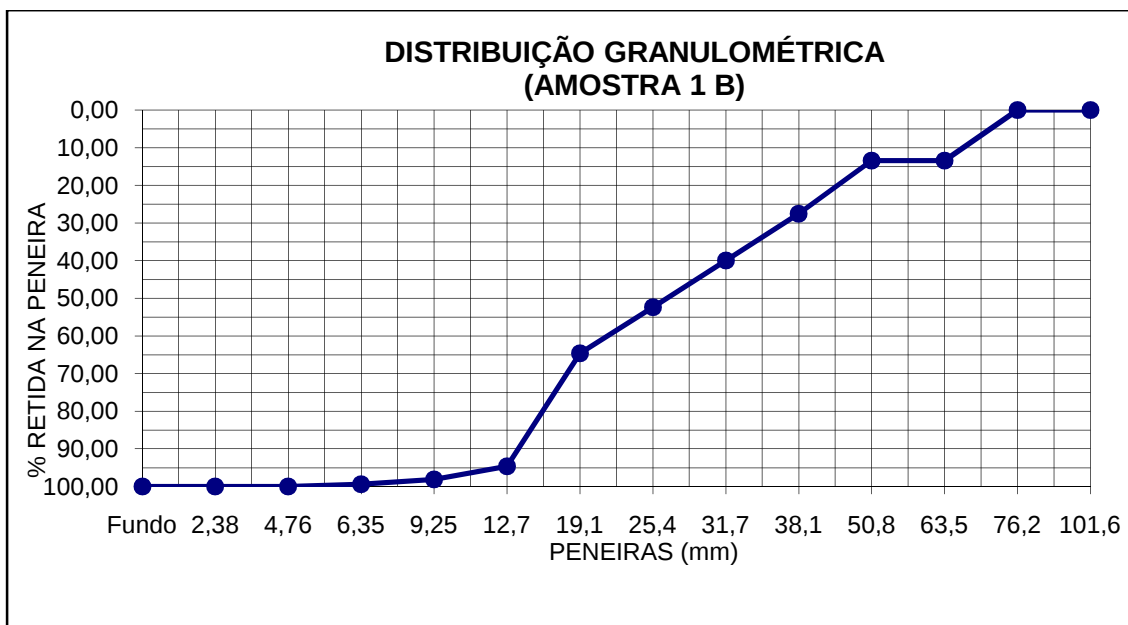


Figura 48 – Amostra 1B: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão

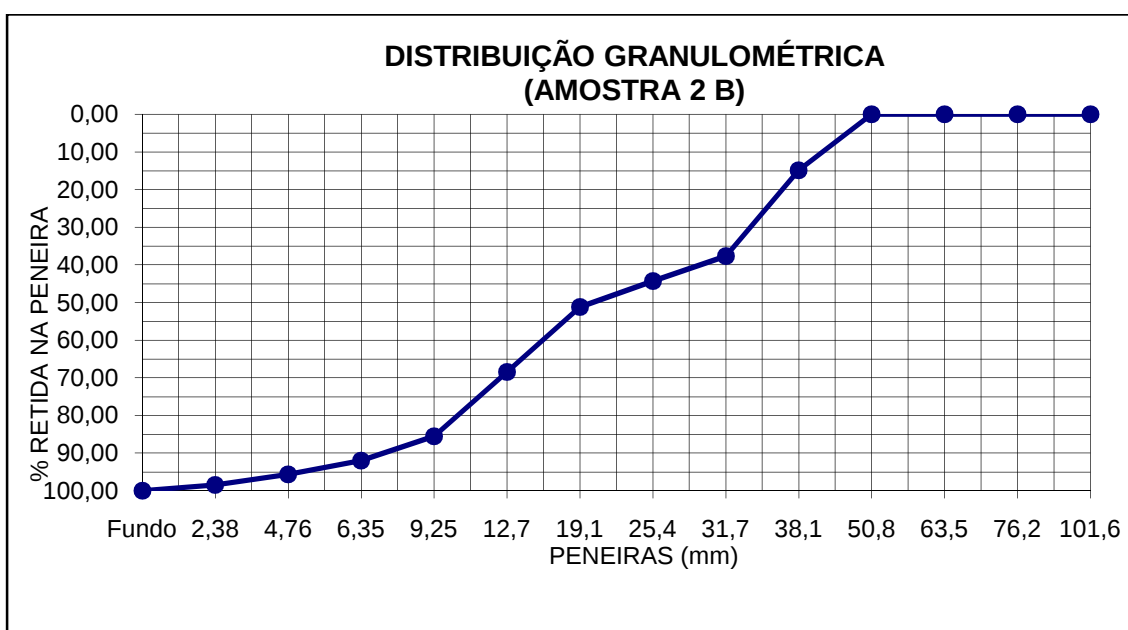


Figura 49 – Amostra 2B: Curva de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão

Para facilitar a comparação do ocorrido com a distribuição granulométrica do material devido ao ensaio de resistência à compressão, apresentam-se nas Figuras 50, 51, 52, 53, 54 e 55 as curvas de distribuição granulométrica para cada amostra, antes e após o ensaio de compressão.

