

ALANE BESSA GUALBERTO

**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL RECICLADOS
COMO AGREGADOS DO CONCRETO EM UM PÁTIO DE COMPOSTAGEM**

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
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Gualberto, Alane Bessa, 1989-

G899a
2017

Avaliação do uso de resíduos da construção civil reciclados
como agregados do concreto em um pátio de compostagem /
Alane Bessa Gualberto. – Viçosa, MG, 2017.
xvii, 105f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Izabel Christina D Almeida Duarte de Azevedo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.97-105.

1. Resíduos como material de construção. 2. Construção
civil. 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.).
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22 ed. 624.15

ALANE BESSA GUALBERTO


**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL RECICLADOS
COMO AGREGADOS DO CONCRETO EM UM PÁTIO DE COMPOSTAGEM**

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 fevereiro de 2017.


Mônica de Abreu Azevedo


Rejane Nascentes


Izabel Christina d Almeida Duarte de Azevedo
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

É tempo de celebrar as conquistas, mas, principalmente, é tempo de agradecer, pois por trás de um triunfo individual, existe o trabalho de uma grande equipe. Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus, fonte de todo o conhecimento, pelo seu imutável amor, pelo dom da vida, por ser meu guia e braço forte, por ter sido muito mais que um amigo ao longo desta jornada.

Aos meus pais e familiares, minha eterna gratidão pelo amor incondicional, conselhos, orações, paciência, incentivo e doação.

Aos mestres, pela dedicação, sabedoria, ensinamentos e auxílio na busca da realização plena dos ideais profissionais e humanos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela bolsa concedida.

À Prof.^a Izabel Azevedo, pela valiosa orientação, dedicação, paciência, conhecimentos transmitidos e, principalmente, pela amizade em todos os momentos desta trajetória.

Aos Professores Enivaldo Minette e Mônica Azevedo, pela colaboração e atenção dispensada sempre que solicitada.

Ao Mirandinha, Renan e Danilo, pela grande contribuição e apoio nas atividades práticas.

Aos funcionários e técnicos do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental, em especial, ao Júlio, Priscila, Agostinho e Capelão, pelo precioso suporte nos ensaios, pelo carinho e amizade consolidados neste período de convivência.

À Prefeitura Municipal de Divinésia, pelo apoio e contribuições ao projeto.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo e momentos compartilhados.

Enfim, a vocês que não mediram esforços para a realização deste sonho, atribuo o mérito desta vitória.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Aspectos gerais.....	01
1.2 Justificativa e objetivos.....	02
1.3 Organização da dissertação.....	04
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	06
2.1 Resíduos da construção civil.....	06
2.1.1 Reciclagem dos resíduos da construção civil.....	09
2.1.1.1 Produtos do processo de reciclagem.....	11
2.1.2 Propriedades dos agregados reciclados e seus efeitos sobre as propriedades do concreto.....	13
2.1.2.1 Composição.....	13
2.1.2.2 Granulometria, teor de finos e de materiais pulverulentos.....	14
2.1.2.3 Forma e textura.....	15
2.1.2.4 Absorção de água.....	15
2.1.2.5 Massa específica.....	16
2.1.2.6 Resistência à compressão.....	16
2.1.2.7 Resistência à abrasão.....	17
2.1.3 Emprego de agregados reciclados na preparação de concreto e pavimentação.....	17
2.1.4 Fatores de degradação do concreto.....	20

2.1.4.1 Fatores mecânicos e físicos.....	21
2.1.4.2 Fatores químicos.....	21
2.1.4.3 Fatores biológicos.....	21
2.2 Usinas de triagem e compostagem.....	22
2.2.1 Estrutura de uma usina de triagem e compostagem.....	23
2.2.1.1 Pátio de compostagem.....	24
2.2.2 Compostagem de resíduos sólidos orgânicos.....	25
2.2.2.1 Temperatura.....	25
2.2.2.2 Umidade.....	27
2.2.2.3 Aeração.....	28
2.2.2.4 pH.....	28
2.2.2.5 Relação carbono/nitrogênio (C/N).....	29
2.2.2.6 Granulometria.....	30
2.2.2.7 Dimensões das leiras.....	30
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Material.....	31
3.1.1 Resíduos de construção civil.....	31
3.1.2 Aglomerante.....	31
3.1.3 Resíduos orgânicos.....	32
3.2 Métodos.....	33
3.2.1 Caracterização dos resíduos de construção civil.....	33
3.2.1.1 Caracterização granulométrica dos agregados de RCC.....	33
3.2.1.1.1 Agregado miúdo.....	33
3.2.1.1.2 Agregado graúdo.....	34
3.2.1.2 Determinação da dimensão máxima característica e do módulo de finura do agregado de RCC.....	35

3.2.1.3 Determinação da massa específica e absorção do agregado de RCC.....	36
3.2.1.3.1 Agregado miúdo.....	36
3.2.1.3.2 Agregado graúdo.....	38
3.2.1.4 Determinação da massa unitária no estado seco e solto.....	39
3.2.1.4.1 Agregado miúdo.....	39
3.2.1.4.2 Agregado graúdo.....	40
3.2.1.5 Determinação da massa unitária no estado seco e compactado.....	40
3.2.1.5.1 Agregado miúdo.....	41
3.2.1.5.2 Agregado graúdo.....	41
3.2.1.6 Quantificação do teor de material pulverulento no agregado de RCC.....	42
3.2.1.7 Quantificação do teor de argila em torrões e materiais friáveis..	43
3.2.1.8 Ensaio de abrasão “ <i>Los Angeles</i> ”.....	44
3.2.1.9 Análise visual do agregado graúdo.....	45
3.2.1.10 Dosagem do concreto.....	45
3.2.1.11 Ensaio de resistência à compressão simples.....	49
3.2.2 Execução do pátio de compostagem com agregado de RCC.....	50
3.2.3 Processo de compostagem.....	54
3.2.3.1 Determinações físicas.....	56
3.2.3.1.1 Temperatura.....	56
3.2.3.1.2 Turbidez.....	57
3.2.3.2 Análises químicas.....	57
3.2.3.2.1 Metais pesados.....	57
3.2.3.3 Análises físico-químicas.....	57

3.2.3.3.1	Teor de umidade.....	57
3.2.3.3.2	Sólidos fixos e voláteis.....	58
3.2.3.3.3	pH.....	58
3.2.3.4	Análises bacteriológicas.....	59
3.2.3.4.1	<i>Escherichia coli</i>	59
3.2.4	Monitoramento da estanqueidade e patologias.....	59
3.2.5	Levantamento de custos da execução do pátio com agregados reciclados.....	60
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		61
4.1	Avaliação das características dos agregados reciclados.....	61
4.1.1	Caracterização granulométrica.....	61
4.1.2	Dimensão máxima característica e módulo de finura.....	63
4.1.3	Massa específica e absorção.....	63
4.1.4	Massa unitária.....	64
4.1.5	Teor de material pulverulento.....	65
4.1.6	Teor de argila em torrões e materiais friáveis.....	65
4.1.7	Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ”.....	65
4.1.8	Análise visual do agregado graúdo.....	65
4.2	Monitoramento do processo de compostagem.....	66
4.2.1	Análises da matéria orgânica.....	66
4.2.1.1	Caracterização da matéria orgânica utilizada nos experimentos	66
4.2.1.2	Temperatura e umidade.....	67
4.2.1.3	pH.....	70
4.2.1.4	Sólidos voláteis e fixos.....	72
4.2.1.5	<i>Escherichia coli</i>	75
4.2.1.6	Metais pesados.....	75

4.2.2 Análises dos efluentes superficiais.....	77
4.2.2.1 Turbidez.....	78
4.2.2.2 Temperatura.....	79
4.2.2.3 pH.....	81
4.2.2.4 <i>Escherichia coli</i>	82
4.2.2.5 Metais pesados.....	83
4.2.3 Análises dos efluentes infiltrados.....	88
4.2.3.1 Turbidez.....	88
4.2.3.2 Temperatura.....	88
4.2.3.3 pH.....	89
4.2.3.4 <i>Escherichia coli</i>	90
4.2.3.5 Metais pesados.....	90
4.3 Monitoramento da estanqueidade e patologias.....	91
4.4 Comparação de custos.....	93
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Processo de reciclagem dos resíduos da construção civil.....	10
Figura 2-2. Tipos de processamento dos RCC nos municípios brasileiros.....	11
Figura 3-1. Resíduos de construção civil reciclados. (a) brita 1 e (b) areia média.....	31
Figura 3-2. UTC de Divinésia. (a) pátio de compostagem e (b) galpão para armazenamento.....	32
Figura 3-3. Esquema do protótipo do pátio de compostagem.....	51
Figura 3-4. Nivelamento e gabaritação do terreno.....	52
Figura 3-5. Execução da base.....	52
Figura 3-6. Colocação dos blocos.....	52
Figura 3-7. Execução da camada drenante.....	53
Figura 3-8. Aplicação da manta geotêxtil.....	53
Figura 3-9. Execução da camada de concreto com agregados reciclados de RCC e instalação das caixas coletoras de água.....	53
Figura 3-10. Pátio finalizado com a aplicação de argamassa.....	54
Figura 3-11. Recepção dos resíduos da UTC de Divinésia.....	55
Figura 3-12. Montagem das leiras (a) Experimento 1 (28/06/2016) e (b) Experimento 2 (30/08/2016).....	55
Figura 4-1. Limite inferior e superior da composição granulométrica do agregado miúdo.....	62
Figura 4-2. Limite inferior e superior da composição granulométrica do agregado graúdo.....	63
Figura 4-3. Temperaturas do Experimento 1.....	68
Figura 4-4. Teores de umidade do Experimento 1.....	68
Figura 4-5. Temperaturas do Experimento 2.....	69
Figura 4-6. Teores de umidade do Experimento 2.....	70
Figura 4-7. Valores de pH do Experimento 1.....	71
Figura 4-8. Valores de pH do Experimento 2.....	72
Figura 4-9. Valores de sólidos voláteis do Experimento 1.....	73
Figura 4-10. Valores de sólidos voláteis do Experimento 2.....	73
Figura 4-11. Valores de sólidos fixos do Experimento 1.....	74

Figura 4-12. Valores de sólidos fixos do Experimento 2.....	74
Figura 4-13. Concentração de metais pesados nos resíduos orgânicos do Experimento 1.....	76
Figura 4-14. Concentração de metais pesados nos resíduos orgânicos do Experimento 2.....	77
Figura 4-15. Turbidez dos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	78
Figura 4-16. Turbidez dos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	79
Figura 4-17. Temperatura dos efluentes superficiais coletados no Experimento 1	80
Figura 4-18. Temperatura dos efluentes superficiais coletados no Experimento 2	80
Figura 4-19. Valores de pH dos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	81
Figura 4-20. Valores de pH dos efluentes superficiais coletados nos Experimentos 2.....	82
Figura 4-21. Concentração de Cu nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	84
Figura 4-22. Concentração de Zn nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	84
Figura 4-23. Concentração de Cr nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	84
Figura 4-24. Concentração de Pb nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	85
Figura 4-25. Concentração de Ni nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	85
Figura 4-26. Concentração de Cd nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.....	85
Figura 4-27. Concentração de Cu nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	86
Figura 4-28. Concentração de Zn nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	86
Figura 4-29. Concentração de Cr nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	86
Figura 4-30. Concentração de Pb nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	87

Figura 4-31. Concentração de Ni nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	87
Figura 4-32. Concentração de Cd nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.....	87
Figura 4-33. Turbidez do efluente infiltrado.....	88
Figura 4-34. Temperaturas do efluente infiltrado.....	89
Figura 4-35. Valores de pH do efluente infiltrado.....	89
Figura 4-36. Fissuras do pátio executado com agregados de RCC.....	92
Figura 4-37. Desagregação do pátio executado com agregados de RCC.....	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1. Classes de resíduos da construção civil.....	07
Quadro 2-2. Produtos reciclados e seus respectivos usos.....	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Composição percentual, em massa, de vários agregados graúdos reciclados.....	13
Tabela 2-2. Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação.....	19
Tabela 2-3. Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.....	19
Tabela 2-4. Destinação final de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos por número de municípios.....	23
Tabela 3-1. Principais características físicas do cimento CP III.....	32
Tabela 3-2. Distribuição granulométrica da fração miúda dos agregados de RCC	34
Tabela 3-3. Distribuição granulométrica da fração graúda dos agregados de RCC.....	35
Tabela 3-4. Dimensão máxima característica e módulo de finura do agregado de RCC.....	35
Tabela 3-5. Absorção e massa específica da fração miúda dos agregados de RCC.....	37
Tabela 3-6. Absorção e massa específica da fração graúda dos agregados de RCC.....	39
Tabela 3-7. Massa unitária no estado seco e solto do agregado miúdo.....	40
Tabela 3-8. Massa unitária no estado seco e solto do agregado graúdo.....	40
Tabela 3-9. Massa unitária no estado seco e compactado do agregado miúdo....	41
Tabela 3-10. Massa unitária no estado seco e compactado do agregado graúdo.	42
Tabela 3-11. Teor de materiais pulverulentos agregado reciclado miúdo.....	43
Tabela 3-12. Teor de argila em torrões e materiais friáveis do agregado miúdo...	43
Tabela 3-13. Perda por abrasão <i>Los Angeles</i> do agregado graúdo.....	44
Tabela 3-14. Análise visual do agregado graúdo.....	45
Tabela 3-15. Consumo de água aproximado (L/m ³).....	46
Tabela 3-16. Volume compactado seco de agregado graúdo por m ³ de concreto.	47
Tabela 3-17. Traços iniciais e corrigidos.....	48
Tabela 3-18. Resistência à compressão.....	49
Tabela 3-19. Parâmetros e frequência de análises da matéria orgânica.....	56

Tabela 3-20. Parâmetros e frequência de análises dos efluentes líquidos coletados.....	56
Tabela 4-1. Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	61
Tabela 4-2. Limites de distribuição granulométrica da fração graúda do agregado de RCC.....	62
Tabela 4-3. Massa unitária.....	64
Tabela 4-4. Caracterização da matéria orgânica.....	66
Tabela 4-5. Resultados das análises de Escherichia coli dos Experimentos 1 e 2	75
Tabela 4-6. Concentração máxima permitida de poluentes em biossólidos.....	77
Tabela 4-7. Resultados das análises de Escherichia coli dos Experimentos 1 e 2	83
Tabela 4-8. Concentrações de metais pesados nos efluentes infiltrados.....	90
Tabela 4-9. Concentrações de metais pesados no efluente infiltrado e superficial no dia 04/10/2016.....	91
Tabela 4-10. Orçamentos ilustrativos de pátios em concreto tradicional, em solo-cimento e com agregados de RCC (R\$/m ²).....	94
Tabela 4-11. Orçamento de uma UTC com pátio em concreto, solo-cimento e com agregados de RCC.....	94

RESUMO

GUALBERTO, Alane Bessa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Avaliação do uso de resíduos da construção civil reciclados como agregados do concreto em um pátio de compostagem.** Orientadora: Izabel Christina d Almeida Duarte de Azevedo. Coorientadores: Eduardo Antônio Gomes Marques e Roberto Francisco de Azevedo.