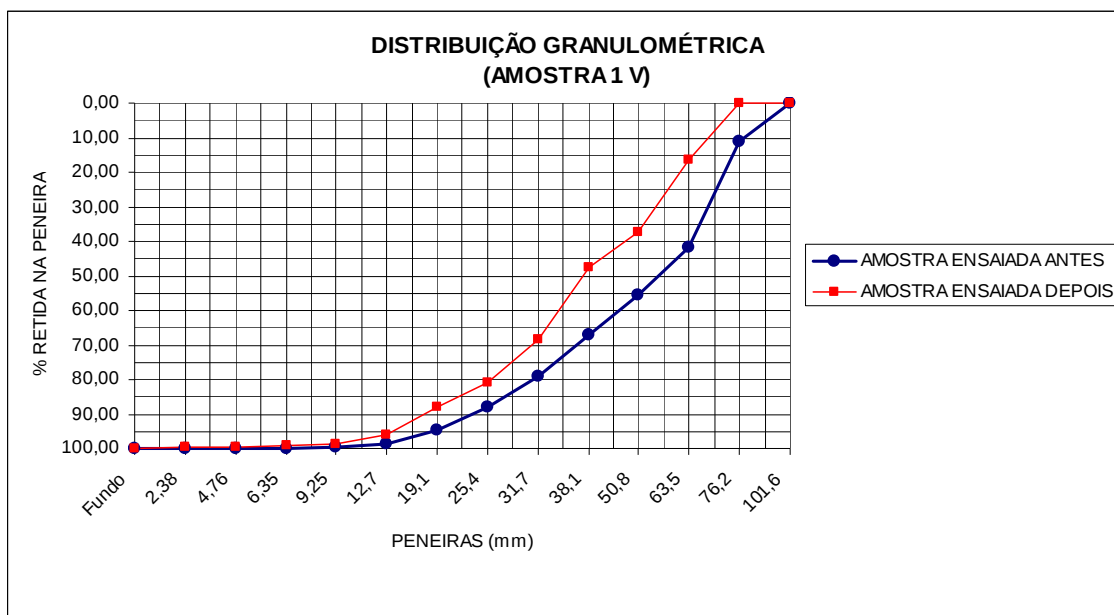


Figura 50 – Amostra 1V: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada

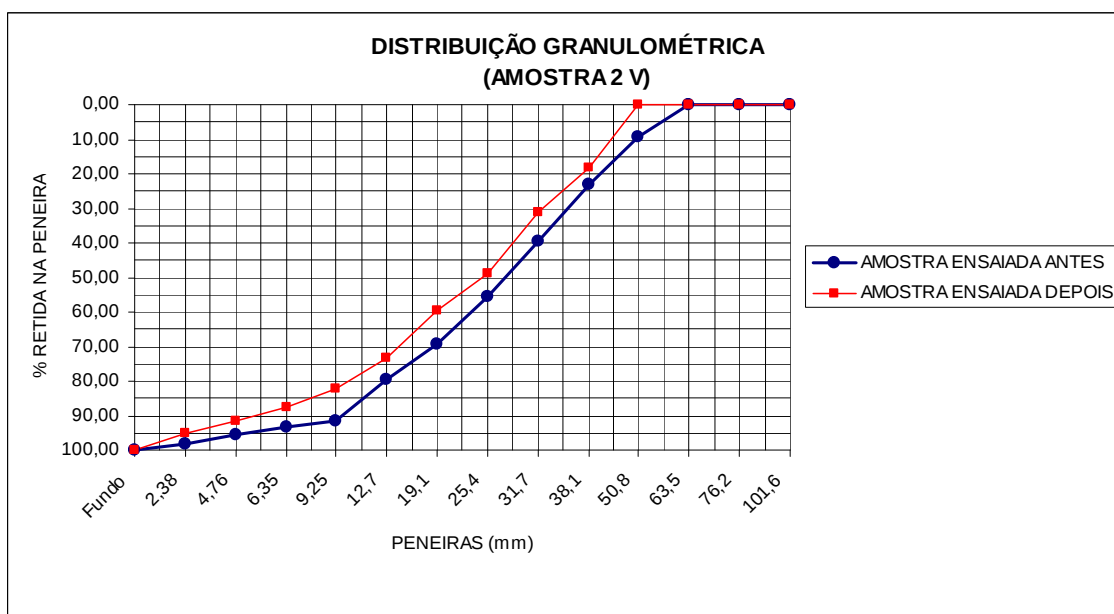


Figura 51 – Amostra 2V: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada

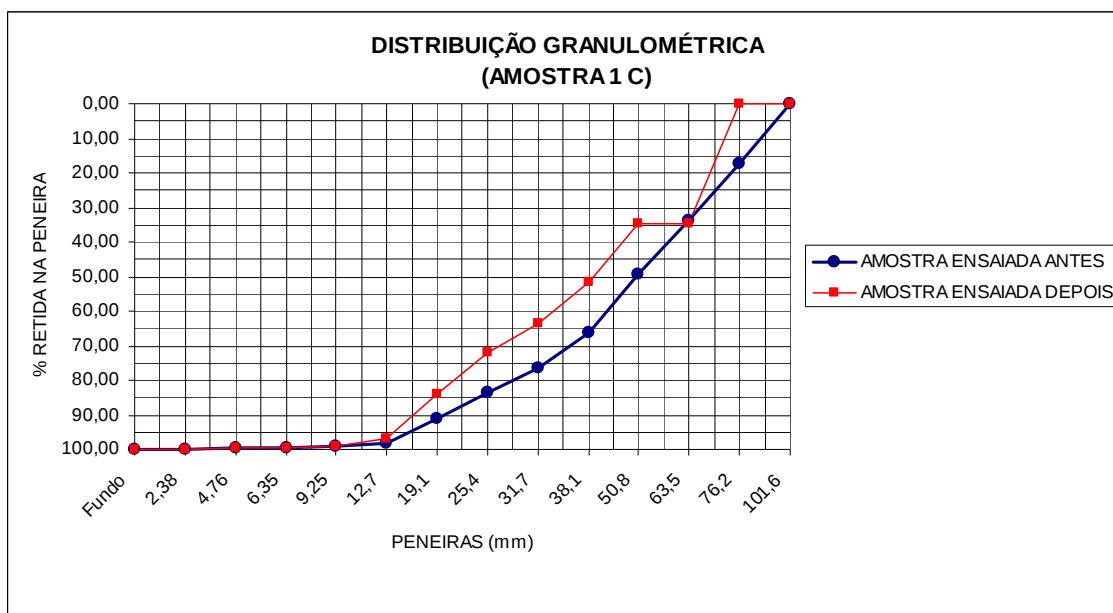


Figura 52 – Amostra 1C: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada

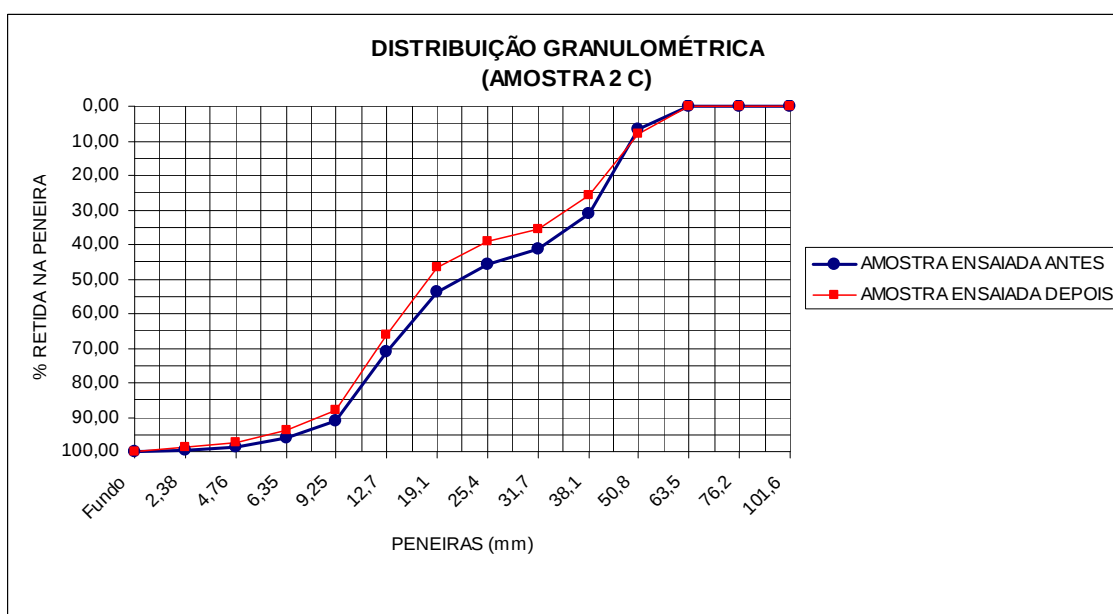


Figura 53 – Amostra 2C: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada

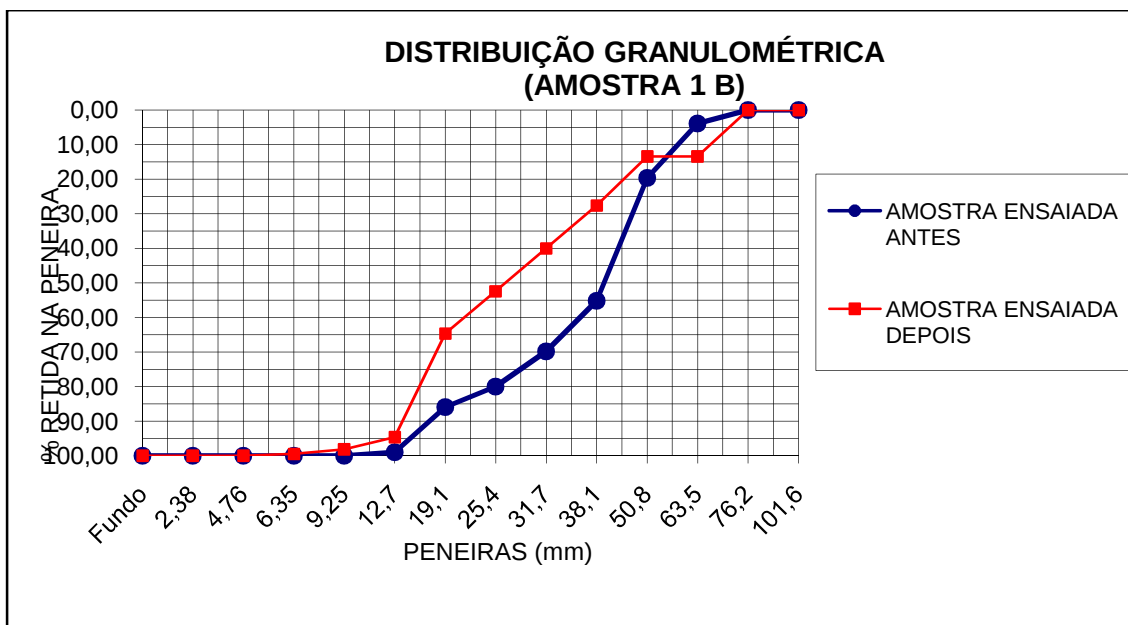


Figura 54 – Amostra 1B: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada

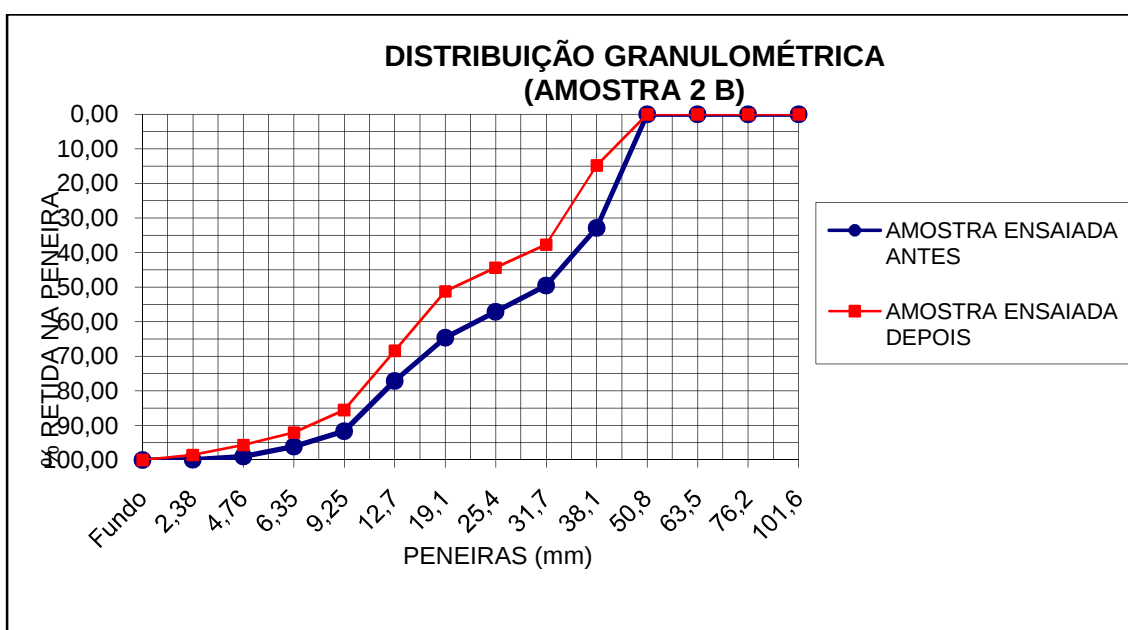


Figura 55 – Amostra 2B: Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio de compressão confinada

Com base nas Figuras 50, 51, 52, 53, 54 e 55, é possível observar em todos os casos que, a distribuição granulométrica variou devido à quebra do material quando submetido ao ensaio de compressão confinada, inclusive para as amostras de brita. Vale frisar, no entanto, que o nível de carga aplicado no

ensaio foi relativamente elevado, simulando uma situação de campo menos freqüente.

4.5 Caracterização do lixiviado do Aterro Sanitário de Sabará

Os resultados da caracterização física e química do lixiviado utilizado nos ensaios, bem como as faixas máximas de variação dos parâmetros analisados publicadas na literatura (Tabela 4), encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação da caracterização físico-química do lixiviado

Variável	Lixiviado do Aterro de Sabará	Faixa máxima de variação (Item 2.4.2)
pH	8,58	5,7 - 8,6
DBO (mg. L ⁻¹ de O ₂)	302,4	<20 - 30.000
DQO (mg. L ⁻¹ de O ₂)	3453,3	190 - 80.000
N total Kjeldahl (mg. L ⁻¹ de N)	1717,56	80 - 3.100
N – amoniacal (mg. L ⁻¹ de N)	24,13	0,4 - 3.000
Nitrato (mg. L ⁻¹ de N)	7	0 - 11
Oxigênio dissolvido (mg L ⁻¹)	0	-
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	9322	3.200 - 21.900
Sólidos totais fixos (mg L ⁻¹)	6844	630 - 20.000
Sólidos totais voláteis (mg L ⁻¹)	2478	2.100 - 14.500
Sólidos sedimentáveis (mg L ⁻¹)	0,1	-
Carbono Orgânico Total - COT (mgC L ⁻¹)	1881	-
Ferro (mg.L ⁻¹)	4,73	0,01 - 260
Zinco (mg.L ⁻¹)	0,21	0,01 - 8.0
Alumínio (mg.L ⁻¹)	0,20	-
Cobre (mg.L ⁻¹)	0,0003	0,005 - 0,6
Chumbo (mg.L ⁻¹)	0,61	0,01 - 2,8
Cádmio (mg.L ⁻¹)	0,03	0 - 0,26
Cromo (mg.L ⁻¹)	0,43	0,003 - 0,8
Níquel (mg.L ⁻¹)	0,27	0,03 - 1,1
Manganês (mg.L ⁻¹)	0,05	0,04 - 2,6
Cálcio (mg.L ⁻¹)	12,57	-
Magnésio (mg.L ⁻¹)	9,08	-

Com base nos valores listados na Tabela 8, pode-se notar que a composição do lixiviado coletado e utilizado nos ensaios apresenta valores nas faixas de variação encontradas na literatura (Tabela 4).

4.6 Avaliação de colmatção dos RCD pelo lixiviado

No Anexo E e nas Figuras 56, 57, 58 e 59 apresentam-se, respectivamente, os resultados das leituras e o cálculo da vazão, e a variação da vazão ao longo do tempo nas amostras 1V, 2V, 1C e 2C, obtidos no ensaio de colmatção dos RCD pelo lixiviado.