Os impactos ambientais, sociais e econômicos ocasionados pelos resíduos da construção civil (RCC) e sua inadequada disposição no meio ambiente, impõem a necessidade da adoção de soluções eficazes para a correta gestão desses resíduos. Apesar de existirem políticas públicas disciplinadoras para este setor, nota-se que ainda são poucos os geradores que têm desenvolvido ações para a redução, reutilização, reciclagem e destinação ambientalmente correta, o que implica no desperdício de materiais potencialmente reutilizáveis e recicláveis. Diante disso, neste trabalho procurou-se definir uma aplicação para os resíduos da construção civil. Avaliaram-se as possíveis vantagens técnicas e a redução de custos com a aplicação de agregados reciclados de RCC classe A, na construção de um pátio de compostagem piloto e, comparou-se seu desempenho e custo com pátios executados com concreto tradicional e solo-cimento. Os materiais foram analisados quanto às suas características físicas, químicas e mecânicas, de modo a verificar se atendiam às especificações estabelecidas pelas normas técnicas. Foram avaliados, também, os parâmetros determinantes do processo de compostagem, tais como temperatura, pH, umidade, sólidos fixos e voláteis, a fim de averiguar as possíveis influências das propriedades dos agregados reciclados no desempenho do processo de degradação da matéria orgânica. Por fim, foi realizado um levantamento dos prováveis custos com a execução de pátios em concreto tradicional, em solo-cimento e com agregados reciclados, a fim de compará-los. Os resultados obtidos demonstraram que os agregados reciclados, de forma geral, atenderam às especificações estabelecidas pelas normas. Entretanto, o comportamento do pátio executado com agregados reciclados quanto à estanqueidade e resistência mecânica não se mostrou adequado. O pátio executado com solo-cimento apresentou desempenho satisfatório. Quanto aos custos, a adoção de agregados reciclados na confecção do pátio de compostagem piloto proporcionou uma redução

de 18,68% nos valores de implantação, comparado a um pátio em concreto tradicional, podendo representar uma economia significativa na obra de implantação de uma usina de triagem e compostagem. Porém, em relação ao pátio em solo-cimento, o pátio executado com agregados reciclados apresentou menor viabilidade econômica, visto que seu custo superou em 17,77% o custo do pátio em solo-cimento.

ABSTRACT

GUALBERTO, Alane Bessa, M.Sc., Univesidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Evaluation of the use of recycled civil construction waste as concrete's aggregates in a composting yard.** Adviser: Izabel Christina d Almeida Duarte de Azevedo. Co-advisers: Eduardo Antônio Gomes Marques and Roberto Francisco de Azevedo.

The environmental, social and economic impacts caused by civil construction waste (CCW) and its inadequate disposal in the environment, require the adoption of effective solutions for the correct management of this waste. Although there are disciplinary public policies for this sector, just few generators have developed actions to reduce, reuse, recycle and dispose in an environmentally correct way, which implies in the waste of potentially reusable and recyclable materials. Considering the current discussions, in this work was try to define an application for civil construction waste. The possible technical advantages and the cost reduction with the application of recycled aggregates of CCW class A in the construction of a pilot composting yard were evaluated, and their performance and cost were compared with yards built with traditional concrete and soil-cement . The materials were analyzed for their physical, chemical and mechanical characteristics, in order to verify if they met the specifications established by the technical norms. The determinants of the composting process, such as temperature, pH, moisture, fixed and volatile solids, were also evaluated in order to investigate the possible influence of the properties of the recycled aggregates on the performance of the organic matter degradation process. Finally, a survey was carried out of the probable costs with the execution of yards in traditional concrete, in soil-cement and with recycled aggregates, in order to compare them. The results showed that the recycled aggregates, in general, met the specifications established by the standards. However, the behavior of the yard executed with recycled aggregates in terms of watertightness and mechanical strength was not adequate. The yard built with soil-cement presented satisfactory performance. As regards costs, the adoption of recycled aggregates in the construction of the pilot composting yard resulted in a 18.68% reduction in the deployment values, compared to a traditional concrete yard, which could represent a significant saving in the construction work of a sorting and composting. However, in

relation to the yard in soil-cement, the yard executed with recycled aggregates presented less economic viability, since its cost exceeded in 17.77% the cost of the patio in soil-cement.

INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

A construção civil, importante segmento da indústria para o desenvolvimento econômico e social, comporta-se, ainda, como grande geradora de impactos ambientais negativos, tanto pelo consumo de recursos naturais quanto pela modificação da paisagem e geração de resíduos sólidos por novas obras e demolições (PINTO, 2005).

No Brasil, os resíduos provenientes da construção civil têm representado um grave problema ambiental, já que em diversas cidades brasileiras estes constituem de 40% a 70% da massa produzida de resíduos sólidos urbanos (IPEA, 2012a). O crescimento demográfico, o desenvolvimento econômico e a utilização de tecnologias inadequadas têm contribuído para que este percentual aumente cada vez mais.

Diante desta problemática, políticas públicas foram estabelecidas a fim de impulsionar os geradores de resíduos a implementarem medidas que visem à redução, reutilização e reciclagem, quando prioritariamente, a não geração não puder ser alcançada. Entretanto, nota-se que, ainda, é reduzido o número de geradores que têm desenvolvido ações para o correto gerenciamento dos resíduos da construção civil.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), apenas 7% dos municípios brasileiros possuem alguma forma de processamento desses resíduos. Este índice, considerado baixo, demonstra a necessidade de investimentos e pesquisas neste setor, para que os RCC possam ser inseridos novamente nos processos construtivos.

Atualmente, o processo de reciclagem tem sido apontado como uma das principais alternativas para o correto tratamento e destinação dos resíduos da construção civil. Além de minimizar os impactos ambientais, a reciclagem, também,

viabiliza ganhos econômicos e sociais, ao reduzir a extração de matérias-primas e gerar novos empregos.

Os diferentes produtos obtidos no processo de reciclagem têm se mostrado como boas alternativas ao agregado natural em diversas aplicações, como base e sub-base de pavimentos, cobertura primária de vias, agregado para concretos e argamassas, e matéria-prima para a fabricação de tijolos e blocos de concreto ou solo-cimento (FAGURY e GRANDE, 2007).

O que aponta para a possibilidade de aplicação desses materiais como agregados do concreto na execução de pátios de compostagem, locais destinados ao tratamento de resíduos orgânicos, construídos, usualmente, em concreto tradicional, e que exigem grandes áreas devido ao período demandado para a estabilização da matéria orgânica (60 a 120 dias).

Todavia, para isto, é necessário que se obtenha maior conhecimento sobre as propriedades dos produtos gerados pelo processo de reciclagem dos RCC, uma vez que estes podem apresentar composição variada e características diversas, que podem influenciar e comprometer as características do concreto.

1.2 Justificativa e objetivos

Com o estabelecimento da Lei nº 12.305/2010, as cidades brasileiras viram-se pressionadas a adotar métodos mais adequados de tratamento e de disposição dos resíduos sólidos urbanos. Os lixões, antes, amplamente utilizados, começaram a ser substituídos por aterros controlados, aterros sanitários, unidades de reciclagem e usinas de triagem e compostagem (UTCs).

Em virtude da adoção destes novos mecanismos, materiais que anteriormente eram vistos como algo inútil e sem valor, passaram a ser utilizados como matéria prima para a produção de novos artefatos, como é o caso da fração orgânica presente nos resíduos coletados nos logradouros públicos.

Com a implantação das usinas de triagem e compostagem, a fração orgânica, antes descartada, passou a ser submetida a um processo biológico de degradação, resultando em um produto final altamente humificado e estabilizado, sendo o seu uso indicado para a fertilização e condicionamento de solos. Entretanto, nota-se que,

ainda, são poucos os municípios que dispõem dessa forma de tratamento, o que implica no desperdício da fração orgânica presente nos resíduos domésticos.

Com o intuito de viabilizar a instalação de UTCs e de reduzir os custos com sua implantação, Novais (2011) avaliou a utilização de solo-cimento, em substituição ao concreto tradicional, na construção de um pátio de compostagem piloto, tendo em vista que o pátio de uma UTC, por demandar razoável quantidade de concreto, representa uma parcela significativa do investimento total da obra.

Segundo Novais (2011), o pátio em solo-cimento se mostrou eficiente, apresentando um custo de implantação, aproximadamente, 31% menor do que o de um pátio em concreto. Assim, no orçamento global de uma UTC para municípios de até 10.000 habitantes, esta redução representaria uma economia de 7,7% no investimento total da obra.

Considerando a necessidade de destinar corretamente os resíduos da construção civil e a importância de maior conhecimento sobre as propriedades dos agregados gerados a partir desses resíduos, o presente trabalho visa a avaliar as possíveis vantagens técnicas e a redução de custos com a adição de material granular, oriundo de RCC Classe A, em substituição ao agregado natural, na construção de um pátio de compostagem piloto. Propõe-se, também, comparar seu desempenho e custo com pátios construídos com solo cimento e concreto tradicional.

Se comprovadas a eficiência e a viabilidade, o uso de RCC reciclados em substituição ao agregado natural em pátios de UTCs poderá ser uma alternativa potencial para a disposição final desses resíduos, representando, tanto um benefício social (descarte menos impactante no ambiente), quanto econômico. Como, no Brasil, o número de municípios com menos de 20.000 habitantes ultrapassa 68% (IBGE, 2016a), a utilização de RCC poderá proporcionar a estes municípios, com menor capacidade de investimento, redução de custos na implantação de UTCs.

Deste modo, este trabalho, integrante do Projeto de Pesquisa titulado como “Estudo da viabilidade de utilização de agregados de resíduos da construção e demolição em barreiras químicas, pátios de compostagem de UTCs e em sistemas de drenagem”, fomentado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), cuja primeira parte consistiu na caracterização dos agregados

reciclados de RCC, a qual foi executada por Cruz D. e Pereira (2015), tem como objetivos específicos:

- I. Avaliar os agregados reciclados de RCC, caracterizados por Cruz D. e Pereira (2015), quanto às suas características físicas, químicas e mecânicas;
- II. Inspecionar o pátio quanto ao surgimento de patologias no concreto;
- III. Monitorar a estanqueidade do pátio;
- IV. Analisar os efluentes drenados, se existirem, a fim de verificar interferências dos RCC em sua composição;
- V. Avaliar a influência dos RCC no desempenho dos processos de degradação biológica dos resíduos orgânicos;
- VI. Comparar o desempenho do pátio de compostagem construído com RCC com os pátios pilotos executados com solo-cimento e concreto tradicional, realizados por Novais (2011), com base nos resultados dos ensaios e monitoramentos;
- VII. Determinar os custos do pátio piloto com RCC por metro quadrado; e
- VIII. Comparar os custos de execução do pátio com RCC reciclado com os custos de um pátio tradicional em concreto e, com os de um pátio executado com solo-cimento, realizados por Novais (2011).

1.3 Organização da dissertação

A dissertação foi dividida em cinco capítulos, incluindo este de Introdução.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os resíduos da construção civil, e sobre as usinas de triagem e compostagem. Incluem-se alguns conceitos relacionados aos RCC, legislações pertinentes, processo de reciclagem, produtos obtidos nesse processo, suas principais propriedades e influência no preparo de concreto. Quanto às UTCs, são apresentados os aspectos relacionados à sua estrutura, às exigências existentes quanto à construção do pátio de compostagem e os fatores determinantes para o processo de degradação da matéria orgânica.

No Capítulo 3 descrevem-se os materiais e métodos utilizados nos ensaios realizados.

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

E por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões gerais extraídas do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**2.1 Resíduos da construção civil**

Com o crescimento e desenvolvimento das cidades, a indústria da construção civil foi responsável pela geração de um montante expressivo de resíduos sólidos. Estes, dispostos irregularmente no meio e sem qualquer forma de gerenciamento, afetaram significativamente as cidades nos aspectos econômicos, ambientais e sociais, por provocarem a degradação de mananciais, proliferação de agentes transmissores de doenças, ocupação de vias e logradouros públicos, com prejuízo à circulação de pessoas e veículos, além da própria degradação da paisagem urbana (PINTO, 2005).

Diante disso, no final da década de 1970, começaram a surgir, em diversos países do mundo, políticas públicas no sentido de enfrentar tais problemas. Na Alemanha, Coréia e Japão, leis foram instituídas a fim de se estimular o uso de materiais de construção reciclados e recicláveis (BRASILEIRO e MATOS, 2015). Países como a Dinamarca, Inglaterra, República Checa, Itália e França estipularam a cobrança de preços elevados para a deposição de resíduos (BRASILEIRO e MATOS, 2015). Unindo forças a estas leis, práticas como a demolição controlada e triagem obrigatória, também, foram implementadas nesses países (BRASILEIRO e MATOS, 2015).

No Brasil, as políticas públicas voltadas para a regulamentação deste setor começaram a surgir, apenas, no início do século XXI, sendo a primeira norma legal, a Resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), publicada no dia 05 de julho de 2002. Além de definir os resíduos da construção civil como todos aqueles provenientes das atividades de construção, reforma, reparo, demolição, preparação e escavação de terrenos, esta norma também os classificou em quatro classes distintas, estabelecendo, ainda, suas respectivas formas de destinação (CONAMA, 2002) (Quadro 2-1). A Resolução nº 307 estabeleceu, ainda, diretrizes, procedimentos e critérios para a gestão desses resíduos, visando

proporcionar, prioritariamente, a não geração, redução, reutilização e reciclagem dos mesmos (CONAMA, 2002).

Quadro 2-1. Classes de resíduos da construção civil.

CLASSES E DESTINOS DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL				
CLASSE	IDENTIFICAÇÃO	INTEGRANTES	DESTINAÇÃO	OBSERVAÇÃO
A	Reutilizáveis ou recicláveis como agregados.	Areia, argamassa endurecida, componentes cerâmicos, concreto, louça, material de escavação aproveitável, pedras em geral, vegetação e outros.	Reutilizar ou reciclar na forma de agregados, ou encaminhar a aterro de resíduos da construção civil, dispondo de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura.	Após moagem, podem ser utilizados na preparação de argamassa e concreto não estrutural.
B	Recicláveis para outras destinações.	Madeiras, metais, papel e papelão, plásticos, PVC, vidros, sobra de demolição de blocos de concreto com argamassa, gesso e outros.	Reutilizar, reciclar ou encaminhar a áreas de armazenamento temporário, permitindo sua utilização ou reciclagem futura.	Após moagem, podem ser destinados a confecção de base e sub-base de pavimentação, drenos, camadas drenantes, rip-rap e como material de preenchimento de valas. Madeiras podem ser encaminhadas para empresas ou entidades que a utilizem como energético ou matéria prima. Com relação ao gesso cabe ao gerador buscar soluções com o fabricante.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem/recuperação.	Manta asfáltica, manta de lã de vidro, fórmicas e outros.	Armazenar, transportar e destinar em conformidade com normas técnicas específicas.	
D	Resíduos perigosos, como tintas, solventes, óleos e outros resíduos contaminados.	Solvente, lataria contaminada; peças em fibrocimento; efluente, lodo e licor de limpeza de fossa; rolo, pincel, trincha; tintas a base de água e de solvente.	Armazenar, transportar, reutilizar e destinar em conformidade com normas técnicas específicas.	

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA 307/2002; CUNHA JÚNIOR, 2005.

Em 17 de agosto de 2004, entrou em vigor a Resolução CONAMA nº 348, que alterou o art. 3º, item IV, da Resolução nº 307, ao incluir o amianto na classe de resíduos perigosos (Classe D) (CONAMA, 2004).

Somando forças à Resolução CONAMA nº 307, em 2010, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei nº 12.305. Esta Política estabeleceu princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos nas mais diversas atividades, incluindo aqueles gerados a partir da construção civil. Baseada no princípio da responsabilidade compartilhada, a PNRS contribuiu para a intensificação dos processos de reciclagem e reutilização, ao propor o consumo sustentável e o reconhecimento do resíduo como bem econômico e de valor social (BRASIL, 2010; MACHADO, 2013).

No ano de 2011, o CONAMA, por meio da Resolução nº 431, alterou o art. 3º da Resolução nº 307, estabelecendo nova classificação para o gesso, passando este a fazer parte da Classe B (CONAMA, 2011). Cerca de um ano depois, foi publicada a Resolução CONAMA nº 448, com o intuito de se adaptar as normas de gestão dos resíduos da construção civil ao PNRS (CONAMA, 2012).

Concomitantemente à publicação dessas resoluções, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou uma série de normas relativas à área de transbordo, triagem, aterro, bem como à reciclagem dos resíduos da construção civil, disciplinando as diversas atividades relacionadas ao gerenciamento desses resíduos (FAGURY e GRANDE, 2007).

- I. ABNT NBR 15112:2004: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- II. ABNT NBR 15113:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- III. ABNT NBR 15114:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- IV. ABNT NBR 15115:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
- V. ABNT NBR 15116:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Estima-se que nos países desenvolvidos, os resíduos da construção civil correspondam a uma parcela de 20 a 30% da massa total de resíduos sólidos urbanos gerados (BRASILEIRO e MATOS, 2015). Estudos realizados pela Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) apontam que, no Brasil, este índice é ainda maior, da ordem de 40 a 70% (ABRELPE, 2015). Segundo esta Associação, somente no ano de 2014, foram coletadas, nos logradouros públicos, cerca de 45 milhões de toneladas de RCC (ABRELPE, 2015). Apesar da maior parte desses resíduos ser constituída por materiais potencialmente reutilizáveis e recicláveis, tem-se constatado que, ainda, é baixo o índice de processamento dos mesmos, sendo, portanto, elevada a parcela destinada aos aterros (IPEA, 2012a). Tal situação tem implicado no desperdício de materiais nobres e elevados dispêndios para a correta destinação e disposição final desses resíduos (CUNHA JÚNIOR, 2005).

Diante deste cenário, o processo de reciclagem tem se destacado como importante ferramenta para a correta gestão dos resíduos da construção civil, pois, além de reduzir os impactos ambientais, promove, também, vantagens de cunho econômico, ao reduzir a pressão sobre a extração de matérias-primas e custos com áreas de deposição (FAGURY e GRANDE, 2007).

2.1.1 Reciclagem dos resíduos da construção civil

De modo geral, o processo de reciclagem dos resíduos da construção civil constitui-se, basicamente, das seguintes etapas (Figura 2-1):

- I. Triagem e seleção de materiais recicláveis: Nesta etapa, são separados, manualmente, dos resíduos coletados, os materiais que não fazem parte do processo, como plásticos, metais e matéria orgânica.
- II. Homogeneização: Com o auxílio de uma pá-carregadeira, os resíduos segregados são dispostos no alimentador vibratório, dispositivo em que se procede a homogeneização do material, antes de sua passagem pelo britador. Durante este processo, os resíduos são levemente umedecidos, por meio de um sistema de aspersão, a fim de minimizar a geração de poeiras.
- III. Trituração: Passando pelo alimentador vibratório, o material segue para o britador, onde é triturado.

- IV. Extração de materiais metálicos: Após passar pelo britador, o material segue numa esteira transportadora, equipada com separador magnético, procedendo-se, assim, a retirada dos resíduos metálicos que porventura ainda estejam presentes.
- V. Peneiramento: Após a separação dos resíduos metálicos, o material é encaminhado à peneira vibratória, onde é feita a separação do material em granulometrias selecionadas.
- VI. Estocagem: Feito o peneiramento, cada uma das frações é transportada para o seu respectivo pátio de estocagem por meio de uma esteira transportadora (NOGUEIRA et al., 2012; PINTO, 1999).

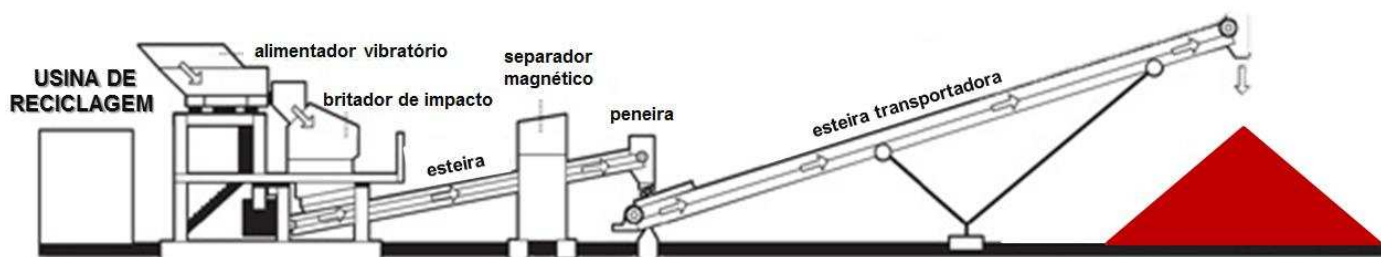


Figura 2-1. Processo de reciclagem dos resíduos da construção civil.

Fonte: Adaptado de Jornal O Dia, 2012.

Brasileiro e Matos (2015), apontam que nos países europeus o processo de reciclagem é altamente difundido, sendo elevada a quantidade dos resíduos coletados submetidos a este processo, a exemplo da Holanda (92%), Bélgica (89%), Dinamarca (81%), Reino Unido (52%) e Áustria (48%).

Quando comparada aos países europeus, a reciclagem dos resíduos da construção civil, no Brasil, encontra-se em atraso. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, dos 5.564 municípios brasileiros, 4.031 (72,44%) possuem serviços de manejo dos RCC (IBGE, 2010). Entretanto, apenas 392 municípios (7%) possuem alguma forma de processamento (IBGE, 2010) (Figura 2-2).

Informação nacional sobre o tipo de processamento entre os 392 municípios brasileiros com serviço de manejo de RCC

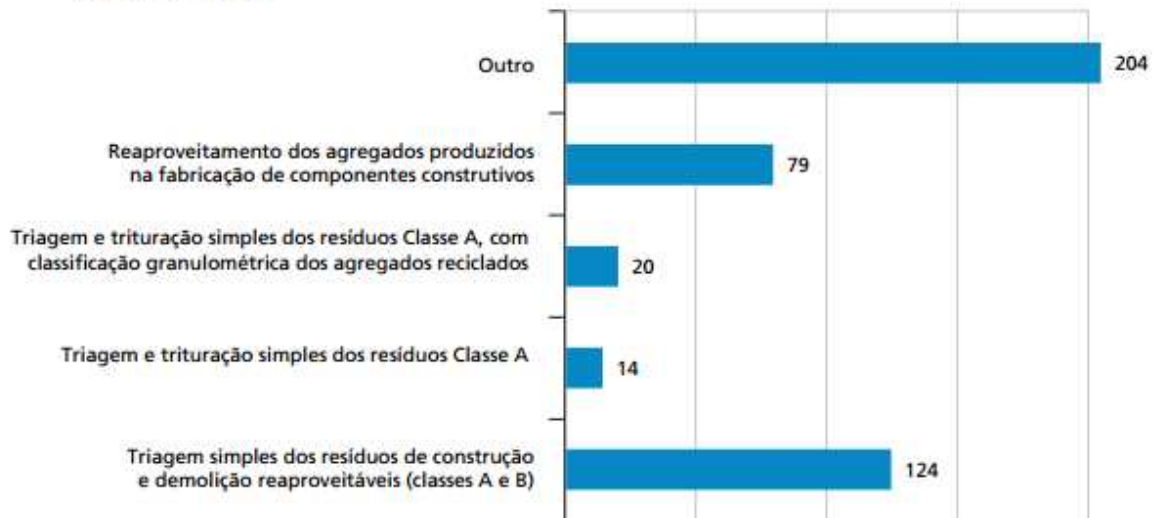


Figura 2-2. Tipos de processamento dos RCC nos municípios brasileiros.

Fonte: IBGE, 2010.

2.1.1.1 Produtos do processo de reciclagem

Produtos distintos, como areia, pedrisco, brita, bica corrida e rachão, podem ser obtidos no processo de reciclagem dos resíduos da construção civil. Estes produtos podem ser utilizados em uma série de aplicações (Quadro 2-2), como na produção de concretos e argamassas, fabricação de artefatos de concreto, base e sub-base de pavimentação, obras de drenagem, entre outros (FAGURY e GRANDE, 2007).

Entretanto, para a aplicação destes produtos, é imprescindível que se conheçam suas características, a fim de averiguar se estas atendem às especificações estabelecidas pelas normas técnicas.

Quadro 2-2. Produtos reciclados e seus respectivos usos.

IMAGEM	PRODUTO	CARACTERÍSTICAS	USO RECOMENDADO
	Areia reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
	Pedrisco reciclado	Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros.
	Brita reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.
	Bica corrida	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, livre de impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm (ou a critério do cliente).	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.
	Rachão	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem.

Fonte: ABRECON, 2014.

2.1.2 Propriedades dos agregados reciclados e seus efeitos sobre as propriedades do concreto

Tendo em vista melhor aplicabilidade dos agregados reciclados nos diversos processos construtivos, o conhecimento de suas propriedades químicas, físicas e mecânicas torna-se indispensável, visto que estas influenciam as características do concreto. Dentre as propriedades mais relevantes, estão a composição, granulometria, forma e textura, absorção de água, massa específica, resistência à compressão e à abrasão.

2.1.2.1 Composição

Por serem provenientes de resíduos com origens diversas, os agregados obtidos pelo processo de reciclagem apresentam elevada heterogeneidade e variabilidade de composição (Tabela 2-1). Dentre os diversos materiais que os constituem, observa-se que as maiores parcelas, em geral, são atribuídas ao concreto, argamassa e material cerâmico (VIEIRA e MOLIN, 2004).

Tabela 2-1. Composição percentual, em massa, de vários agregados graúdos reciclados.

Materiais	Origem					
	Porto Alegre ¹		Usina de Ribeirão Preto/SP ^{2,*}			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D
Argamassa	25,9	30,62	36,8	35,7	37,9	37,4
Concreto	15,9	14,49	19,8	21,6	21,5	21,1
Cerâmica	25,9	26,77	14,6	25,9	23,8	20,8
Rochas	31,9	27,72	27,4	13,4	12,4	17,7
Cerâmica polida	-	-	1,2	2,6	4	2,5
Outros	0,4	0,4	0,2	0,8	0,4	0,5

Fonte: ¹ Leite (2001); ² Zordan (1997).