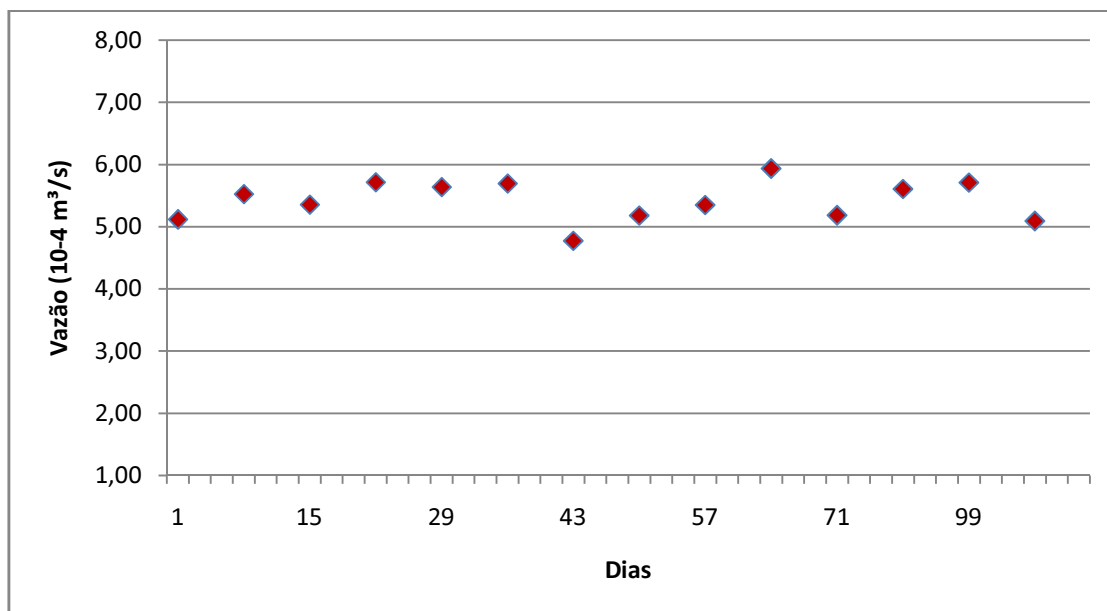


Figura 56 – Amostra 1V: Variação da vazão média de lixiviado ao longo do tempo

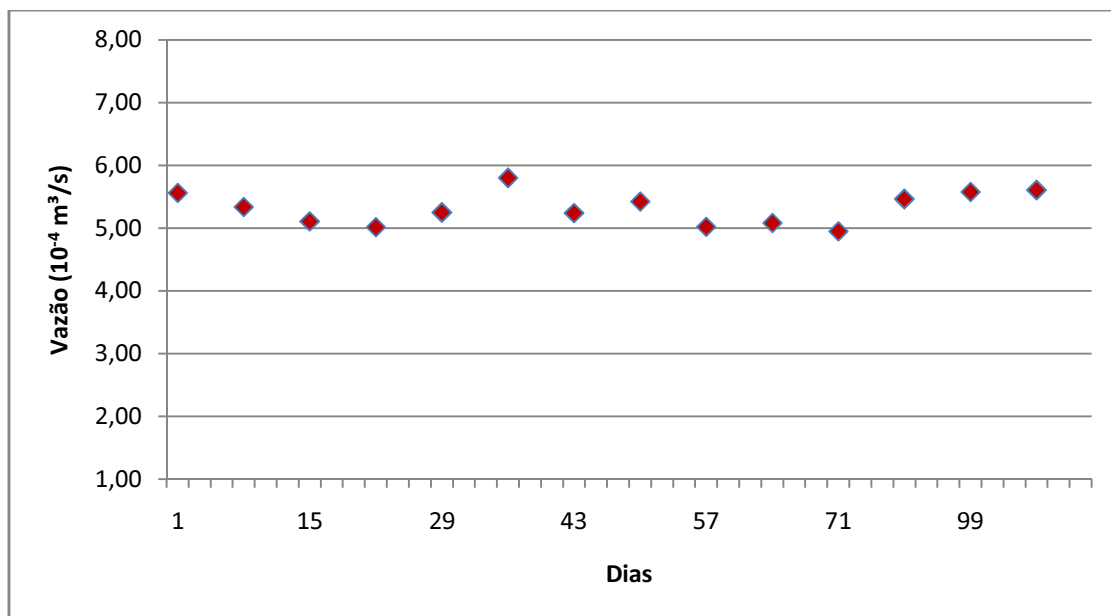


Figura 57 – Amostra 2V: Variação da vazão média de lixiviado ao longo do tempo

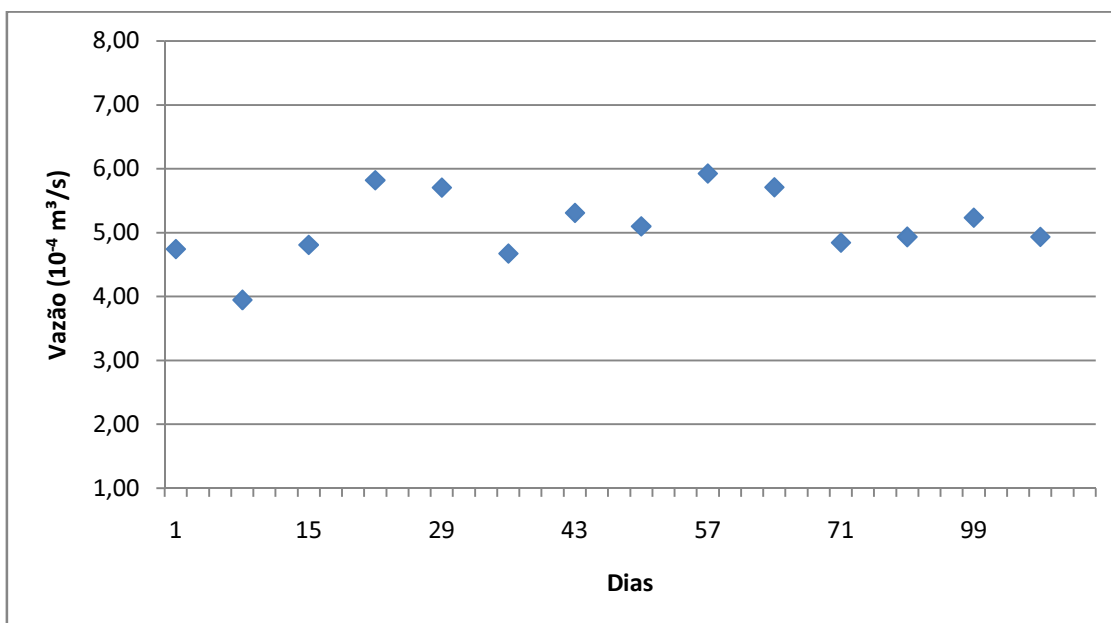


Figura 58 – Amostra 1C: Variação da vazão média de lixiviado ao longo do tempo

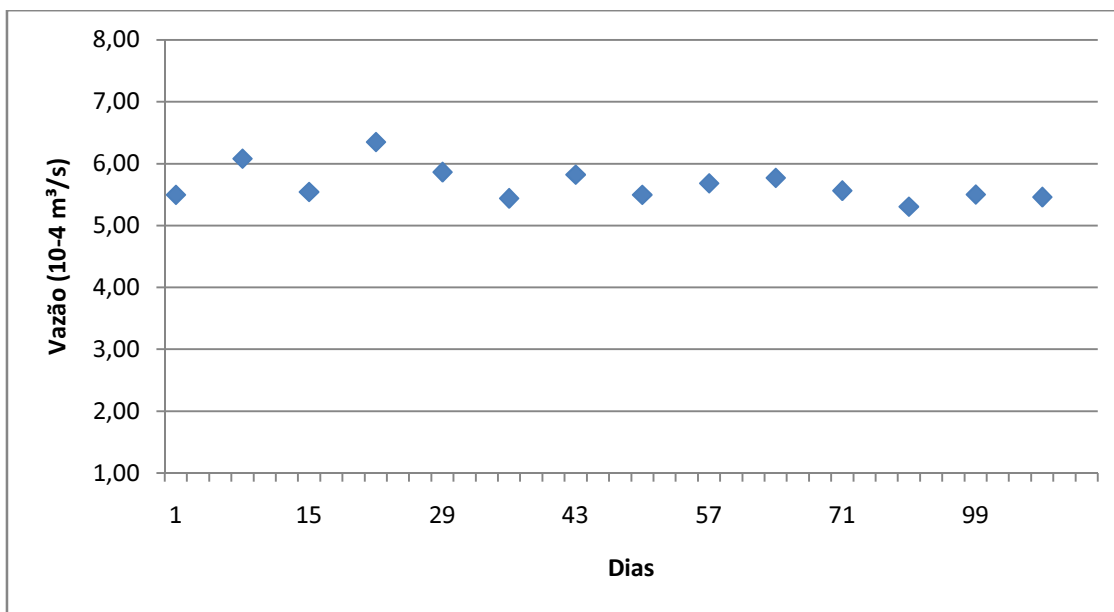
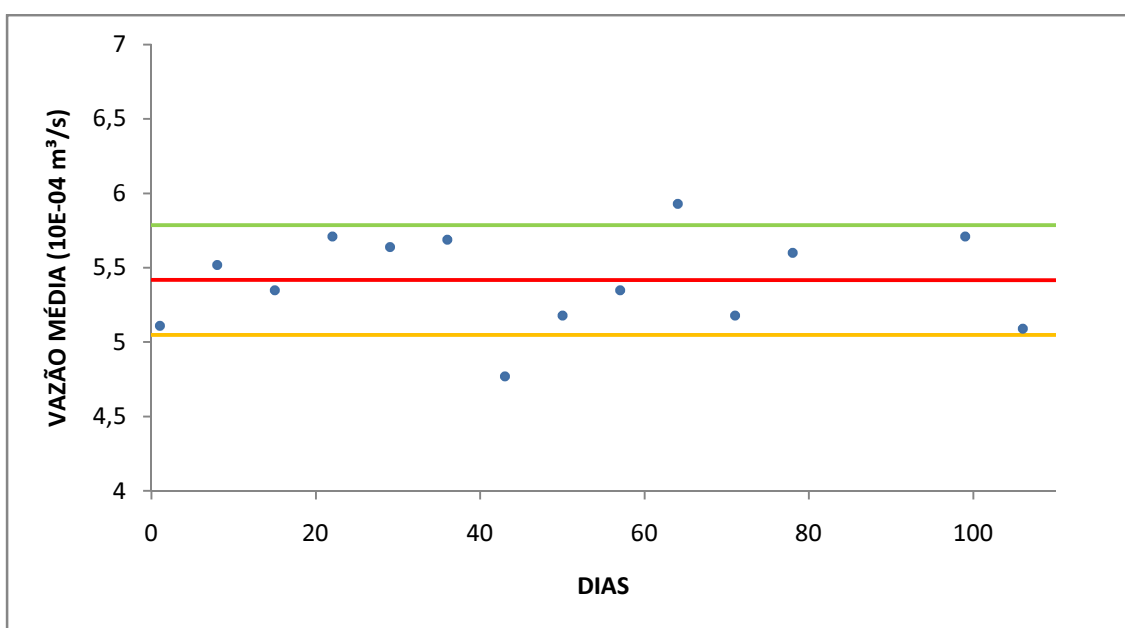
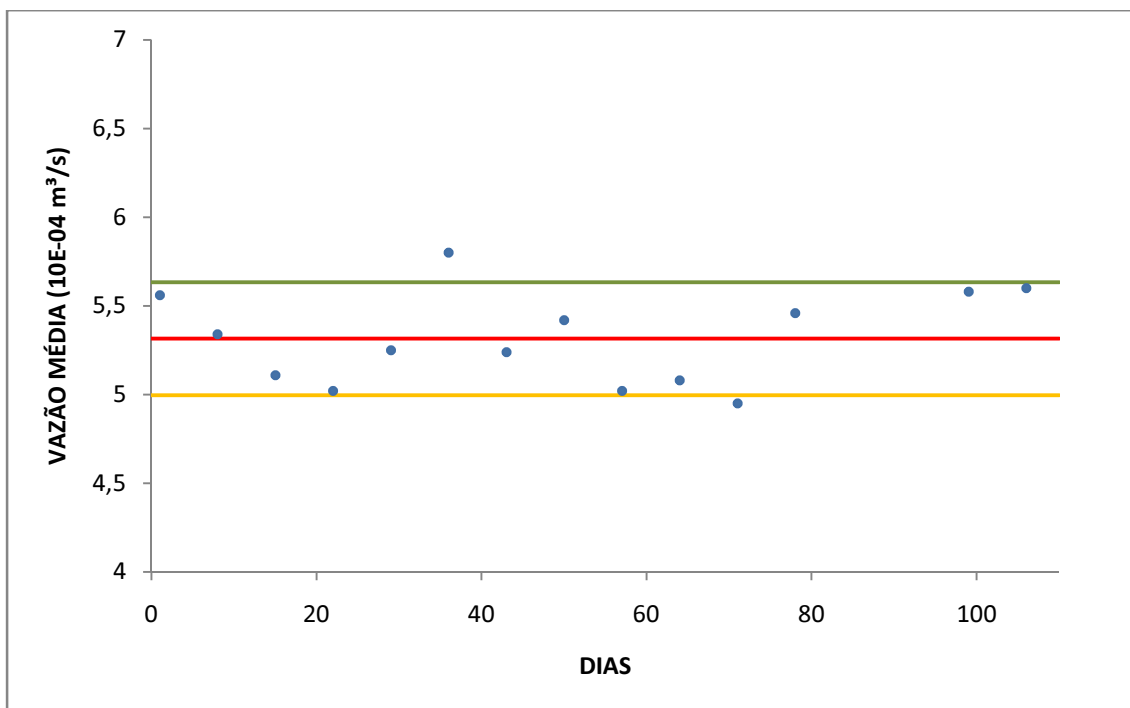