Nota: * amostras coletadas no período de 26/set/1996 a 30/out/1996.

Fonte: TENÓRIO, 2007.

Materiais como o gesso, vidro, plástico, ou que contenham matéria orgânica, cloretos e sulfatos, podem ser encontrados, também, como constituintes dos agregados reciclados (VIEIRA e MOLIN, 2004). Entretanto, a presença de tais materiais não é desejada e os mesmos são vistos como contaminantes, tendo em

vista as reações adversas que estes podem causar quando aplicados ao concreto. Todavia, são toleráveis quando seus teores condizem com os limites estabelecidos pelas normas técnicas (TENÓRIO, 2007).

Diversos autores ressaltam que há materiais especialmente prejudiciais, como é o caso do gesso e de materiais metálicos (que contêm zinco e alumínio), os quais podem ocasionar fissuras, e dos cloretos, que podem provocar corrosão (HANSEN, 1992).

2.1.2.2 Granulometria, teor de finos e de materiais pulverulentos

A composição granulométrica, definida como o conjunto de todas as frações, incluindo desde as mais finas até as mais grosseiras, é uma propriedade dependente da composição do material de origem e dos processos e equipamentos utilizados em seu beneficiamento (LIMA, 1999; ANGULO, 2000).

Segundo Tenório (2007), os agregados reciclados tendem a apresentar, em sua composição granulométrica, maiores teores de finos (material de granulometria inferior a 0,15 mm) e de materiais pulverulentos (partículas finas com dimensões inferiores a 75 μm) do que os agregados naturais. Isto se deve ao fato de que, além das frações já presentes nos resíduos, antes de seu beneficiamento, grandes quantidades podem ser geradas durante o processo de reciclagem (LIMA, 1999).

Todavia, de acordo com Lima (1999), quando as parcelas finas são retiradas dos agregados reciclados, observa-se que a granulometria dos mesmos se aproxima dos valores encontrados para os agregados naturais, não havendo variações significativas.

Segundo Helene e Terzian (1992), a composição granulométrica tem importante influência sobre o consumo de materiais, compacidade e resistência dos concretos. Mehta e Monteiro (1994) apontam que as dimensões dos agregados são fatores fundamentais para a determinação do consumo de materiais no preparo do concreto, visto que definem a área superficial a ser coberta pela pasta de cimento. Além disso, Azevedo I. e Mesquita (2012) afirmam que o teor de finos e de materiais pulverulentos está intimamente relacionado ao consumo de água e à fissuração do concreto endurecido.

2.1.2.3 Forma e textura

A forma e a textura, relacionadas, respectivamente, às características geométricas dos agregados e ao aspecto de sua superfície, constituem-se em fatores determinantes para as propriedades do concreto (MARTINS, 2008).

Quanto à forma, os agregados são classificados em relação ao comprimento, largura e espessura de suas partículas, podendo apresentar-se dos seguintes modos: arredondado (partículas em que não se observam vértices ou arestas); anguloso (partículas com vértices e arestas bem definidos); lamelar ou achatado (partículas com espessura relativamente pequena em relação às outras dimensões) e; alongado (partículas com comprimento consideravelmente maior em relação às outras dimensões) (MARTINS, 2008; RIBEIRO, 2009). Já quanto à textura, os agregados têm a sua superfície classificada em lisa ou áspera (RIBEIRO, 2009).

Segundo Angulo (2000) e Leite (2001), os agregados reciclados, em geral, tendem a apresentar formas mais angulares e lamelares, e textura mais áspera do que os agregados naturais.

Por requererem maior quantidade de água ou pasta de cimento para produzir misturas adequadas, as partículas angulares e lamelares tendem a prejudicar a consistência e trabalhabilidade do concreto (LEITE, 2001). De igual modo, a textura áspera dos agregados reciclados também exerce influência sobre os mesmos fatores. Por outro lado, segundo Tenório (2007), a textura mais áspera pode proporcionar um aumento na resistência do concreto, uma vez que permite melhor aderência entre o agregado e a pasta de cimento.

2.1.2.4 Absorção de água

A absorção de água, propriedade intimamente relacionada à porosidade, apresenta-se de forma variada nos agregados naturais e reciclados.

Por serem compostos por materiais mais porosos, os agregados reciclados tendem a apresentar taxas de absorção significativas, quando comparados aos agregados naturais (LIMA, 1999).

Diversos estudos têm relacionado a alta taxa de absorção de água, a maior presença de frações de menor granulometria em sua composição (TENÓRIO, 2007).

Segundo Angulo (2000), quanto maior o teor de finos, maior tende a ser a quantidade de argamassa aderida às partículas. Dentre as fases que constituem os agregados reciclados (rochas, concretos/argamassas e cerâmicas), a argamassa constitui-se em uma das mais porosas, o que explica os elevados valores de absorção encontrados para os agregados reciclados (ANGULO, 2000).

A alta taxa de absorção dos agregados influencia a trabalhabilidade do concreto e incide de forma negativa na sua resistência e desgaste por abrasão (OLIVEIRA D. et al., 2016).

2.1.2.5 Massa específica

Definida como a razão entre a massa e o volume do agregado, a massa específica, assim como a absorção de água, é uma propriedade dependente da porosidade (TENÓRIO, 2007). Entretanto, possuem relação inversamente proporcional.

Por serem constituídos por fases mais porosas, os agregados reciclados possuem menor massa específica do que os agregados naturais (LIMA, 1999).

Assim, para um mesmo traço em massa, é necessário maior volume de agregados reciclados em relação aos naturais para a produção do concreto, significando maior consumo de materiais (TENÓRIO, 2007).

2.1.2.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão, propriedade também influenciada pela porosidade, apresenta-se de forma variada nos agregados naturais e reciclados (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os agregados naturais, em geral, tendem a ser mais resistentes do que os reciclados, os quais têm a sua resistência dependente de fatores como composição do material de origem, processos e equipamentos utilizados em seu beneficiamento, entre outros (SOUZA L. et al., 2014).

Em testes realizados por Hansen (1992), a substituição de agregado natural por reciclado na produção de concreto rendeu resultados satisfatórios quanto à resistência à compressão. Neste experimento, o concreto produzido com agregado

reciclado chegou a superar a resistência do concreto produzido apenas com agregados naturais em até 33%. Entretanto, em estudos realizados por Cabral (2007), a resistência do concreto produzido com agregados reciclados foi superada, em até 45%, pela resistência do concreto produzido com agregados naturais.

A diferença de resultados confirma a relação entre a resistência dos agregados reciclados com os fatores mencionados anteriormente.

2.1.2.7 Resistência à abrasão

Definida como a capacidade de um material em resistir ao desgaste superficial provocado pelo contato com outro tipo de material, a resistência à abrasão é uma propriedade indicativa da qualidade do agregado a ser utilizado no concreto (TENÓRIO, 2007). O método mais empregado para a sua determinação é o ensaio americano de abrasão *Los Angeles* que, ao combinar abrasão e atrito, fornece bons resultados sobre o desgaste real, resistência à compressão e à flexão (NEVILLE, 1997).

Quando comparados aos agregados naturais, verifica-se que os agregados reciclados possuem menor resistência ao impacto e ao desgaste por abrasão (LEITE, 2001). Segundo Hansen e Narud (1983 apud TENÓRIO, 2007, p.35), a perda por abrasão dos agregados reciclados tende a ser crescente com o decréscimo da granulometria. Isto porque, as menores frações, por apresentarem maior quantidade de argamassa aderida, tornam-se mais enfraquecidas em relação às demais.

2.1.3 Emprego de agregados reciclados na preparação de concreto e pavimentação

Entre as possíveis aplicações dos agregados reciclados nos processos construtivos está o seu emprego no preparo de concreto sem função estrutural, e nas obras de pavimentação, sendo este regulamentado pela ABNT NBR 15116:2004.

De acordo com esta norma, para estes fins, devem ser utilizados somente agregados provenientes de resíduos classe A, os quais devem ser beneficiados de

forma a atender aos requisitos estabelecidos para os tipos de agregados contemplados pela norma: Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) e Agregado de Resíduo Misto (ARM) (ABNT NBR 15116, 2004).

Os agregados dos tipos ARC e ARM distinguem-se quanto à sua composição. Conforme a norma, os agregados do tipo ARC compreendem aqueles compostos na sua fração gráuda de no mínimo 90% em massa por fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Já os agregados do tipo ARM, são aqueles que têm a sua fração gráuda composta por menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (ABNT NBR 15116, 2004).

A determinação da composição desses agregados se faz por meio de análise visual. Nesta técnica, os fragmentos das amostras de agregados são separados em grupos, segundo os seguintes critérios:

- I. Grupo 1 – fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume;
- II. Grupo 2 – fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume;
- III. Grupo 3 – fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;
- IV. Grupo 4 – fragmentos de origem não mineral, de natureza orgânica como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados, e de contaminantes, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso (ABNT NBR 15116, 2004).

Após a separação, pesam-se as frações de cada grupo, determina-se o valor em porcentagem da massa de cada fração em relação à massa total da amostra e, por fim, classificam-se os agregados em ARC ou ARM. Para que possam ser utilizados nas obras de pavimentação e no preparo de concreto, os agregados reciclados, ARC e ARM, devem atender aos requisitos listados nas Tabelas 2-2 e 2-3.

Tabela 2-2. Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação.

Propriedades	Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado Miúdo
Composição granulométrica	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma	≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características ¹⁾	2	Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas ¹⁾	3	Anexo A	Anexo B
	Sulfatos	2	ABNT NBR 9917	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT NBR 15116:2004.

Tabela 2-3. Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.

Propriedades	Agregado reciclado classe A				Normas de ensaio	
	ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥ 90	-	< 90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1			ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1			ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais ¹⁾	2			Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2			ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3			-	
Teor de material passante na malha 75 μ m (%)	≤ 10	$\leq 15\%$	$\leq 10\%$	$\leq 20\%$	ABNT NBR NM 46	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT NBR 15116:2004.

Além da ABNT NBR 15116:2004, a ABNT NBR 7211:2005 (Agregados para concretos – Especificação) indica algumas especificações para os agregados utilizados no preparo de concreto. Apesar desta norma não se aplicar a agregados obtidos por processos industriais, como subprodutos, e a materiais reciclados, a mesma é utilizada como parâmetro de comparação entre os agregados reciclados e naturais.

Segundo a ABNT NBR 7211:2005, os agregados destinados ao preparo de concreto devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis, limpos, e não devem conter substâncias de natureza nociva em quantidade que possa afetar a hidratação e o endurecimento do cimento e sua durabilidade. Além disso, a norma estabelece as características exigíveis para os agregados miúdos (aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm) e graúdos (aqueles cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm), tendo em vista que qualidade destes incide diretamente na resistência, durabilidade e desempenho do concreto.

2.1.4 Fatores de degradação do concreto

Assim como todo material não inerte, o concreto está sujeito a sofrer alterações ao longo do tempo, em decorrência da interação de diferentes fatores internos e externos, de ordem mecânica, física, química e biológica (AGUIAR, 2006). A interação entre tais fatores é responsável pelo aparecimento de anomalias, como fissuração, desagregação e destacamento, que tendem a comprometer a durabilidade e o desempenho do concreto (AGUIAR, 2006). O conhecimento destes fatores, portanto, se faz indispensável na prevenção do processo de degradação e tratamento das anomalias que porventura possam surgir na estrutura do concreto.

2.1.4.1 Fatores mecânicos e físicos

A degradação do concreto pode ocorrer em virtude de cinco principais fatores mecânicos e físicos, sendo estes: tensões térmicas, deformação por retração, fluência, desgaste por abrasão e erosão.

- I. Tensões térmicas: As tensões térmicas, ocasionadas pela variação de temperatura e resultantes das ações de contração e expansão do concreto, quando restringidas, tendem a provocar fissuras na estrutura.
- II. Deformação por retração: Provocada, principalmente, pela perda de água presente na pasta de cimento ou argamassa, a deformação por retração pode ocasionar modificações no concreto.
- III. Fluência: A fluência, definida como deformação lenta, acarretada por um carregamento contínuo, tende a gerar, por meio do processo de fadiga, fissuras e rupturas no concreto.
- IV. Desgaste por abrasão: Ocasionado pelos movimentos de fricção, enrolamento e escorregamento, o desgaste por abrasão, da superfície do concreto, pode provocar deformações como fissuras e rupturas.
- V. Erosão: Definida como o desgaste provocado pela passagem de fluidos abrasivos, a erosão é um dos principais fatores causadores de degradação em estruturas em que há escoamento de águas (AGUIAR, 2006).

2.1.4.2 Fatores químicos

Dentre os principais fatores químicos de degradação do concreto estão o ataque de sulfatos, reação álcali-agregado e o ataque por ácidos, sendo estes detalhados no que se segue.

- I. Ataque de sulfatos: Quando presentes nos materiais que compõem o concreto ou nas águas que permanecem em contato com o mesmo, os sulfatos, devido à sua ação expansiva, geram tensões que acarretam no fissuramento do concreto.
- II. Reação álcali-agregado: Certos agregados ao reagirem com substâncias como o potássio, sódio e hidróxido de cálcio, formam um gel em volta de si.

Quando exposto à umidade, este gel passa a ter ação expansiva, criando tensões internas, que promovem fissuras na estrutura do concreto.

- III. Ataque por ácidos: Em ambientes úmidos, gases ácidos, como o dióxido de carbono e o dióxido de enxofre, presentes na atmosfera, tendem a atacar o concreto, diminuindo sua resistência e promovendo, conseqüentemente, sua desagregação (AGUIAR, 2006).

2.1.4.3 Fatores biológicos

Considerado como o agente mais agressivo, o fator biológico conta com a participação de microrganismos como as algas, líquens, fungos, bactérias e protozoários, nos processos de degradação do concreto (SILVA e PINHEIRO, 2005).