Figura 59 – Amostra 2C: Variação da vazão média de lixiviado ao longo do tempo

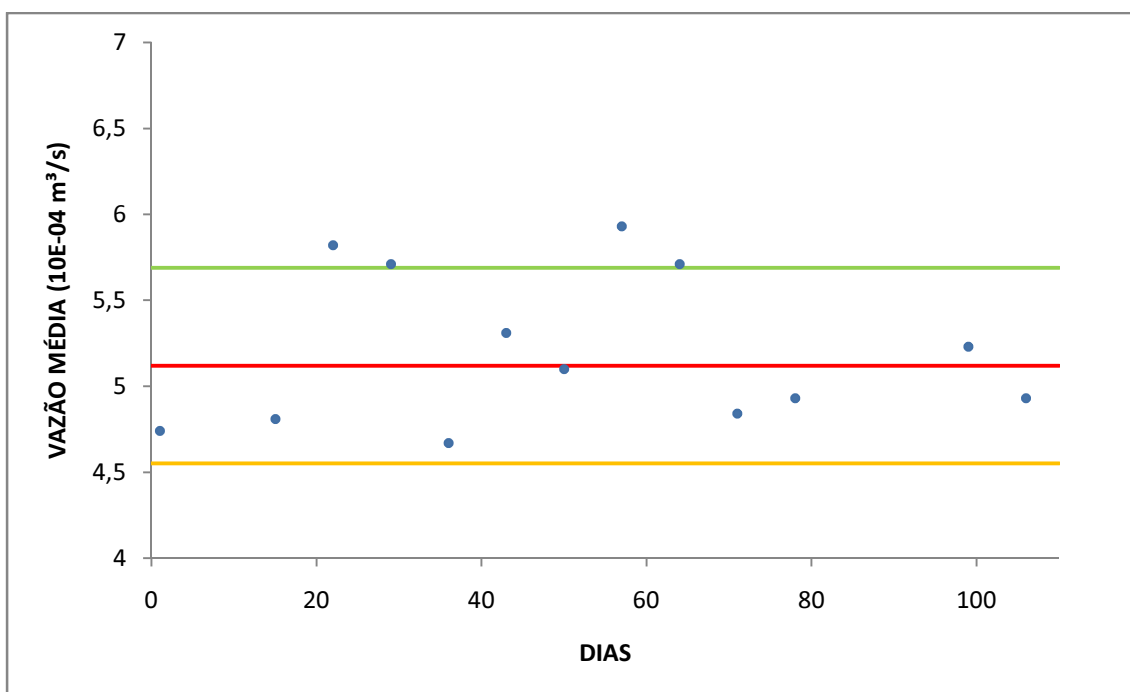
Este foi o ensaio motivador desta pesquisa, tendo em vista as características peculiares do líquido percolante nos RCD e de seu potencial de colmatção do material drenante. Na Figura 60 encontram-se as vazões medidas, suas médias e desvio padrão, e um ajuste linear aos valores medidos de maneira a fornecer uma idéia da tendência à colmatção do material drenante.



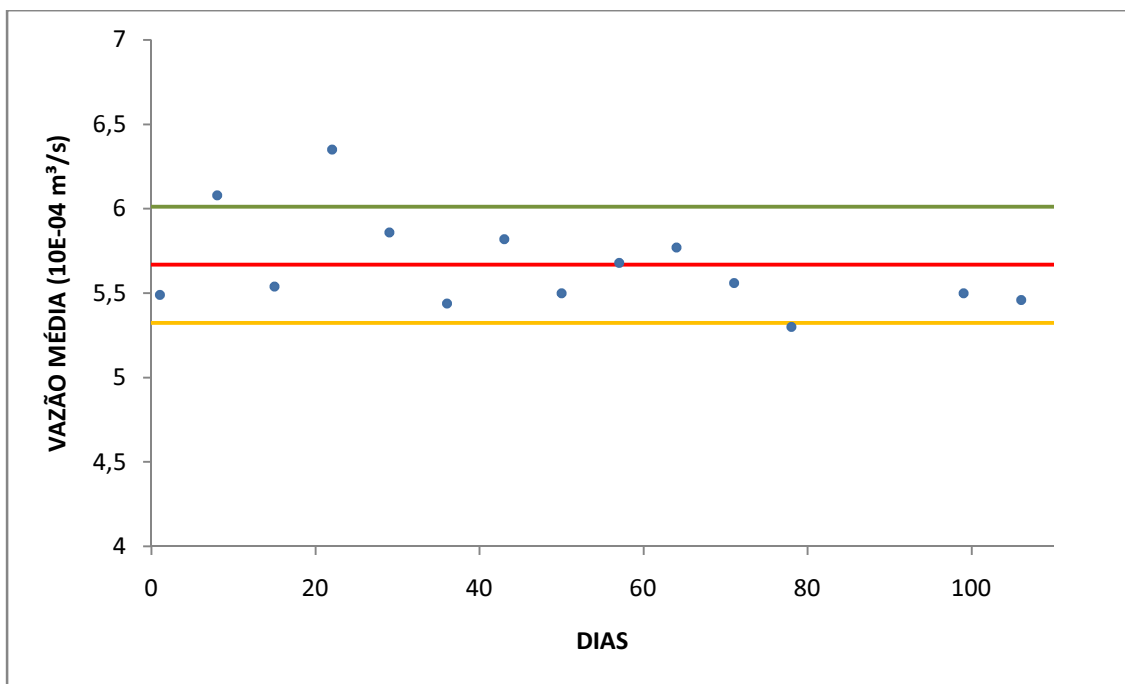
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 60 – Vazões medidas, suas médias e desvio padrão. (a) Amostra 1V; (b) Amostra 2V; (c) Amostra 1C; (d) Amostra 2C

Com base nos resultados obtidos, no período de realização desse ensaio, não foi possível afirmar que as amostras de RCD sofreram colmatção, pois os resultados obtidos foram pouco conclusivos. Sendo assim, decidiu-se pela continuação do ensaio por mais algum tempo.

5 – CONCLUSÃO

5.1 Conclusão

Essa pesquisa teve por objetivo avaliar a possibilidade de se utilizar resíduos da construção e demolição reciclados como material drenante em aterros de resíduos sólidos, em substituição à brita comumente utilizada nesse tipo de obra. Para isso, foram realizados ensaios de permeabilidade vertical, de compressão confinada, granulometria (antes e após o ensaio de compressão confinada) e avaliou-se a colmatção dos RCD pelo lixiviado de um aterro sanitário existente, em amostras com distribuições granulométricas pré-determinadas, facilmente desenvolvidas na prática de campo.

As conclusões extraídas desse trabalho são as seguintes:

- Verificou-se serem muito próximas as curvas de distribuição granulométrica inicial para as amostras de menor granulometria (2B, 2C e 2V), o que não aconteceu para as amostras de maior granulometria (1B, 1C e 1V).
- Os valores do coeficiente de permeabilidade para as amostras 1V e 1C, foram maiores, porém de mesma ordem de grandeza, que aqueles medidos para as amostras 2V e 2C.
- Os resultados dos ensaios de compressão confinada mostraram módulos de compressibilidade secante maiores para as amostras 1C e 2C do que para as amostras 1V e 2V, resultados esperados, já que os resíduos do tipo cinza, são compostos de argamassas e concreto, materiais menos deformáveis do que os do tipo vermelho, e menores do que os valores encontrados para as amostras 1B e 2B.
- Nos ensaios de percolação do lixiviado, não se pode garantir um decréscimo da vazão que esteja relacionado à colmatção dos resíduos. As variações de vazão encontrada no decorrer dos ensaios podem advir demais fatores, como por exemplo, os pontos onde se apresentou uma diminuição de vazão, quando comparado com a leitura anterior, podem ser atribuídos a alguma desintegração dos RCD, devido a sua imersão no lixiviado, por outro lado, os pontos que apresentaram um aumento de vazão, quando comparado com a leitura anterior, podem ser atribuídos à presença de pequenas

impurezas nos resíduos ensaiados, que foram carregadas ao longo do ensaio. Portanto, como os resultados obtidos, no período de realização desse ensaio, foram pouco conclusivos, decidiu-se pela continuação do ensaio por mais algum tempo.

Com base nos resultados dos ensaios de granulometria e compressão confinada realizados, e do ensaio de percolação de lixiviado, no intervalo de tempo estudado, a conclusão geral dessa pesquisa é que é possível utilizar RCD reciclados em camadas drenantes de aterros de RS. Entretanto, recomenda-se que o material do tipo vermelho, por ser mais deformável, não seja empregado na drenagem de fundo de células, já que poderá vir a alterar a permeabilidade do material drenante.

5.2 Sugestões

Como sugestões para futuros trabalhos nesta área de pesquisa, propõem-se:

- Um período de tempo maior de ensaio para a avaliação de uma possível colmatção dos RCD pelo lixiviado;
- A realização de novos ensaios de granulometria e compressão confinada para avaliar a integridade dos RCD, após o ensaio de colmatção;
- Avaliar a permeabilidade e a colmatção de cada material e composição granulométrica após a realização do ensaio de compressão;
- Avaliar a colmatção na brita, que é o material normalmente utilizado em obras de aterro sanitário.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, F. J. A. Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

AMARAL, M. C. S. Caracterização de lixiviados empregando parâmetros coletivos e identificação de compostos. 270 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

ANDRADE, S. M. A. Caracterização físico-química e tratabilidade por coagulação-floculação dos líquidos percolados gerados no aterro sanitário de Uberlândia-MG. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU), Uberlândia, 2002.

ÂNGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos. Tese (Doutorado), 149p. – Escola Politécnica, USP. São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S. C. et al. *Construction and demolition waste management in Brazil. Waste Management World*, London. Mar/Apr, p. 54-57, 2003b.

ÂNGULO, S. C. et al. *Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. In: International Conference on Sustainable Building, 3, 2002, Oslo. Proceedings. Noruega: [s.n.], 2002b.*

ANGULO, S. C. et al. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 6, 2003, São Paulo. Anais: IBRACON/IPEN. 2003a. CD-ROM.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M., Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade, IX encontro Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, 2002.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição. Câmara Ambiental da Construção. São Paulo, 2002a. 15p. (documento interno).

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol.1, n.1, p.22-32, Maio 2004.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M.; CHAVES, A. P.; ALMEIDA, S. L. M.; LIMA, F. M. R. S.; GOMES, P. C. Aperfeiçoamento da reciclagem na fração mineral dos resíduos de construção e demolição – uso em concretos. In: SEMINÁRIO: Uso da Fração Fina da Britagem. Anais: II SUFFIB, Cuchierato et al. (eds), 2005.

ANGULO, S. C., JOHN, V. M., ZORDAN, S. E., Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. PCC – Departamento de Engenharia, capturada na internet no site: <http://www.pcc.usp.org.br>, em 2004.

ANGULO, S. C. Produção de concretos de agregados reciclados. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, 171p. 1998.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de novos mercados para reciclagem massiva de RCD. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (1999). Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo-SP. ABCP, ET-35, 51p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- NBR 6954: Lastro Padrão: determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.
- NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- NBR 10007: Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.
- NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.
- NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.
- NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, M. C., AFFONSO, F. J. A. e BARRO, M. C. (2008). Caracterização de agregados reciclados de RCDs para uso em coberturas e sistemas de drenagem de aterros de resíduos, Anais XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Búzios, RJ, Brasil. P. 1111-1118.

BARKER, D. J.; STUCKEY, D. C. *A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems. Water Research*, v.33, n. 14, p.3063-3082, 1999.

BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L. et al (1998). Environmental Impact and Mechanisms of Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v.28, n.2, pp. 123-191.

BENNERT, T.; PAPP JR., W. J.; MAHER, A.; GUCUNSKI, N. *Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and sub-base applications. Transportation Research Record*, Washington, n.1714, p. 33-39, 2000.

BERNUCCI, L. B.; LEITE, F. C.; MOTTA, R. S. (2009). Pavimento ecológico. Revista Técnica. Disponível em: [HTTP://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/126/imprime62005.asp](http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/126/imprime62005.asp). Acessado em: julho/2009.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: 29a Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Cuiabá, 1995. Anais. P. 409-436.

BUTTLER, A. M. – Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Estruturas, USP. São Paulo, 2003.

CARNEIRO, A. P. Reciclagem de entulho de Salvador para a produção de materiais de construção. Dissertação (Mestrado), 163 p. UFBA, Salvador, 2001.

CARRIJO, P. M. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. Dissertação (Mestrado), 129p. Escola Politécnica, USP. São Paulo, 2005.

CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom. Edição única, Editora UFBA, Salvador, 2001.

CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. PINI. N. 2480, p.27-30. São Paulo, 1983.

CONAMA. Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional da Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02.

FERNANDES, C. G. Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

FERRAZ, A. L. N. e SEGANTINI, A. A. S. (2004). Engenharia sustentável: aproveitamento de resíduos de construção na composição de tijolos de solo-cimento. Disponível em: www.ppgec.feis.unesp.br. Acessado em: julho/2009.

FRAZÃO, E. B. Tecnologia de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2002.

FREIRE, L.; BRITO, J. Custos e benefícios da demolição seletiva. In: Construção 2001. Anais, p. 863-870. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2001.

GAVILAN, R. M.; BERNOLD, L. E. *Source elavuation of Solid Waste in Building Construction. Journal of Construction Engineering and Management*, n. 120, p.536-552, Dec., 1994.

GUSMÃO, A. D. (2005). Melhoramento de Terrenos Arenosos. In: Alexandre Duarte Gusmão; Jaime Azevedo Gusmão Filho; Joaquim Teodoro Romão de Oliveira; Gilmar de Brito Maia, (eds.). Geotecnia no Nordeste, Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, v.1, p. 331-363.

HENDRIKS, C. F. *The building cycle*. Holanda: Aeneas, 2000. 231 p.

IBGE. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. 2008.

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. Metodologia para o desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: JOHN, V. M.; ROCHA, J. C. Utilização de resíduos na Construção Habitacional. ANTAC, v. 4, p. 8-71, Porto Alegre, 2003.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção. Anais, p. 21-30. PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1996.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos: workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção. Anais EPUSP/ANTAC, São Paulo, 1997.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Livre Docência, USP. São Paulo, 2000. Capturada na internet no site: <http://www.pcc.usp.org.br>, em 2004.

KJELDSEN, P. et al. *Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review critical reviews in environmental science and technology*. v.4, n.32, p. 297-336, 2002.

KRYCKYJ, P. R.; TRICHÊS, G. *Use of civil construction waste in urban pavements: a feasibility study*. In: *International Symposium on Environmental*

Geotechnology and Global Sustainable Development, 5. Anais, CD-ROM. Belo Horizonte, 2000.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. *Soil Mechanics*, MIT, John Wiley&Sons, Inc – 1969.

LEITE, F. C. Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2007.

LEVY, S. M. Pesquisa e normalização existente no país e no exterior sobre RCD, 1994. Capturada na <http://www.pcc.usp.org.br> em 2003.

LEVY, S. M. Reciclagem do entulho da construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos. Dissertação (Mestrado). Escola Politecnica, USP. São Paulo, 1997.

LIMA, J. A.; SILVA, L. F. Utilização e normalização de resíduos de construção reciclados no Brasil. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental – Gerenciamento de Resíduos e Certificação Ambiental, PUC – RS. Porto Alegre, 1998.

MALYSZ, R. Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação. Dissertação (Mestrado), 166p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

MOTTA, L. M. G.; FERNANDES, C. Utilização de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação urbana. 12º Reunião anual de pavimentos. Aracaju, 2003.

MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, E. A.; JUCÁ, J. F. T. Estudos para o Dimensionamento de uma Cortina de Argila para Contenção de Contaminantes. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e

Ambiental, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, 1997. Anais. P. 1721-1729.

MORAVIA, W. G. Estudos de caracterização, tratabilidade e condicionamento de lixiviados visando tratamento por lagoas. 161 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG), Belo Horizonte, 2007.

NUNES, K. R. A. Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA M. J. E. de; ASSIS C. S. Estudo da deterioração de concreto proveniente de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. In: 41º Congresso Ibracon. Salvador, 1999. (CD-ROM).

OLIVEIRA M. J. E. de; ASSIS C. S.; TERNI, A. V. *Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures.* Espanha, 2004. p. 636-342.

PALMEIRA, E. M.; & GARDONI, M. G. (2000). Geotêxteis in Filtration: a state of the art review and remaining challenges. International Symposium on Geosynthetics. GeoEng'2000, Melbourne, Australia, pp. 85-110.

PALMEIRA, E. M. (2003). Fatores Condicionantes do Comportamento de Filtros Geotêxteis. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1, Porto Alegre, PP. 49-67.

PARANHOS, H. S., PALMEIRA, E. M., SILVA, A. R. L. Utilização de materiais alternativos em sistema dreno-filtrantes de áreas de disposição de resíduos. Universidade de Brasília, 2003.

PENG, C., et al. *Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. Construction, Management and Economics*, London, n. 15, p. 49-58, 1997.

PINTO, C. S., Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de textos, 2000.

PINTO, T. P. De volta à questão do desperdício. PINI, Nº 2491, p. 18-19. Novembro de 1995.

PINTO, T. P. Gestão ambiental dos resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP. São Paulo: SindusCon, 2005. 45p. São Paulo, 2005.

PINTO, T. P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (Doutorado), 189 p. Departamento de Engenharia Civil, USP. São Paulo, 1999.

PINTO, T. P. Perda de materiais em processos construtivos tradicionais. (Texto datilografado, 33 p.). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1989.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. Critical review and summary of leachate and gas production from landfills: EPA/600/2-86/73. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency. 1986.

PROJETO PROSAB. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras/Luciana Paulo Gomes (coordenadora), Rio de Janeiro. ABES, 2009.

REINHART, D. R.; GROSH, C. J. *Analysis of Florida MSW landfill leachate quality. University of Central Florida*, 1998.

REMÍGIO, A. F. N., 2006. Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbicas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-038/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 134 p.

SANTOS, E. C. G. Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação (Mestrado). EESC/USP, São Carlos, 2007.

SCHNEIDER, D. M. Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Saúde Pública, USP. São Paulo, 2003.

SCHWARZENBACK, R.P.; GSCHWEND, P.M.; IMBODEN, D.M. *Environmental organic chemistry*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

SILVA, T. R. S.; FUCAL, S. P.; GUSMÃO, A. D.; FERREIRA, S. R. M. Estudo da reciclagem do resíduo da construção civil para uso como agregado em estacas de compactação. CITAES – Congresso Internacional de Tecnologia Aplicada para Arquitetura e Engenharia Sustentáveis. Recife-PE, 2008.

SILVEIRA, A. M. M. Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SINDUSCON-SP. PINTO, T. P. et al. São Paulo: Obra Limpa/I&T/SINDUSCON-SP, 48 p. São Paulo, 2005.