A degradação provocada pelos microrganismos está relacionada principalmente aos produtos gerados durante seu metabolismo, os quais apresentam caráter ácido. Ao entrar em contato com os elementos minerais do concreto, os ácidos excretados pelos microrganismos, além de promover a dissolução e alteração dos mesmos, podem, também, ser convertidos em sais, gerando tensões e esfoliações na estrutura do concreto, comprometendo, assim, a sua integridade (AGUIAR, 2006).

2.2 Usinas de triagem e compostagem

Utilizadas no Brasil desde o final da década de 1960, as usinas de triagem e compostagem têm sido consideradas uma opção adequada para a destinação dos resíduos sólidos urbanos, conforme o que preconiza a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o fim dos lixões (VIMIEIRO et al., 2009; BATALHA, 2015).

Além de viabilizar o reaproveitamento dos materiais recicláveis, essas usinas, propiciam, também, a reutilização da matéria orgânica presente nos resíduos coletados, o que contribui para a preservação dos recursos naturais e aumento da vida útil dos aterros (VIMIEIRO et al., 2009; NOVAIS, 2011).

Por demandarem um custo relativamente baixo para sua implantação em comparação às demais formas de disposição de resíduos, as UTCs têm sido

indicadas, principalmente, para os municípios de médio e pequeno porte, em virtude de sua menor arrecadação financeira (VIMIEIRO et al., 2009).

Entretanto, ainda, são poucos os municípios brasileiros que possuem essa forma de disposição e tratamento de resíduos, sendo a maior parcela do resíduo doméstico encaminhada para os lixões, aterros controlados e aterros sanitários (Tabela 2-4), implicando no desperdício de materiais potencialmente recicláveis e reutilizáveis.

Tabela 2-4. Destinação final de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos por número de municípios.

DESTINO FINAL	NÚMERO DE MUNICÍPIOS		PORCENTAGEM DE MUNICÍPIOS (%)	
	2000	2008	2000	2008
Aterro sanitário	810	1.540	14,5	27,7
Aterro controlado	1074	1254	19,3	22,5
Vazadouros a céu aberto (lixão)	3763	2810	54,61	50,5
Unidade de compostagem	157	211	2,8	3,8
Unidade de triagem para reciclagem	248	643	4,5	11,6
Unidade de tratamento para incineração	176	134	3,2	0,6
Vazadouros em áreas alagáveis	33	14	0,6	0,3
Locais não fixos	109	-	2	-
Outra unidade	43	134	0,8	2,4
Total de municípios	5564	5564	-	-

Fonte: Adaptado de IPEA (2012b).

2.2.1 Estrutura de uma usina de triagem e compostagem

De modo geral, uma usina de triagem e compostagem apresenta em sua estrutura os seguintes elementos, segundo Azevedo M. e Cruz M. (2008):

- I. Área de recebimento: local onde são descarregados os resíduos sólidos coletados.

- II. Área de triagem: local em que é feita a separação dos materiais potencialmente recicláveis, rejeitos e matéria orgânica.
- III. Pátio de compostagem: local onde ocorre a degradação e estabilização da matéria orgânica.
- IV. Áreas de prensagem e de armazenamento: locais de processamento dos materiais recicláveis.
- V. Área de estocagem do composto orgânico: local de estoque do composto orgânico produzido até sua comercialização.
- VI. Unidades de apoio: são constituídas por escritório, almoxarifado, copa, cozinha, vestiários, guarita de recepção e vigilância, e instalações sanitárias.
- VII. Unidade de tratamento de efluentes: local em que é feito o tratamento das águas geradas no pátio de compostagem, no aterro de rejeitos e nas instalações hidro sanitárias.
- VIII. Aterro de rejeito: local em que é feita a disposição dos rejeitos provenientes dos processos de triagem e compostagem.

2.2.1.1 Pátio de compostagem

Dentre os itens que compõem uma UTC, o pátio de compostagem constitui-se em um dos elementos mais onerosos. Projetos e orçamentos realizados pelo Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), apontam que o pátio de compostagem pode representar de 15 a 25% do valor total da obra (NOVAIS, 2011).

Isto se deve a grande demanda de área para a deposição dos resíduos orgânicos, os quais podem permanecer no pátio por um período de 60 a 120 dias, conforme o processo de compostagem empregado e, conseqüentemente, a grande quantidade de concreto necessária para a sua construção (NOVAIS, 2011). Pois, segundo a ABNT NBR 6118:2003 (Projeto de estruturas de concreto – procedimento), sua espessura não deve ser inferior a 7,0 cm e sua resistência característica (f_{ck}) deve ser superior a 7,0 MPa. A estipulação de tais valores visa a garantir o bom desempenho do pátio em relação aos quesitos de impermeabilidade

e resistência, tendo em vista a grande movimentação de máquinas e equipamentos, para o despejo e reviramento do material, durante o processo de compostagem.

Um pátio de compostagem é construído de forma similar a pátios comuns de estacionamento e pisos em geral. Portanto, em sua concepção procede-se a gabaritação e nivelamento do local, execução de formas, execução de um fundo de brita, e a concretagem propriamente dita (NOVAIS, 2011).

2.2.2 Compostagem de resíduos sólidos orgânicos

Após a triagem, os resíduos orgânicos presentes no material coletado são direcionados para o pátio, dando-se início, então, ao processo de compostagem.

Definida como um processo aeróbio, controlado por uma população diversificada de microrganismos, a compostagem viabiliza a transformação da matéria orgânica crua em substâncias húmicas (BIDONE e POVINELLI, 1999). O produto final deste processo, comumente conhecido como húmus, apresenta propriedades completamente diferentes do material que lhe deu origem, podendo o mesmo ser utilizado para fins agrícolas (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Por ser um processo microbiológico, a eficiência da degradação dos resíduos sólidos orgânicos é dependente de um conjunto de fatores, como temperatura, umidade, aeração, pH, tipos de compostos existentes, granulometria do material, relação carbono/nitrogênio (C/N) e dimensões das leiras, sendo necessário, portanto, o monitoramento destes (BIDONE, 2001).

2.2.2.1 Temperatura

A temperatura, resultante da atividade metabólica dos microrganismos, é um dos fatores que exerce maior influência sobre a eficiência do processo de degradação da matéria orgânica, visto à sua estreita relação com o crescimento microbiano (AZEVEDO M., 2004).

Como os microrganismos liberam calor durante o processo de degradação, por meio da aferição da temperatura é possível verificar em que estágio se encontra o processo de compostagem, na fase mesofílica (temperaturas até 40-45 °C), termofílica (temperaturas acima de 45 °C) ou de maturação (temperaturas próximas

à do ambiente), bem como os possíveis microrganismos presentes, visto que estes se desenvolvem em diferentes faixas de temperatura (AZEVEDO M., 2004).

Logo que os resíduos orgânicos são dispostos em pilhas, inicia-se a degradação dos componentes mais simples da matéria orgânica, como açúcares, proteínas, aminoácidos, amido e gorduras, pela ação dos microrganismos mesófilos (AZEVEDO M., 2004; RODRIGUES et al., 2006). Parte do calor gerado pelo metabolismo desses microrganismos acumula-se no interior da pilha de resíduos (TANG et al., 2004), fazendo com que a temperatura, inicialmente próxima à do ambiente, se eleve a 40-45 °C, em um período de 2 a 3 dias, se as condições ambientais (umidade, aeração, disponibilidade de nutrientes) forem propícias (KIEHL, 1985). Quando a temperatura alcança valores superiores a 45 °C, a comunidade microbiana mesofílica é suprimida por microrganismos termofílicos (TIQUIA, 2005).

Na fase termofílica, a atividade microbiológica se intensifica, havendo a decomposição de compostos orgânicos mais complexos, como a celulose e a hemicelulose, aumentando, portanto, o calor produzido e, conseqüentemente, a temperatura da pilha (OLIVEIRA E. et al., 2008; AZEVEDO M., 2004).

Segundo Azevedo M. (1993), o bom desenvolvimento do processo de compostagem está relacionado, principalmente, à manutenção das temperaturas termófilas, em torno de 55 °C, e à sua distribuição uniforme pela massa de resíduos, pelo maior tempo possível. As elevadas temperaturas alcançadas durante esta fase, além de aumentarem a taxa de decomposição da matéria orgânica, possibilitam, também, a higienização do composto, ao provocarem a morte de eventuais microrganismos patogênicos presentes, como a *Salmonella* e *Escherichia coli* (PEREIRA NETO, 1987; GOLUEKE, 1977; AZEVEDO M., 1993).

Entretanto, se não for controlada durante o processo, a temperatura poderá atingir valores superiores a 75 °C, causando a diminuição da atividade microbiológica e prejuízo ao processo de degradação (MILLER et al., 1982 apud AZEVEDO M., 2004, p.13; WILLSON et al., 1980 apud AZEVEDO M., 2004, p.13). Segundo, Oliveira E. et al. (2008), a fase mesofílica tem sua duração determinada pelas características do material a ser compostado, podendo se prolongar por dias a meses.

À medida que as fontes de carbono vão se esgotando, ocorre diminuição da atividade microbiológica e, conseqüentemente a temperatura também decresce até igualar-se à temperatura ambiente (VINNERAS et al., 2003). Nesta fase, denominada maturação, surgem novamente os microrganismos mesofílicos, que atuarão na degradação de compostos mais resistentes, como a lignina, levando, assim, à obtenção de um produto final maturado, altamente estabilizado (ZUCCONI e BERTOLDI, 1986; TUOMELA et al., 2000).

2.2.2.2 Umidade

Além de permitir as reações bioquímicas de oxidação da matéria orgânica, a dissolução de nutrientes e a assimilação destes pelos microrganismos, o teor de umidade constitui-se em um fator determinante para a manutenção da atividade microbiológica, tendo em vista que, é da massa de resíduos que os microrganismos atuantes no processo de degradação retiram a água necessária para a produção de novas células (AZEVEDO M., 2004; PEREIRA NETO e LELIS, 1999).

Estudos apontam que o teor ideal de umidade para o processo de compostagem varia entre 50 a 60% (AZEVEDO M., 2004). Teores de umidade inferiores a 30% tendem a provocar inibição da atividade microbiológica e diminuição da taxa de estabilização, o que implica na geração de compostos biologicamente instáveis (BERTOLDI et al., 1983; RICHARD et al., 2002). Por outro lado, elevados teores de umidade, acima de 65%, provocam um retardo no processo de degradação, promovem condições de anaerobiose e lixiviação de nutrientes (RICHARD et al., 2002).

Baixos teores de umidade podem ser corrigidos por meio de irrigação, e o excesso pode ser controlado por meio de reviramento do material, sendo este o principal mecanismo de controle de remoção da umidade da pilha (PEREIRA NETO e LELIS, 1999).

Segundo pesquisas realizadas pelo LESA, o material deve ser revirado a cada três dias, durante os trinta dias iniciais da compostagem, e uma vez por semana, até o término da fase ativa (fase em que são registradas temperaturas termófilas), que, em geral, corresponde, aos sessenta dias iniciais do processo (PEREIRA NETO e LELIS, 2001). Não há necessidade de reviramento durante a

fase de maturação do composto, que se prolonga por um período de aproximadamente quarenta dias (PEREIRA NETO e LELIS, 2001).

2.2.2.3 Aeração

A aeração constitui-se no principal mecanismo de controle do processo de compostagem. Ao controlar a quantidade de oxigênio no meio, a aeração determina a condução do processo, se este se dará de forma aeróbia ou anaeróbia; influencia a velocidade de degradação do material; incide sobre as trocas de calor com o meio, determinando os índices de temperatura e umidade; e controla, ainda, a geração de maus odores e de chorume (PEREIRA NETO, 1994; KIEHL, 2004).

2.2.2.4 pH

Devido ao fato dos microrganismos, atuantes no processo de compostagem, viverem em uma ampla faixa de pH, o pH da massa de resíduos não se constitui em um parâmetro crítico para o processo de degradação da matéria orgânica (KLESS, 1986 apud AZEVEDO M., 2004, p.22). Entretanto, tal parâmetro pode ser fundamental para a avaliação do estágio de degradação dos resíduos orgânicos (OLIVEIRA E. et al., 2008).

Segundo Pereira Neto (1987), em seu estágio inicial, em virtude da degradação de compostos carbonáceos complexos em ácidos orgânicos intermediários, a compostagem apresenta pH ligeiramente ácido, com valores próximos de 5. À medida que o processo avança, os resíduos orgânicos são completamente oxidados, transformando-se em compostos mais básicos (OLIVEIRA E. et al., 2008). Desse modo, o pH, antes ácido, passa para a faixa alcalina, atingindo valores de 8 a 9, alcançando, o composto já estabilizado, valores de pH entre 7 e 8 (OLIVEIRA E. et al., 2008).

Todavia, se durante a compostagem houver condições de anaerobiose, o processo de oxidação da matéria orgânica é retardado, com conseqüente acúmulo de ácidos, fazendo com que o pH alcance valores inferiores a 4,5 (OLIVEIRA E. et al., 2008). Quando tal situação ocorre, os microrganismos têm sua atividade limitada, uma vez que os mesmos têm como faixa ótima de desenvolvimento, o pH

entre 6,5 a 8,0 (OLIVEIRA E. et al., 2008). Nestes casos, para que a situação seja normalizada e para que o pH volte a subir, deve-se proceder a aeração das pilhas (OLIVEIRA E. et al., 2008).

2.2.2.5 Relação carbono/nitrogênio (C/N)

Para que ocorra a degradação microbiológica da matéria orgânica é necessário que haja um teor apropriado de nitrogênio e de carbono, visto que os microrganismos envolvidos no processo dependem do carbono, para a obtenção de energia, e do nitrogênio, para a síntese de suas proteínas, crescimento e reprodução (OLIVEIRA E. et al., 2008). O nitrogênio, dessa forma, é o fator limitante do processo (VALENTE et al., 2009).