SOUZA, P. C. M.; CARNEIRO, F. P.; MONTEIRO, E. C. B.; BARKOKÉBAS JR., B; GUSMÃO, A. D. G. Análise sobre a gestão dos resíduos

sólidos de construção e demolição na região metropolitana do Recife. In: Geo-Jovem – Congresso de Jovens Geotécnicos. São Carlos, 2004. EESC-USP.

SOUZA, I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande-PB, 2007. V.12, n.2, p. 205-212.

SYMONDS. Construction and demolition waste management practices and their economic impact. 1999.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management – engineering principles and management issues*. New York: McGraw – Hill International Editions, 1993.

ULSEN, C. Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição. Dissertação (Mestrado), USP. São Paulo, 2006.

ZORDAN, S. E. A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto. Dissertação (Mestrado), 147 p. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas. Campinas, 1997.

Anexo A

Os resultados dos ensaios de distribuição granulométrica, anteriores ao ensaio de compressão confinada, realizados nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C em termos do percentual retido nas peneiras, do percentual acumulado encontram-se, respectivamente, nas Tabelas A1, A2, A3 e A4. Nas tabelas A5 e A6 estão apresentados os resultados do ensaio de distribuição granulométrica utilizando brita.

Tabela A1 – Amostra 1V: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (kg)	Massa retida acumulada (kg)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	3,31	3,31	11,25	11,25
63,5	8,99	12,30	30,56	41,81
50,8	4,00	16,30	13,60	55,40
38,1	3,39	19,69	11,52	66,93
31,7	3,58	23,27	12,17	79,10
25,4	2,68	25,95	9,11	88,21
19,1	1,90	27,85	6,46	94,66
12,7	1,23	29,08	4,18	98,84
9,25	0,25	29,33	0,85	99,69
6,35	0,03	29,36	0,10	99,80
4,76	0,04	29,40	0,14	99,93
2,38	0,01	29,41	0,03	99,97
Fundo	0,01	29,42	0,03	100,00
TOTAL	29,42			

Tabela A2 – Amostra 2V: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (kg)	Massa retida acumulada (kg)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	0,00	0,00	0,00	0,00
50,8	2,04	2,04	9,44	9,44
38,1	2,99	5,03	13,84	23,29
31,7	3,56	8,59	16,48	39,77
25,4	3,37	11,96	15,60	55,37
19,1	3,05	15,01	14,12	69,49
12,7	2,20	17,21	10,19	79,68
9,25	2,58	19,79	11,94	91,62
6,35	0,33	20,12	1,53	93,15
4,76	0,53	20,65	2,45	95,60
2,38	0,60	21,25	2,78	98,38
Fundo	0,35	21,60	1,62	100,00
TOTAL	21,6			

Tabela A3 – Amostra 1C: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (kg)	Massa retida acumulada (kg)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	6,61	6,61	17,36	17,36
63,5	6,32	12,93	16,60	33,96
50,8	5,82	18,75	15,29	49,25
38,1	6,52	25,27	17,13	66,38
31,7	3,85	29,12	10,11	76,49
25,4	2,75	31,87	7,22	83,71
19,1	2,87	34,74	7,54	91,25
12,7	2,67	37,41	7,01	98,27
9,25	0,40	37,81	1,05	99,32

6,35	0,10	37,91	0,26	99,58
4,76	0,06	37,97	0,16	99,74
2,38	0,05	38,02	0,13	99,87
Fundo	0,05	38,07	0,13	100,00
TOTAL	38,07			

Tabela A4 – Amostra 2C: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (kg)	Massa retida acumulada (kg)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	0,00	0,00	0,00	0,00
50,8	1,57	1,57	6,82	6,82
38,1	5,55	7,12	24,11	30,93
31,7	2,38	9,50	10,34	41,27
25,4	1,02	10,52	4,43	45,70
19,1	1,89	12,41	8,21	53,91
12,7	4,00	16,41	17,38	71,29
9,25	4,54	20,95	19,72	91,01
6,35	1,11	22,06	4,82	95,83
4,76	0,68	22,74	2,95	98,78
2,38	0,20	22,94	0,87	99,65
Fundo	0,08	23,02	0,35	100,00
TOTAL	23,02			

Tabela A5 – Amostra 1B: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (kg)	Massa retida acumulada (kg)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	0,82	0,82	3,85	3,85
50,8	3,36	4,18	15,77	19,62
38,1	7,57	11,75	35,54	55,16
31,7	3,12	14,87	14,65	69,81
25,4	2,17	17,04	10,19	80,00
19,1	1,26	18,30	5,92	85,92
12,7	2,78	21,08	13,05	98,97
9,25	0,22	21,30	1,03	100,00
6,35	0,00	21,30	0,00	100,00
4,76	0,00	21,30	0,00	100,00
2,38	0,00	21,30	0,00	100,00
Fundo	0,00	21,30	0,00	100,00
TOTAL	21,3			

Tabela A6 – Amostra 2B: Ensaio de distribuição granulométrica anterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (kg)	Massa retida acumulada (kg)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	0,00	0,00	0,00	0,00
50,8	0,00	0,00	0,00	0,00
38,1	8,14	8,14	32,85	32,85
31,7	4,12	12,26	16,63	49,48
25,4	1,90	14,16	7,67	57,14
19,1	1,85	16,01	7,47	64,61
12,7	3,09	19,10	12,47	77,08
9,25	3,61	22,71	14,57	91,65
6,35	1,10	23,81	4,44	96,09

4,76	0,70	24,51	2,82	98,91
2,38	0,24	24,75	0,97	99,88
Fundo	0,03	24,78	0,12	100,00
TOTAL	24,78			

Anexo B

Os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C encontram-se nas Tabelas B1, B2, B3 e B4, em que k é o coeficiente de permeabilidade.

Tabela B1 – Amostra 1V: Resultados do ensaio de permeabilidade

MATERIAL:	Vermelho	Carga hidráulica (cm):	138,5		
AMOSTRA:	1V	Temperatura (°C):	25,5		
Corpo de prova					
DATA:	13/4/2011	Diâmetro (cm):	15,32		
HORA:	16:35	Altura (cm):	16,70		
Béquer	Massa bruta (g)	Tara (g)	Massa água (g)	Δt (s)	k (cm/s)
1	825,67	259,06	566,61	40	9,27E-03
2	806,44	243,02	563,42	40	9,21E-03
3	734,54	165,06	569,48	40	9,31E-03
4	648,70	85,24	563,46	40	9,21E-03
MÉDIA: k (cm s ⁻¹)					9,25E-03

Tabela B2 – Amostra 2V: Resultados do ensaio de permeabilidade

MATERIAL:	Vermelho	Carga hidráulica (cm):	135,8		
AMOSTRA:	2V	Temperatura (°C):	25,5		
Corpo de prova					
DATA:	7/4/2011	Diâmetro (cm):	15,32		
HORA:	11:35	Altura (cm):	16,70		
Béquer	Massa bruta (g)	Tara (g)	Massa água (g)	Δt (s)	k (cm/s)
1	661,13	259,06	402,07	90	2,98E-03
2	637,54	243,02	394,52	90	2,92E-03
3	554,96	165,06	389,90	90	2,89E-03
4	469,61	85,24	384,37	90	2,85E-03

MÉDIA: $k(\text{cm s}^{-1})$ 2,91E-03

Tabela B3 – Amostra 1C: Resultados do ensaio de permeabilidade

MATERIAL:	Cinza	Carga hidráulica (cm):	138,5		
AMOSTRA:	1C	Temperatura (°C):	26,0		
Corpo de prova					
DATA:	13/4/2011	Diâmetro (cm):	15,32		
HORA:	16:49	Altura (cm):	16,70		
Béquers	Massa bruta (g)	Tara (g)	Massa água (g)	Δt (s)	k (cm/s)
1	826,78	259,06	567,72	40	9,28E-03
2	811,89	243,02	568,87	40	9,30E-03
3	739,12	165,06	574,06	40	9,39E-03
4	653,87	85,24	568,63	40	9,30E-03
MÉDIA: k (cm s ⁻¹)					9,30E-03

Tabela B4 – Amostra 2C: Resultados do ensaio de permeabilidade

MATERIAL:	Cinza	Carga hidráulica (cm):	135,8		
AMOSTRA:	2C	Temperatura (°C):	26,0		
Corpo de prova					
DATA:	12/4/2011	Diâmetro (cm):	15,32		
HORA:	16:35	Altura (cm):	16,70		
Béquers	Massa bruta (g)	Tara (g)	Massa água (g)	Δt (s)	k (cm/s)
1	871,05	259,06	611,99	55	7,42E-03
2	836,87	243,02	593,85	55	7,20E-03
3	767,76	165,06	602,70	55	7,31E-03
4	680,20	85,24	594,96	55	7,22E-03
MÉDIA: k (cm s ⁻¹)					7,29E-03

Anexo C

Os resultados dos ensaios de compressão confinada, incluindo o módulo de compressibilidade secante determinado em cada leitura, realizados nas amostras 1V, 2V, 1C, 2C, 1B e 2B estão organizados nas Tabelas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.

Tabela C1 – Amostra 1V: Ensaio de compressão confinada

MATERIAL:		Vermelho		AMOSTRA:		1V	
Data:		13/4/2011		Hora:		16:49	
				K anel		0,584	kg/div
				K ext.		0,01	mm/div
Corpo de prova				Peso <i>tampa superior</i>		13,19	kg
Diâm. (cm):		15,32					
Altura (cm):		16,7		Diâm. <i>tampa superior</i>		15,27	cm
Leit. força (div)	Força (kgf)	Tensão (KPa)	Leitura extens. (div)	h (cm)	ϵ (%)	D_{secante} (kPa)	
0	13,19	7,07	100	16,70	0,00		
30	30,71	16,45	119	16,68	-0,11	8249	
60	48,23	25,84	156	16,64	-0,34	5597	
90	65,75	35,22	221	16,58	-0,72	3886	
120	83,27	44,61	284	16,52	-1,10	3407	
150	100,79	53,99	313	16,49	-1,28	3679	
180	118,31	63,38	345	16,46	-1,47	3838	
210	135,83	72,76	398	16,40	-1,78	3682	
240	153,35	82,15	421	16,38	-1,92	3906	
270	170,87	91,53	454	16,35	-2,12	3985	
300	188,39	100,92	487	16,31	-2,32	4050	
450	275,99	147,84	642	16,16	-3,25	4338	
600	363,59	194,77	775	16,03	-4,04	4644	
750	451,19	241,69	1019	15,78	-5,50	4264	
900	538,79	288,62	1229	15,57	-6,76	4165	
1050	626,39	335,54	1586	15,21	-8,90	3691	
1200	713,99	382,47	1669	15,13	-9,40	3996	
1350	801,59	429,39	1897	14,90	-10,76	3925	
1500	889,19	476,32	1942	14,86	-11,03	4254	