Estudos apontam que, no início do processo de compostagem, é ideal que a relação C/N esteja entre 25/1 e 35/1, já que os microrganismos atuantes no processo de degradação absorvem C e N da matéria orgânica numa relação de 30/1 (ZUCCONI e BERTOLDI, 1986; KIEHL, 2004). Entretanto, Peixoto (1988), afirma que a quantidade de nitrogênio e carbono exigida, pode variar conforme os tipos de microrganismos e materiais envolvidos no processo.

À medida que o processo de oxidação da matéria orgânica avança, a relação C/N tende a diminuir, situando-se em torno de 18/1 quando o composto atinge a bioestabilização, e em torno de 10/1 quando o composto já está humificado (OLIVEIRA E. et al., 2008).

Dessa forma, o acompanhamento da relação C/N, durante o processo de compostagem, permite melhor conhecimento do estágio de degradação da matéria orgânica (OLIVEIRA E. et al., 2008).

Caso os resíduos a serem compostados não apresentem uma relação C/N ideal, é necessário que se façam correções. Os resíduos com baixa relação C/N tendem a perder nitrogênio na forma amoniacal, o que prejudica a qualidade do composto, e resíduos com alta relação C/N tendem a retardar o processo de compostagem, fazendo com que o produto final apresente menores teores de matéria orgânica (OLIVEIRA E. et al., 2008).

2.2.2.6 Granulometria

A intensidade de degradação microbiológica da matéria orgânica também está relacionada à granulometria das partículas do material a ser compostado (VALENTE et al., 2009). Quanto menor a granulometria, ou seja, quanto mais fragmentado é o material, maior é a área superficial sujeita ao ataque microbiológico e conseqüentemente, maior é a velocidade de oxidação da matéria orgânica e menor é o tempo de duração do processo de compostagem (BERTOLDI et al., 1983; KIEHL, 1985; VALENTE et al., 2009).

Entretanto, estudos apontam que a granulação dos materiais não deve ser muito fina, uma vez que, nessa situação, são poucos os espaços porosos, o que dificulta a difusão de oxigênio pela massa de resíduos e favorece o surgimento de condições de compactação e de anaerobiose, as quais são prejudiciais ao processo de degradação biológica (AZEVEDO M., 2004; RODRIGUES et al., 2006).

2.2.2.7 Dimensões das leiras

O dimensionamento das leiras é também um fator determinante para o bom desempenho do processo de compostagem dos resíduos orgânicos (VALENTE et al., 2009). Segundo Rodrigues et al. (2006), as leiras de compostagem devem ser construídas de modo a impedir a perda de calor e umidade e, de forma a proporcionar uma adequada aeração do material. Assim, recomenda-se que os resíduos orgânicos sejam dispostos conforme as seguintes especificações: largura de 3 a 4 metros; altura não inferior a 1,5 metros (volume insuficiente para manutenção da temperatura adequada) e não superior a 1,8 metros (compromete a aeração da pilha) (OLIVEIRA E. et al., 2008).

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Resíduos de construção civil

Os resíduos de construção civil, utilizados na execução do pátio de compostagem, como agregados do concreto, nas granulometrias de areia média (0,05 a 4,8 mm) e brita 1 (4,75 a 25 mm) (Figura 3-1), foram coletados na Estação de Transbordo de Resíduos Sólidos, na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos, localizada na BR-040, km 531, no bairro Jardim Filadélfia, em Belo Horizonte – Minas Gerais.



Figura 3-1. Resíduos de construção civil reciclados. (a) brita 1 e (b) areia média.

Fonte: CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.1.2 Aglomerante

Para a construção do pátio de compostagem, utilizou-se como aglomerante o Cimento Portland CP III 40 RS, fabricado pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), localizada na cidade de Volta Redonda – Rio de Janeiro.

Composto por 25 – 65% de gesso, 35 – 70% de escória granulada de alto-forno e 0 – 5% de material carbonático, este aglomerante caracteriza-se como resistente a sulfatos, apresentando alta eficiência em aplicações em meios

agressivos (CSN, 2016). Na Tabela 3-1 encontram-se suas principais características físicas.

Tabela 3-1. Principais características físicas do cimento CP III.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				FINURA	TEMPO DE PEGA		EXPANSIBILIDADE	
MPa 3 dias	MPa 7 dias	MPa 28 dias	MPa 91 dias	Resíduo na Peneira 75 µm	Início (horas)	Fim (horas)	À frio (mm)	À quente (mm)
≥ 12	≥ 23	≥ 40	≥ 48	≤ 8,0	≥ 1	≤ 12	≤ 5	≤ 5

Fonte: CSN, 2016.

3.1.3 Resíduos orgânicos

Os resíduos orgânicos utilizados no processo de compostagem foram coletados na Usina de Triagem e Compostagem do município de Divinésia – Minas Gerais (Figura 3-2).

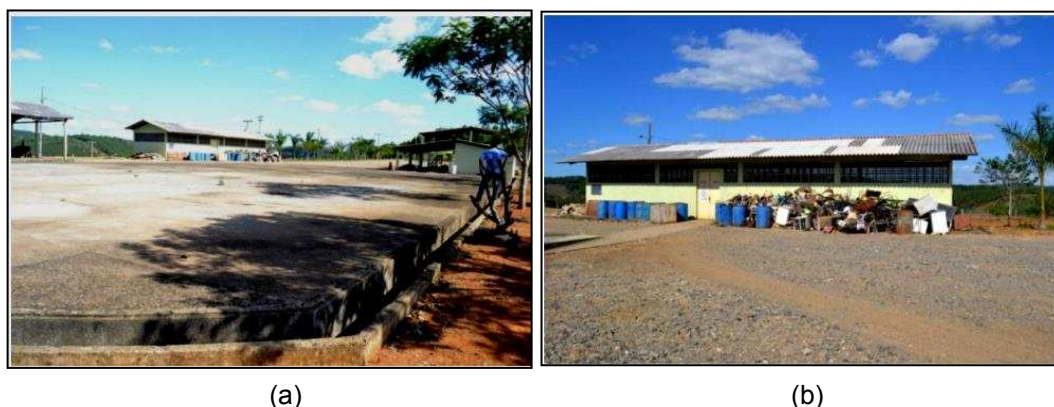


Figura 3-2. UTC de Divinésia. (a) pátio de compostagem e (b) galpão para armazenamento.

Fonte: CONEN, 2014.

Inserido na Mesorregião da Zona da Mata, o município de Divinésia, onde predomina a atividade agropastoril, ocupa uma área de 116.970 km² e conta com uma população de 3.446 habitantes (IBGE, 2016b).

Em novembro de 2007, por meio de uma parceria com o governo estadual, Divinésia inaugurou sua Usina de Triagem e Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos, com capacidade para tratar até 5.000 kg de resíduos/dia (CONEN, 2014).

Situada na zona rural, a usina ocupa uma área de 32.528,75 m², e é composta por: galpão de recepção e triagem, galpão para armazenamento de recicláveis, pátio de compostagem e valas para aterramento do rejeito. O composto

produzido em suas instalações é utilizado pela municipalidade em seus parques e jardins (CONEN, 2014).

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização dos resíduos de construção civil

Após a coleta, os resíduos de construção civil foram transportados em tambores até o Laboratório de Mecânica dos Resíduos do Departamento de Engenharia Civil (DEC-UFV), onde foram analisados por Cruz D. e Pereira (2015), em relação às suas características físicas, químicas e mecânicas.

3.2.1.1 Caracterização granulométrica dos agregados de RCC

Para a caracterização quanto à distribuição granulométrica, os agregados de RCC foram submetidos a ensaio de peneiramento, de acordo com o estabelecido pelas normas ABNT NBR 7211:2005 e ABNT NBR NM 248:2003 (Agregado – Determinação da composição granulométrica).

A amostragem procedeu-se conforme as diretrizes da norma ABNT NBR NM 26:2001 (Agregados – Amostragem), e a sua redução, para a realização dos ensaios em laboratório, foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR NM 27:2001 (Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório).

3.2.1.1.1 Agregado miúdo

Coletou-se uma amostra de aproximadamente 1.000 g que, após secagem em estufa (105-110 °C) até a verificação de massa constante, foi quarteada dando origem a duas novas amostras de massas m_1 e m_2 .

Para a realização do ensaio utilizou-se uma balança com precisão de 0,1 g, peneiras da série normal, com aberturas de 9.5, 4.8, 2.4, 1.2, 0.6, 0.3 e 0.15 mm, duas peneiras da série intermediária com aberturas de 12.5 e 6.3 mm, todas em conformidade com as exigências da norma NM-ISO 3310-1:2010 (Peneiras de

ensaio – Requisitos técnicos e verificação), com fundo e tampa, recipiente metálico e agitador mecânico.

O material foi peneirado por 10 minutos. Após este procedimento, separou-se e pesou-se cada fração do material, obtendo-se, assim, a distribuição granulométrica da fração miúda dos agregados de RCC (Tabela 3-2).

Tabela 3-2. Distribuição granulométrica da fração miúda dos agregados de RCC.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA FRAÇÃO MIÚDA						
Amostra	1	2	1	2	Média	Porcentagem retida e acumulada
Massa inicial (g)	569,6	513,2	Porcentagem retida individual			
Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)					
9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,8	0,96	1,67	0,20	0,30	0,20	0,00
2,4	52,62	57,91	9,20	11,30	10,30	11,00
1,2	78,17	80,42	13,70	15,70	14,70	25,00
0,6	129,55	120,22	22,70	23,40	23,10	48,00
0,3	132,82	114,75	23,30	22,30	22,80	71,00
0,15	88,08	70,65	15,40	13,80	14,60	86,00
Fundo	87,97	67,82	15,40	13,20	14,30	100,00
Massa final (g)	570,17	513,44				
Diferença (%)	0,10	0,04				

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.1.2 Agregado graúdo

Coletou-se uma amostra de aproximadamente 11.000 g que, após secagem em estufa (105-110 °C) até a verificação de massa constante, foi quarteada dando origem a duas novas amostras de massas m_1 e m_2 , de aproximadamente 5.000 g.

Para a realização do ensaio utilizou-se um conjunto de peneiras com aberturas de 32, 25, 19, 12.5, 9.5, 6.3, 4.8 e 2.4 mm, que foram encaixadas e fixadas na mesa vibradora.

O material foi peneirado, então, por um período de 10 minutos, findo o qual separou-se e pesou-se cada fração do material, obtendo-se a distribuição granulométrica para a fração graúda dos agregados de RCC (Tabela 3-3).

Tabela 3-3. Distribuição granulométrica da fração graúda dos agregados de RCC.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA FRAÇÃO GRAÚDA						
Amostra	1	2	1	2	Média	Porcentagem
Massa inicial (g)	5790,0	5680,0				retida
Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)		Porcentagem retida individual			Acumulada
32,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,0	150,00	50,00	2,60	0,90	1,70	2,00
19,0	270,00	470,00	4,60	8,30	6,50	8,00
12,5	2150,00	2490,00	36,90	43,90	40,40	49,00
9,5	2280,00	1930,00	39,20	34,00	36,60	85,00
6,3	680,00	480,00	11,70	8,50	10,10	95,00
4,8	70,00	60,00	1,20	1,10	1,10	96,00
2,4	40,00	40,00	0,70	0,70	0,70	97,00
Fundo	180,00	150,00	3,10	2,60	2,90	100,00
Massa final (g)	5820,00	5670,00				
Diferença (%)	0,52	-0,18				

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.2 Determinação da dimensão máxima característica e do módulo de finura do agregado de RCC

A dimensão máxima característica do agregado de RCC foi determinada pela abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual o agregado apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% (ABNT NBR NM 248, 2003).

O módulo de finura foi obtido por meio do somatório das porcentagens retidas acumuladas em massa de agregado nas peneiras da série normal, sendo o resultado dividido por 100 (ABNT NBR NM 248, 2003).

Os valores encontrados para a dimensão máxima característica do agregado e módulo de finura encontram-se dispostos na Tabela 3-4.

Tabela 3-4. Dimensão máxima característica e módulo de finura do agregado de RCC.

	AGREGADO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	25
Módulo de finura	2,41	2,86

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.3 Determinação da massa específica e absorção do agregado de RCC

A determinação da massa específica e absorção dos agregados de RCC foi realizada conforme o estabelecido pelas normas ABNT NBR NM 52:2003 (Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente) e ABNT NBR NM 53:2003 (Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água).

3.2.1.3.1 Agregado miúdo

Para a realização deste ensaio coletou-se uma amostra de aproximadamente 1 kg do agregado miúdo. A amostra foi lavada e levada à estufa para secagem, a uma temperatura entre 105-110 °C, até a constância de massa, procedendo a sua pesagem.

Em seguida, a amostra foi disposta em um recipiente com água, permanecendo em repouso por 24 horas. Decorrido este tempo, a amostra foi retirada da água e espalhada sobre uma superfície plana, para secagem uniforme e natural.

Após este procedimento, determinou-se a condição saturada superfície seca da fração miúda do agregado, por meio de um molde tronco-cônico e de uma haste de compactação. Para isto, o material foi colocado no interior do molde e compactado suavemente com 25 golpes de haste metálica. Posteriormente, o molde foi colocado na posição vertical para observação da ocorrência de umidade superficial. Repetiu-se este processo até que o material desmoronasse ao ser retirado do molde, indicando, assim, a condição saturada superfície seca.

A absorção do agregado foi calculada por meio da Equação 1.

$$A(\%) = \left(\frac{M_{SSS} - M}{M} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que:

A – Absorção do agregado em porcentagem;

M_{SSS} – Massa do agregado no estado saturado superfície seca, em gramas;

M – Massa do agregado seco em estufa, em gramas.

Alcançada a condição saturada superfície seca, procedeu-se a determinação da massa específica do agregado de RCC. Para isto, tomou-se uma amostra de 500 g do material, que foi disposta em um balão volumétrico, e registrou-se a massa. Posteriormente, o balão foi preenchido com água, completando-se um volume de 500 cm³, sendo o mesmo colocado em banho-maria, a uma temperatura constante de 21±2°C. Decorrida 1 hora, completou-se o balão até a marca de 500 cm³, e determinou-se a massa total em balança com precisão de 0,1 g. O agregado foi retirado do frasco e levado em estufa a 105±5°C até que fosse verificada a condição de massa constante, determinando-se, assim, a massa seca.