Tabela C2 – Amostra 2V: Ensaio de compressão confinada

MATERIAL:	Vermelho			AMOSTRA:	2V	
Data:	12/4/2011			Hora:	16:10	
				K anel	0,584	kg/div
				K ext.	0,01	mm/div
Corpo de prova	15,32			Peso <i>tampa superior</i>	13,19	kg
Diâm. (cm):				Diâm. <i>tampa superior</i>	15,27	cm
Altura (cm):	16,7					
Leit. Força (div)	Força (kgf)	Tensão (KPa)	Leitura extens. (div)	h (cm)	ε (%)	D _{secante} (kPa)
0	13,19	7,07	100	16,70	0,00	
30	30,71	16,45	117	16,68	-0,10	9219
60	48,23	25,84	136	16,66	-0,22	8707
90	65,75	35,22	192	16,61	-0,55	5111
120	83,27	44,61	272	16,53	-1,03	3645
150	100,79	53,99	328	16,47	-1,37	3437
180	118,31	63,38	404	16,40	-1,82	3093
210	135,83	72,76	468	16,33	-2,20	2981
240	153,35	82,15	526	16,27	-2,55	2943
270	170,87	91,53	576	16,22	-2,85	2963
300	188,39	100,92	630	16,17	-3,17	2957
450	275,99	147,84	897	15,90	-4,77	2950
600	363,59	194,77	1137	15,66	-6,21	3023
750	451,19	241,69	1400	15,40	-7,78	3014
900	538,79	288,62	1654	15,15	-9,31	3026
1050	626,39	335,54	1828	14,97	-10,35	3175
1200	713,99	382,47	2039	14,76	-11,61	3233
1350	801,59	429,39	2175	14,63	-12,43	3399
1500	889,19	476,32	2412	14,39	-13,84	3389

Tabela C3 – Amostra 1C: Ensaio de compressão confinada

MATERIAL:	Cinza	AMOSTRA:	1C
Data:	13/4/2011	Hora:	15:52
		K anel	0,584 kg/div
		K ext.	0,01 mm/div
Corpo de prova	15,32	Peso <i>tampa</i>	13,19 kg

Diâm. (cm):		<i>superior</i>				
Altura (cm):		16,7	Diâm. <i>tampa superior</i>		15,27	cm
Leit. Força (div)	Força (kgf)	Tensão (KPa)	Leitura extens. (div)	h (cm)	ϵ (%)	D _{secante} (kPa)
0	13,19	7,07	100	16,70	0,00	
30	30,71	16,45	119	16,68	-0,11	8249
60	48,23	25,84	129	16,67	-0,17	10809
90	65,75	35,22	138	16,66	-0,23	12373
120	83,27	44,61	155	16,65	-0,33	11399
150	100,79	53,99	188	16,61	-0,53	8905
180	118,31	63,38	208	16,59	-0,65	8707
210	135,83	72,76	229	16,57	-0,77	8505
240	153,35	82,15	263	16,54	-0,98	7692
270	170,87	91,53	296	16,50	-1,17	7197
300	188,39	100,92	318	16,48	-1,31	7189
450	275,99	147,84	455	16,35	-2,13	6622
600	363,59	194,77	598	16,20	-2,98	6294
750	451,19	241,69	694	16,11	-3,56	6596
900	538,79	288,62	936	15,86	-5,01	5624
1050	626,39	335,54	1025	15,78	-5,54	5930
1200	713,99	382,47	1152	15,65	-6,30	5959
1350	801,59	429,39	1227	15,57	-6,75	6258
1500	889,19	476,32	1474	15,33	-8,23	5703

Tabela C4 – Amostra 2C: Ensaio de compressão confinada

MATERIAL:		Cinza		AMOSTRA:		2C
Data:		12/4/2011		Hora:		17:02
				K anel		0,584 kg/div
				K ext.		0,01 mm/div
Corpo de prova		15,32		Peso <i>tampa superior</i>		13,19 kg
Diâm. (cm):				Diâm. <i>tampa superior</i>		15,27 cm
Altura (cm):		16,7				
Leit. Força (div)	Força (kgf)	Tensão (KPa)	Leitura extens. (div)	h (cm)	ϵ (%)	D _{secante} (kPa)
0	13,19	7,07	100	16,70	0,00	
30	30,71	16,45	126	16,67	-0,16	6028
60	48,23	25,84	156	16,64	-0,34	5597

90	65,75	35,22	181	16,62	-0,49	5805
120	83,27	44,61	220	16,58	-0,72	5224
150	100,79	53,99	251	16,55	-0,90	5190
180	118,31	63,38	276	16,52	-1,05	5343
210	135,83	72,76	297	16,50	-1,18	5569
240	153,35	82,15	331	16,47	-1,38	5428
270	170,87	91,53	350	16,45	-1,50	5642
300	188,39	100,92	381	16,42	-1,68	5578
450	275,99	147,84	491	16,31	-2,34	6013
600	363,59	194,77	640	16,16	-3,23	5805
750	451,19	241,69	769	16,03	-4,01	5857
900	538,79	288,62	891	15,91	-4,74	5944
1050	626,39	335,54	1023	15,78	-5,53	5943
1200	713,99	382,47	1149	15,65	-6,28	5976
1350	801,59	429,39	1264	15,54	-6,97	6059
1500	889,19	476,32	1411	15,39	-7,85	5977

Tabela C5 – Amostra 1B: Ensaio de compressão confinada

MATERIAL:	Brita		AMOSTRA:	1B		
Data:	06/10/2011		Hora:	15:35		
			K anel	0,30024	kg/div	
			K ext.	0,01	mm/div	
Corpo de prova	15,32		Peso <i>tampa superior</i>	13,19	kg	
Diâm. (cm):			Diâm. <i>tampa superior</i>	15,27	cm	
Altura (cm):	16,7					
Leit. Força (div)	Força (kgf)	Tensão (KPa)	Leitura extens. (div)	h (cm)	ε (%)	D _{secante} (kPa)
0	13,19	7,07	225	16,70	0,00	
30	22,20	11,89	231	16,69	-0,04	13429
60	31,20	16,72	240	16,69	-0,09	10744
90	40,21	21,54	245	16,68	-0,12	12086
120	49,22	26,37	254	16,67	-0,17	11114
150	58,23	31,19	262	16,66	-0,22	10889
180	67,23	36,02	266	16,66	-0,25	11792
210	76,24	40,84	271	16,65	-0,28	12262
240	85,25	45,66	279	16,65	-0,32	11937
270	94,25	50,49	285	16,64	-0,36	12086
300	103,26	55,31	290	16,64	-0,39	12396

450	148,30	79,44	297	16,63	-0,43	16787
600	193,33	103,56	308	16,62	-0,50	19416
750	238,37	127,69	312	16,61	-0,52	23154
900	283,41	151,81	327	16,60	-0,61	23699
1050	328,44	175,94	336	16,59	-0,66	25407
1200	373,48	200,06	339	16,59	-0,68	28272
1350	418,51	224,19	340	16,59	-0,69	31530
1500	463,55	248,31	344	16,58	-0,71	33856

Tabela C6 – Amostra 2B: Ensaio de compressão confinada

MATERIAL:		Brita		AMOSTRA:		2B	
Data:		06/10/2011		Hora:		16:02	
				K anel		0,30024	kg/div
				K ext.		0,01	mm/div
Corpo de prova		15,32		Peso <i>tampa superior</i>		13,19	kg
Diâm. (cm):				Diâm. <i>tampa superior</i>		15,27	cm
Altura (cm):		16,7					
Leit. Força (div)	Força (kgf)	Tensão (KPa)	Leitura extens. (div)	h (cm)	ε (%)	D _{secante} (kPa)	
0	13,19	7,07	15	16,70	0,00		
30	22,20	11,89	17	16,70	-0,01	40288	
60	31,20	16,72	21	16,69	-0,04	26859	
90	40,21	21,54	36	16,68	-0,13	11511	
120	49,22	26,37	52	16,66	-0,22	8711	
150	58,23	31,19	70	16,65	-0,33	7325	
180	67,23	36,02	85	16,63	-0,42	6907	
210	76,24	40,84	95	16,62	-0,48	7050	
240	85,25	45,66	105	16,61	-0,54	7162	
270	94,25	50,49	116	16,60	-0,60	7180	
300	103,26	55,31	125	16,59	-0,66	7325	
450	148,30	79,44	132	16,58	-0,70	10330	
600	193,33	103,56	139	16,58	-0,74	12996	
750	238,37	127,69	146	16,57	-0,78	15377	
900	283,41	151,81	167	16,55	-0,91	15903	
1050	328,44	175,94	200	16,52	-1,11	15244	
1200	373,48	200,06	219	16,50	-1,22	15799	
1350	418,51	224,19	231	16,48	-1,29	16787	
1500	463,55	248,31	253	16,46	-1,43	16928	

Anexo D

Os resultados dos ensaios realizados de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada nas amostras de RCD 1V, 2V, 1C e 2C em termos do percentual retido nas peneiras, do percentual acumulado, encontram-se, respectivamente, nas Tabelas D1, D2, D3 e D4. Nas Tabelas D5 e D6 estão apresentados os resultados do ensaio de distribuição granulométrica utilizando brita.

Tabela D1 – Amostra 1V: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	480,88	480,88	16,30	16,30
50,8	624,26	1105,14	21,17	37,47
38,1	298,47	1403,61	10,12	47,59
31,7	609,82	2013,43	20,68	68,26
25,4	377,43	2390,86	12,80	81,06
19,1	209,42	2600,28	7,10	88,16
12,7	231,93	2832,21	7,86	96,02
9,25	77,23	2909,44	2,62	98,64
6,35	13,47	2922,91	0,46	99,10
4,76	9,86	2932,77	0,33	99,43
2,38	8,30	2941,07	0,28	99,72
Fundo	8,39	2949,46	0,28	100,00
TOTAL	2949,46			

Tabela D2 – Amostra 2V: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	0,00	0,00	0,00	0,00
50,8	0,00	0,00	0,00	0,00
38,1	640,10	640,10	18,39	18,39
31,7	435,74	1075,84	12,52	30,91
25,4	628,23	1704,07	18,05	48,96
19,1	363,38	2067,45	10,44	59,39
12,7	482,38	2549,83	13,86	73,25
9,25	319,10	2868,93	9,17	82,42
6,35	181,57	3050,50	5,22	87,64
4,76	139,76	3190,26	4,02	91,65
2,38	114,47	3304,73	3,29	94,94
Fundo	176,14	3480,87	5,06	100,00
TOTAL	3480,87			

Tabela D3 – Amostra 1C: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	1199,94	1199,94	34,57	34,57
50,8	0,00	1199,94	0,00	34,57
38,1	588,83	1788,77	16,97	51,54
31,7	414,64	2203,41	11,95	63,48
25,4	296,33	2499,74	8,54	72,02
19,1	417,04	2916,78	12,02	84,04
12,7	451,41	3368,19	13,01	97,04
9,25	68,78	3436,97	1,98	99,02
6,35	13,14	3450,11	0,38	99,40
4,76	9,31	3459,42	0,27	99,67
2,38	6,99	3466,41	0,20	99,87