A massa específica no estado saturado superfície seca foi calculada por meio da Equação 2:

$$\gamma = \frac{M}{(M_{sss} + M_{pa} + M_{paa}) - \frac{M_{sss} - M}{\rho_a}} \quad (2)$$

em que:

γ – Massa específica do agregado no estado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

M – Massa do agregado seco em estufa, em gramas.

M_{sss} – Massa do agregado no estado saturado superfície seca, em gramas;

M_{pa} – Massa do frasco cheio de água, em gramas;

M_{paa} – Massa do frasco com água e agregado, em gramas;

ρ_a – Massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Os resultados obtidos para a absorção e massa específica da fração miúda dos agregados de RCC, encontram-se dispostos na Tabela 3-5.

Tabela 3-5. Absorção e massa específica da fração miúda dos agregados de RCC.

MASSA ESPECÍFICA SATURADA SUPERFÍCIE SECA E ABSORÇÃO			
Amostra	1	2	Média
(M_{pa}) Massa do frasco + água (g)	649,53	620,45	
(M_{paa}) Massa do frasco + água + agregado (g)	934,28	906,32	
(M_{sss}) Massa do agregado saturado superfície seca (g)	500,01	500,01	
(M) Massa do agregado seco em estufa (g)	464,71	464,44	
(γ) Massa específica do agregado (g cm ⁻³)	2,58	2,60	2,59
(A) Absorção (%)	7,60	7,66	7,63

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.3.2 Agregado graúdo

Tomaram-se duas amostras, de aproximadamente 5 kg, realizando-se os mesmos procedimentos de amostragem descritos para o agregado miúdo. As amostras foram imersas em água, à temperatura ambiente, por um período de 24 ± 4 horas, findo o qual foram retiradas da água e envolvidas em um pano absorvente para eliminação de toda água presente. A pesagem das amostras, em balança com precisão de 1 g, permitiu determinar a massa de agregado graúdo saturado com superfície seca.

Em seguida, as amostras foram colocadas dentro de um cesto de arame, preenchido com água a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, pesadas em balança com precisão de 0,1 g e levadas à estufa, a $105 \pm 5^\circ\text{C}$, para secagem. Quando não mais se verificou variação na massa, as amostras foram retiradas da estufa, deixando-as esfriar, em temperatura ambiente, durante 1 a 3 horas, para que, então, fosse medida a massa seca.

A absorção foi calculada utilizando-se a Equação 1 e a massa específica no estado saturado superfície seca foi determinada com base na Equação 2.

Devido ao tamanho reduzido do cesto de arame, cada amostra foi dividida em duas partes, a fim de que coubesse no cesto e os resultados fossem mais precisos.

Os valores obtidos para a absorção e massa específica da fração graúda dos agregados de RCC, encontram-se dispostos na Tabela 3-6.

Tabela 3-6. Absorção e massa específica da fração graúda dos agregados de RCC.

MASSA ESPECÍFICA SATURADA SUPERFÍCIE SECA E ABSORÇÃO				
Amostras	1		2	
Frações	1	2	1	2
(M_{sss}) Massa do agregado saturado superfície seca (g)	2374,00	2453,00	2633,00	2611,00
$M_{sss\ total}$	4827,00		5244,00	
(M_{paa}) Massa do agregado + cesto submerso (g)	1603,00	1654,00	1761,00	1747,00
$M_{paa\ total}$	3257,00		3508	
(M_{pa}) Massa do cesto + água (g)	273,00	273,00	273,00	273,00
$M_{pa\ total}$	546,00		546,00	
(M) Massa do agregado seco em estufa (g)	4490,00		4870,00	
(γ) Massa específica da amostra (g cm ⁻³)	2,52		2,55	
($\bar{\gamma}$) Massa específica média (g cm ⁻³)			2,53	
(A) Absorção (%)	7,51		7,68	
($A_{MÉDIA}$) Absorção média (%)			7,59	

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.4 Determinação da massa unitária no estado seco e solto

A determinação da massa unitária no estado seco e solto procedeu-se conforme o estabelecido pela norma ABNT NBR NM 45:2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios).

3.2.1.4.1 Agregado miúdo

A massa unitária no estado seco e solto foi determinada utilizando-se um recipiente de volume e peso conhecidos, no qual o material foi despejado até que transbordasse, sendo, em seguida, rasado e pesado. O resultado foi determinado pela divisão da diferença entre a massa total e massa do recipiente pelo volume do recipiente (Tabela 3-7), de acordo com a Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (3)$$

em que:

ρ_{ap} – Massa unitária no estado seco e solto, em quilogramas por metro cúbico;

m_{ar} – Massa do recipiente mais massa do agregado, em quilogramas;

m_r – Massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V – Volume do recipiente, em metros cúbicos.

Tabela 3-7. Massa unitária no estado seco e solto do agregado miúdo.

MASSA UNITÁRIA NO ESTADO SECO E SOLTO			
Determinação	1	2	3
(m_{ar}) Massa do agregado + recipiente (kg)	32,90	33,01	33,01
(m_r) Tara do recipiente (kg)		15,06	
Massa do agregado (kg)	17,84	17,95	17,95
(V) Volume do recipiente (dm ³)		19,82	
(ρ_{ap}) Massa unitária (kg dm ⁻³)	0,90	0,91	0,91
$(\rho_{ap \text{ MÉDIA}})$ Massa unitária média (kg m ⁻³)		900	

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.4.2 Agregado graúdo

O mesmo procedimento empregado na obtenção da massa unitária no estado seco e solto para o agregado miúdo foi utilizado para o agregado graúdo. Na Tabela 3-8 encontram-se os resultados.

Tabela 3-8. Massa unitária no estado seco e solto do agregado graúdo.

MASSA UNITÁRIA NO ESTADO SECO E SOLTO			
Determinação	1	2	3
(m_{ar}) Massa do agregado + recipiente (kg)	39,00	39,11	38,81
(m_r) Tara do recipiente (kg)		15,09	
Massa do agregado (kg)	23,91	24,02	23,72
(V) Volume do recipiente (dm ³)		19,82	
(ρ_{ap}) Massa unitária (kg dm ⁻³)	1,21	1,21	1,20
$(\rho_{ap \text{ MÉDIA}})$ Massa unitária média (kg m ⁻³)		1210	

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.5 Determinação da massa unitária no estado seco e compactado

A determinação da massa unitária no estado seco e compactado foi realizada conforme o estabelecido pela norma ABNT NBR NM 45:2006.

3.2.1.5.1 Agregado miúdo

Em um recipiente de volume conhecido e para o qual se aferiu a massa, despejou-se, gradualmente, em três etapas, um volume correspondente a um terço do volume total do recipiente. Em cada etapa compactou-se o material com 25 golpes de uma haste metálica. Estando o recipiente totalmente preenchido, rasou-se o material e mediu-se a massa total do conjunto. Este ensaio foi realizado em triplicata e o resultado (Tabela 3-9) corresponde à média dos valores determinados com base na seguinte Equação (4):

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (4)$$

em que:

ρ_{ap} – Massa unitária no estado seco e compactado, em quilogramas por metro cúbico;

m_{ar} – Massa do recipiente mais a massa do agregado, em quilogramas;

m_r – Massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V – Volume do recipiente, em metros cúbicos.

Tabela 3-9. Massa unitária no estado seco e compactado do agregado miúdo.

MASSA UNITÁRIA NO ESTADO SECO E COMPACTADO			
Determinação	1	2	3
(m_{ar}) Massa do agregado + recipiente (kg)	5,34	5,36	5,35
(m_r) Tara do recipiente (kg)		2,39	
Massa do agregado (kg)	2,95	2,97	2,96
(V) Volume do recipiente (dm ³)		2,96	
(ρ_{ap}) Massa unitária (kg dm ⁻³)	0,997	1,003	1,000
$(\rho_{ap} \text{ MÉDIA})$ Massa unitária média (kg m ⁻³)		1000	

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.5.2 Agregado graúdo

Seguindo o mesmo procedimento adotado para o agregado miúdo, determinou-se o valor da massa unitária no estado seco e compactado para o agregado graúdo (Tabela 3-10).

Tabela 3-10. Massa unitária no estado seco e compactado do agregado graúdo.

MASSA UNITÁRIA NO ESTADO SECO E COMPACTADO			
Determinação	1	2	3
(m_{ar}) Massa do agregado + recipiente (kg)	26,05	26,20	26,22
(m_r) Tara do recipiente (kg)		6,36	
Massa do agregado (kg)	19,69	19,84	19,86
(V) Volume do recipiente (dm ³)		15,00	
(ρ_{ap}) Massa unitária (kg dm ⁻³)	1,31	1,32	1,32
$(\rho_{ap \text{ MÉDIA}})$ Massa unitária média (kg m ⁻³)		1320	

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.6 Quantificação do teor de material pulverulento no agregado de RCC

A quantificação do teor de material pulverulento seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR NM 46:2003 (Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem).

Para sua determinação, foram tomadas duas amostras com aproximadamente 1.000 g cada uma. O ensaio consistiu na secagem das amostras em estufa à temperatura constante de 110±5 °C, até verificação de massa constante. Em seguida, procedeu-se a imersão das amostras em água, sendo as mesmas agitadas posteriormente para a separação das partículas mais finas do que 75 µm, por meio da suspensão. Após este processo, a água de lavagem contendo os sólidos em suspensão e dissolvidos foi despejada sobre o jogo de peneiras. Dessa forma, o material retido na peneira com abertura de 75 µm foi novamente levado à estufa até verificação de massa constante. Para a determinação do teor de material pulverulento (Tabela 3-11), definido como a média aritmética dos resultados dos ensaios para as duas amostras utilizou-se a Equação 5.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (5)$$

em que:

m – Porcentagem de material passante na peneira 75 µm;

m_i – Massa inicial da amostra seca, em gramas;

m_f – Massa da amostra seca após lavagem, em gramas.

Tabela 3-11. Teor de materiais pulverulentos agregado reciclado miúdo.

MATERIAIS PULVERULENTOS				
Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Materiais pulverulentos (%)	
1	572,51	506,35	11,56	MÉDIA
2	554,23	490,19	11,55	11,56

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.7 Quantificação do teor de argila em torrões e materiais friáveis

Para a quantificação do teor de argila em torrões e materiais friáveis procedeu-se conforme o estabelecido pela norma ABNT NBR 7218:2010 (Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis).

Inicialmente, espalhou-se sobre uma bandeja, uma amostra de agregado miúdo reciclado, com aproximadamente 200 g, de forma a se poder identificar as partículas com aparência de torrões de argila e de materiais friáveis. Após serem pressionados entre os dedos para que os torrões se desfizessem, o material resultante foi novamente peneirado e a fração fina descartada.

O teor de argila em torrões e materiais friáveis foi obtido, então, pela Equação 6, sendo o resultado demonstrado na Tabela 3-12.

$$M_t = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (6)$$

em que:

M_t – Teor de argila em torrões e materiais friáveis, em porcentagem;

M_i – Massa inicial da amostra, em gramas;

M_f – Massa final da amostra.

Tabela 3-12. Teor de argila em torrões e materiais friáveis do agregado miúdo.

TEOR DE ARGILA EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS	
Fração	4,8 a 1,2 mm
(M_i) Massa inicial (g)	271,09
(M_f) Massa final (g)	263,78
(M_t) Teor de argila em torrões (%)	2,70

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.8 Ensaio de abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi realizado conforme o estabelecido pela norma ABNT NBR NM 51:2001 (Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”).

Utilizou-se a graduação B, ou seja: 2.500 g de material que passou na peneira de abertura de malha de 19 mm e que ficou retido na de peneira de 12,5 mm; e 2.500 g de material que passou na peneira de abertura de 12,5 mm e que ficou retido na peneira de 9,5 mm. Depois de separadas, as amostras foram lavadas e secas em estufa, até que se atingisse a constância de massa em duas aferições seguidas. As amostras foram, então, misturadas e colocadas no tambor, juntamente com a carga abrasiva especificada. O ensaio foi realizado a uma velocidade entre 30 e 33 rpm até completar 500 giros. Após este procedimento, o material presente no interior do tambor foi passado na peneira com abertura de malha de 1,7 mm, e a fração retida foi lavada, seca em estufa e pesada. O valor da porcentagem de perda por abrasão (Tabela 3-13) foi calculado de acordo com a seguinte Equação (7):

$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100 \quad (7)$$

em que:

P – Perda por abrasão em porcentagem;

m – Massa da amostra seca, em gramas;

m_1 – Massa do material retido na peneira com abertura de malha de 1,7mm, em gramas.

Tabela 3-13. Perda por abrasão *Los Angeles* do agregado graúdo.

ENSAIO DE ABRASÃO LOS ÁNGELES	
(m) Massa da amostra seca (g)	5000
(m_1) Massa do material retido na peneira de malha de 1,7 mm (g)	2395
(P) Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	52,1

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.9 Análise visual do agregado graúdo

A análise visual do agregado graúdo foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 15116:2004.

Tomaram-se duas amostras de aproximadamente 4 kg do material, que depois de lavadas com água corrente, foram colocadas na estufa, em uma peneira de abertura de malha de 4,8 mm, a uma temperatura de 100 ± 5 °C, por 24 horas. Decorrido esse tempo, cada amostra foi pesada e, de cada uma, separaram-se os fragmentos, segundo os seguintes critérios:

- I. Grupo 1 – fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume;
- II. Grupo 2 – fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume;
- III. Grupo 3 – fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;
- IV. Grupo 4 – fragmentos de origem não mineral, de natureza orgânica como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados, e de contaminantes, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso.