Fundo	4,44	3470,85	0,13	100,00
TOTAL	3470,85			

Tabela D4 – Amostra 2C: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0,00	0,00	0,00	0,00
76,2	0,00	0,00	0,00	0,00
63,5	0,00	0,00	0,00	0,00
50,8	310,31	310,31	7,88	7,88
38,1	698,52	1008,83	17,74	25,62
31,7	385,59	1394,42	9,79	35,41
25,4	146,80	1541,22	3,73	39,14
19,1	302,28	1843,50	7,68	46,81
12,7	759,13	2602,63	19,28	66,09
9,25	865,27	3467,90	21,97	88,06
6,35	227,06	3694,96	5,77	93,83
4,76	133,58	3828,54	3,39	97,22
2,38	53,19	3881,73	1,35	98,57
Fundo	56,26	3937,99	1,43	100,00
TOTAL	3937,99			

Tabela D5 – Amostra 1B: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0	0	0,00	0,00
76,2	0	0	0,00	0,00
63,5	650	650	13,46	13,46
50,8	0	650	0,00	13,46
38,1	680	1330	14,08	27,54
31,7	600	1930	12,42	39,96
25,4	600	2530	12,42	52,38
19,1	590	3120	12,22	64,60
12,7	1450	4570	30,02	94,62
9,25	170	4740	3,52	98,14

6,35	60	4800	1,24	99,38
4,76	30	4830	0,62	100,00
2,38	0	4830	0,00	100,00
Fundo	0	4830	0,00	100,00
TOTAL	4830			

Tabela D6 – Amostra 2B: Ensaio de distribuição granulométrica posterior ao ensaio de compressão confinada

Peneira (abertura da malha, mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% retida (massa)	% retida acumulada (massa)
101,6	0	0	0,00	0,00
76,2	0	0	0,00	0,00
63,5	0	0	0,00	0,00
50,8	0	0	0,00	0,00
38,1	780	780	14,83	14,83
31,7	1200	1980	22,81	37,64
25,4	350	2330	6,65	44,30
19,1	360	2690	6,84	51,14
12,7	910	3600	17,30	68,44
9,25	900	4500	17,11	85,55
6,35	340	4840	6,46	92,02
4,76	190	5030	3,61	95,63
2,38	150	5180	2,85	98,48
Fundo	80	5260	1,52	100,00
TOTAL	5260			

Anexo E

Nas Tabelas E1, E2, E3 e E4 apresentam-se os resultados das leituras e o cálculo da vazão nas amostras 1V, 2V, 1C e 2C, obtidos no ensaio de colmatção dos RCD pelo lixiviado.

Tabela E1 – Amostra 1V: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD

Data	Coleta	Massa (kg)	Tempo (s)	Vazão ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)	Vazão Média ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)
07/07/11	1	14,70	30,51	4,80	5,11
	2	16,25	30,61	5,29	
	3	16,15	30,60	5,26	
14/07/11	1	17,40	30,71	5,64	5,52
	2	18,60	30,43	6,09	
	3	14,80	30,49	4,83	
21/07/11	1	15,05	29,05	5,16	5,35
	2	16,75	30,45	5,48	
	3	15,55	28,56	5,42	
28/07/11	1	17,25	30,51	5,63	5,71
	2	17,45	30,54	5,69	
	3	17,80	30,45	5,82	
04/08/11	1	16,85	30,23	5,55	5,64
	2	17,15	29,78	5,74	
	3	17,00	30,12	5,62	
11/08/11	1	17,00	30,12	5,62	5,69
	2	16,95	30,24	5,58	
	3	17,90	30,37	5,87	
18/08/11	1	14,25	30,38	4,67	4,77
	2	14,30	30,44	4,68	
	3	15,10	30,30	4,96	
25/08/11	1	16,30	30,60	5,31	5,18
	2	15,45	30,30	5,08	
	3	15,80	30,53	5,15	
01/09/11	1	16,80	30,51	5,48	5,35
	2	15,70	30,60	5,11	
	3	16,60	30,32	5,45	
08/09/11	1	18,80	30,20	6,2	5,93
	2	17,45	30,40	5,72	
	3	17,95	30,41	5,88	
15/09/11	1	15,60	30,50	5,09	5,18
	2	15,90	30,55	5,18	

	3	16,10	30,48	5,26	
22/09/11	1	16,80	30,17	5,55	5,60
	2	17,00	30,20	5,61	
	3	17,20	30,28	5,66	
13/10/11	1	17,00	30,76	5,50	5,71
	2	17,80	30,30	5,85	
	3	17,65	30,45	5,77	
20/10/11	1	14,95	30,39	4,90	5,09
	2	15,60	30,40	5,11	
	3	16,00	30,34	5,25	

Tabela E2 – Amostra 2V: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD

Data	Coleta	Massa (kg)	Tempo (s)	Vazão ($10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$)	Vazão Média ($10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$)
07/07/11	1	16,75	29,50	5,65	5,56
	2	17,55	30,40	5,75	
	3	16,05	30,32	5,27	
14/07/11	1	15,45	30,53	5,04	5,34
	2	16,25	30,49	5,31	
	3	17,30	30,43	5,66	
21/07/11	1	14,40	30,58	4,69	5,11
	2	15,60	30,25	5,14	
	3	16,65	30,20	5,49	
28/07/11	1	14,20	30,44	4,65	5,02
	2	14,75	30,54	4,81	
	3	17,00	30,29	5,59	
04/08/11	1	15,25	30,18	5,03	5,25
	2	16,35	30,68	5,31	
	3	16,50	30,43	5,40	
11/08/11	1	17,10	30,12	5,65	5,80
	2	18,20	30,63	5,92	
	3	18,00	30,81	5,82	
18/08/11	1	15,45	30,17	5,10	5,24
	2	16,10	30,26	5,30	
	3	16,20	30,36	5,31	
25/08/11	1	16,30	30,80	5,27	5,42
	2	16,55	30,28	5,44	
	3	17,00	30,49	5,55	
01/09/11	1	14,50	29,30	4,93	5,02
	2	15,80	30,36	5,18	
	3	15,10	30,42	4,94	
08/09/11	1	14,90	30,17	4,92	5,08
	2	15,50	30,41	5,08	

	3	16,00	30,38	5,25	
15/09/11	1	15,00	30,40	4,91	4,95
	2	15,25	30,17	5,03	
	3	14,95	30,42	4,89	
22/09/11	1	17,00	30,56	5,54	5,46
	2	16,50	30,45	5,40	
	3	16,70	30,55	5,44	
13/10/11	1	16,85	30,33	5,53	5,58
	2	17,20	30,44	5,63	
	3	17,00	30,43	5,56	
20/10/11	1	16,80	30,56	5,48	5,60
	2	17,10	30,12	5,65	
	3	17,50	30,69	5,68	

Tabela E3 – Amostra 1C: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatção dos RCD

Data	Coleta	Massa (kg)	Tempo (s)	Vazão ($10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$)	Vazão Média ($10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$)
07/07/11	1	14,00	30,40	4,59	4,74
	2	15,10	30,63	4,91	
	3	14,40	30,31	4,73	
14/07/11	1	10,00	30,54	3,26	3,94
	2	12,10	30,45	3,96	
	3	14,05	30,34	4,61	
21/07/11	1	13,50	30,63	4,39	4,81
	2	14,90	30,49	4,87	
	3	15,80	30,43	5,17	
28/07/11	1	17,40	30,52	5,68	5,82
	2	18,15	30,50	5,93	
	3	17,75	30,22	5,85	
04/08/11	1	16,45	30,10	5,44	5,71
	2	18,10	30,53	5,90	
	3	17,70	30,57	5,77	
11/08/11	1	14,25	30,08	4,72	4,67
	2	14,50	30,33	4,76	
	3	13,90	30,48	4,54	
18/08/11	1	16,90	30,20	5,57	5,31
	2	16,00	30,82	5,17	
	3	15,85	30,49	5,18	
25/08/11	1	14,75	30,13	4,87	5,10
	2	16,00	30,17	5,28	
	3	15,70	30,45	5,13	
01/09/11	1	18,15	30,32	5,96	5,93
	2	17,80	30,60	5,79	

	3	18,50	30,61	6,02	
08/09/11	1	17,40	30,48	5,68	5,71
	2	17,15	30,58	5,59	
	3	18,15	30,88	5,85	
15/09/11	1	14,60	30,12	4,83	4,84
	2	14,65	30,45	4,79	
	3	15,05	30,56	4,91	
22/09/11	1	15,00	30,34	4,92	4,93
	2	15,00	30,24	4,94	
	3	14,90	30,11	4,93	
13/10/11	1	16,00	30,45	5,23	5,23
	2	16,20	30,66	5,26	
	3	16,20	30,98	5,21	
20/10/11	1	15,00	30,66	4,87	4,93
	2	15,65	30,71	5,08	
	3	14,80	30,37	4,85	

Tabela E4 – Amostra 2C: Vazão de lixiviado no ensaio de colmatação dos RCD

Data	Coleta	Massa (kg)	Tempo (s)	Vazão ($10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$)	Vazão Média ($10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$)
07/07/11	1	15,10	30,50	4,93	5,49
	2	17,80	30,07	5,89	
	3	17,25	30,37	5,66	
14/07/11	1	18,85	30,39	6,18	6,08
	2	17,80	30,34	5,84	
	3	19,30	30,91	6,22	
21/07/11	1	17,95	30,48	5,87	5,54
	2	16,50	30,49	5,39	
	3	16,45	30,49	5,37	
28/07/11	1	17,40	30,00	5,78	6,35
	2	20,60	30,10	6,82	
	3	19,85	30,63	6,45	
04/08/11	1	17,20	30,43	5,63	5,86
	2	18,35	30,53	5,99	
	3	18,15	30,30	5,97	
11/08/11	1	16,20	30,23	5,34	5,44
	2	16,35	30,44	5,35	
	3	17,00	30,12	5,62	
18/08/11	1	18,00	30,43	5,89	5,82
	2	17,40	30,20	5,74	
	3	18,20	31,05	5,84	
25/08/11	1	16,60	30,77	5,37	5,50
	2	16,50	30,35	5,41	

	3	17,30	30,21	5,70	
01/09/11	1	17,00	30,29	5,59	
	2	17,10	30,24	5,63	5,68
	3	17,85	30,55	5,82	
08/09/11	1	17,10	30,12	5,65	
	2	18,00	30,62	5,85	5,77
	3	18,10	31,08	5,80	
15/09/11	1	16,70	30,45	5,46	
	2	16,90	30,23	5,57	5,56
	3	17,20	30,33	5,65	
22/09/11	1	16,20	30,78	5,24	
	2	16,60	30,60	5,40	5,30
	3	16,15	30,56	5,26	
13/10/11	1	17,00	30,58	5,54	
	2	16,85	30,70	5,47	5,50
	3	17,15	31,08	5,50	
20/10/11	1	16,00	30,56	5,21	
	2	16,95	30,19	5,59	5,46
	3	17,00	30,44	5,56	