Pesou-se cada fração e determinou-se o valor em porcentagem relativa de cada grupo em relação à amostra total (Tabela 3-14).

Tabela 3-14. Análise visual do agregado graúdo.

ANÁLISE VISUAL	
Grupo 1	43,03%
Grupo 2	40,49%
Grupo 3	15,91%
Grupo 4	0,57%

Fonte: CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

3.2.1.10 Dosagem do concreto

A obtenção da melhor e mais econômica proporção entre os materiais constitutivos do concreto teve por base o método de dosagem da ABCP “Parâmetros de dosagem do concreto” (BOGGIO, 2000).

Definiram-se três valores para a relação água/cimento. A partir desses valores determinou-se a resistência esperada do concreto a ser produzido, para a resistência normal do cimento utilizado.

Conhecendo-se a dimensão máxima característica do agregado graúdo e adotando-se uma faixa de valores para o abatimento do tronco de cone, foi determinado o consumo de água esperado, de acordo com a Tabela 3-15.

Tabela 3-15. Consumo de água aproximado (L/m³).

ABATIMENTO DO TRONCO DO CONE	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm	38 mm
40 a 60 mm	220 L/m³	195 L/m³	190 L/m³	185 L/m³	180 L/m³
60 a 80 mm	225 L/m³	200 L/m³	195 L/m³	190 L/m³	185 L/m³
80 a 100 mm	230 L/m³	205 L/m³	200 L/m³	200 L/m³	190 L/m³

Fonte: QUEMEL, 2015.

Para a quantificação do consumo inicial de cimento, foi utilizada a Equação 8.

$$c = \frac{C_a}{a/c} \quad (8)$$

em que:

C – Consumo de cimento, em quilogramas por metro cúbico;

C_a – Consumo de água, em litros por metro cúbico;

a/c – Relação água/cimento.

A determinação do consumo de agregado graúdo teve por base a Tabela 3-16, onde se encontram os valores de volume compactado seco de agregado por metro cúbico de concreto, em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo.

Tabela 3-16. Volume compactado seco de agregado graúdo por m³ de concreto.

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm	38 mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: QUEMEL, 2015.

Para a quantificação do consumo de agregado graúdo, utilizou-se a seguinte expressão (Equação 9):

$$C_b = V_c \times M_c \quad (9)$$

em que:

C_b – Consumo de agregado graúdo, em quilogramas por metro cúbico;

V_c – Volume compactado seco por metro cúbico de concreto;

M_c – Massa unitária compactada, em quilogramas por metro cúbico.

Para a quantificação do volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto, aplicou-se a seguinte fórmula (Equação 10), considerando os consumos dos outros materiais e suas respectivas massas específicas:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (10)$$

em que:

V_m – volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto;

C – consumo de cimento, em quilogramas por metro cúbico;

ρ_c – massa específica do cimento, em quilogramas por metro cúbico;

C_b – consumo de agregado graúdo por metro cúbico de concreto;

ρ_b – massa específica do agregado graúdo, em quilogramas por metro cúbico;

C_a – consumo de água, em litros por metro cúbico;

ρ_a – massa específica da água, em quilogramas por metro cúbico.

Para a definição do consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto (C_m), utilizou-se a seguinte expressão (Equação 11):

$$C_m = \rho_m \times V_m \quad (11)$$

em que:

C_m – consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto;

ρ_m – massa específica do agregado miúdo, em quilogramas por metro cúbico;

V_m – volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto;

Para a correção do consumo de água na dosagem do concreto, utilizou-se a Equação 12, encontrada no manual “Parâmetros de dosagem de concreto” disponibilizado pela ABCP.

$$C_{ar} = C_{ai} \left(\frac{a_r}{a_i} \right)^{0,1} \quad (12)$$

em que:

C_{ar} – consumo de água requerido, em gramas;

C_{ai} – consumo de água inicial, em gramas;

a_r – abatimento requerido, em centímetros;

a_i – abatimento inicial, em centímetros.

Na apresentação do traço utilizou-se a maneira tradicional, em que a quantidade de cada material é expressa em relação à quantidade de cimento (Tabela 3-17).

Tabela 3-17. Traços iniciais e corrigidos.

		CIMENTO	AREIA	BRITA	ÁGUA
TRAÇO 1	Inicial	1,000	1,952	2,274	0,500
	Corrigido	1,000	1,952	1,935	0,500
TRAÇO 2	Inicial	1,000	2,521	2,728	0,600
	Corrigido	1,000	2,521	2,420	0,600
TRAÇO 3	Inicial	1,000	3,090	3,183	0,700
	Corrigido	1,000	3,090	2,790	0,700

Fonte: Adaptado de CRUZ D.e PEREIRA, 2015.

3.2.1.11 Ensaios de resistência à compressão simples

A determinação da resistência à compressão simples do concreto com agregados de RCC seguiu as recomendações de moldagem e método de ensaio expressas nas normas ABNT NBR 5738:2003 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova) e ABNT NBR 5739:2007 (Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos).

Corpos de prova cilíndricos foram moldados e ensaiados à compressão simples em máquina universal. Foram realizadas duas medidas de diâmetro na metade da altura dos corpos de prova e determinado um valor médio.

Os valores de resistência à compressão simples foram calculados por meio da Equação 13, sendo os resultados obtidos demonstrados na Tabela 3-18.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (13)$$

em que:

f_c – resistência à compressão, em MPa;

F – força máxima alcançada, em N;

D – diâmetro médio, em milímetros.

Tabela 3-18. Resistência à compressão.

	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
TRAÇO1	10,7	18,9	22,4
TRAÇO 2	8,9	15,0	19,2
TRAÇO 3	7,4	12,9	15,8

Fonte: Adaptado de CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

Com base nos resultados encontrados para a resistência à compressão, todos acima do valor limite especificado pela NBR 6118:2003 ($f_{ck} > 7,0$ MPa), optou-se por utilizar o Traço 3, de menor resistência, na execução do pátio de compostagem. Esta escolha visa a avaliar o comportamento do concreto na situação mais desfavorável entre as três definidas.

3.2.2 Execução do pátio de compostagem com agregados de RCC

O protótipo do pátio de compostagem foi construído nas dependências do Laboratório de Mecânica de Resíduos, do Departamento de Engenharia Civil, da UFV, com dimensões de 2,5 m x 4,5 m (Figura 3-3), conforme os seguintes procedimentos:

- I. Primeiramente, executaram-se a limpeza, o nivelamento e a gabaritação do terreno (Figura 3-4);
- II. Em seguida, construiu-se uma base de concreto (Figura 3-5), com agregados naturais, com declividade de 2% em direção ao dreno inferior, assentado na extremidade do pátio;
- III. Para evitar a entrada de águas pluviais pelas laterais do pátio, contornou-se a base com blocos de concreto, preenchendo-os com argamassa (Figura 3-6);
- IV. Acima da base foi disposta uma camada de três centímetros de brita número dois (Figura 3-7), a fim de se drenar as águas que porventura infiltrassem pelo pátio;
- V. De modo a se evitar o selamento da camada drenante pelo concreto, dispôs-se sobre a mesma uma manta geotêxtil não tecido agulhado (Figura 3-8);
- VI. Acima dessa estrutura foi executado o pátio de concreto com os agregados reciclados de RCC (areia média e brita 1), com espessura de oito centímetros e declividade de 2% em direção ao dreno de águas pluviais, disposto em sua extremidade, utilizando-se o traço 3 (1:3,09:2,79) definido por Cruz D. e Pereira (2015) (Figura 3-9);
- VII. À superfície do concreto foi acrescentada uma camada de 2 cm de argamassa (Figura 3-10), composta por cimento, areia e água, a fim de aumentar a resistência e durabilidade do piso, conforme recomendações de Novais (2011);
- VIII. Interligou-se uma caixa subterrânea de polietileno, com dimensões de 30 cm x 40 cm x 22 cm, ao dreno inferior, para a armazenagem de líquidos que eventualmente percolassem através do pátio de compostagem (Figura 3-9); e
- IX. Por fim, interligou-se uma caixa coletora de águas pluviais e superficiais de polietileno, com capacidade de 250 L, ao dreno superior, de modo a permitir a

avaliação das propriedades e riscos de contaminação das águas escoadas (Figura 3-9).

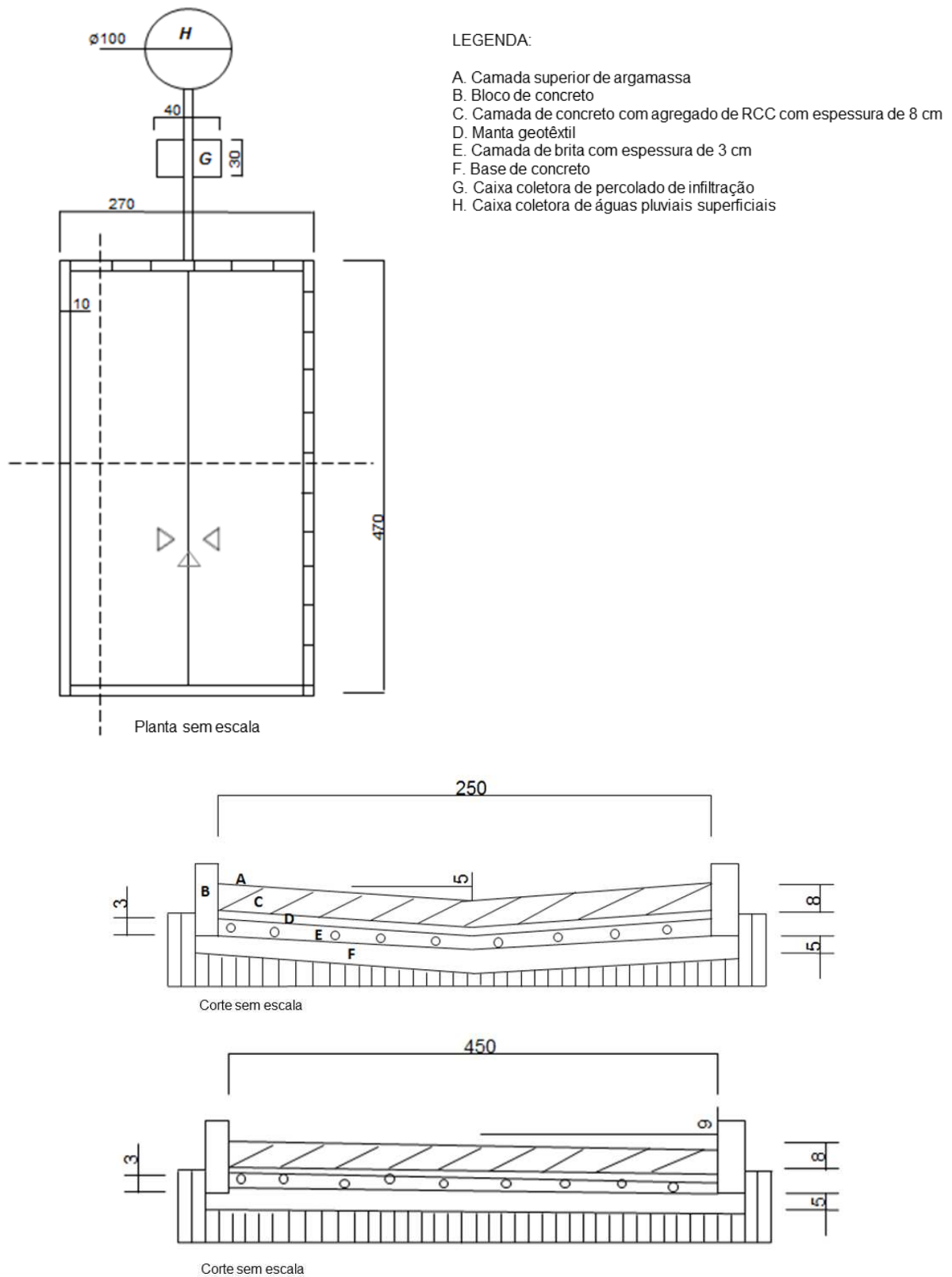


Figura 3-3. Esquema do protótipo do pátio de compostagem.



Figura 3-4. Nivelamento e gabaritação do terreno.



Figura 3-5. Execução da base.



Figura 3-6. Colocação dos blocos.



Figura 3-7. Execução da camada drenante.



Figura 3-8. Aplicação da manta geotêxtil.



Figura 3-9. Execução da camada de concreto com agregados reciclados de RCC e instalação das caixas coletoras de água.



Figura 3-10. Pátio finalizado com a aplicação de argamassa.

Na execução do pátio com agregados de RCC, para permitir comparações, adotaram-se os mesmos métodos utilizados por Novais (2011), que seguiu as recomendações das normas DNER-ES305:1997 (Pavimentação – base de solo-cimento) e ABNT NBR 12254:1990 (Execução de base ou sub-base de solo-cimento) na execução de um pátio com solo-cimento.

3.2.3 Processo de compostagem

Para melhor avaliação do desempenho do pátio com agregados de RCC e para fins de comparação do desenvolvimento do processo de compostagem nos diferentes pátios (concreto tradicional, solo-cimento e RCC), conforme realizado por Novais (2011), foram montados e monitorados dois experimentos em períodos distintos: seco (iniciado no dia 28/06/2016) e chuvoso (iniciado no dia 30/08/2016). Ambos tiveram a duração de sessenta dias, tendo sido avaliada, portanto, apenas a fase ativa de degradação da matéria orgânica.

Os experimentos tiveram como matéria-prima os resíduos orgânicos provenientes da UTC de Divinésia, os quais foram coletados em datas próximas à montagem (Figura 3-11). Para cada um, montou-se uma pilha em formato cônico, com aproximadamente 700 kg de material (Figura 3-12).

Durante os primeiros 30 dias do processo de compostagem, essa pilha foi revirada manualmente a cada três dias, sendo, em seguida, revirada uma vez por

semana até o término da fase ativa. A correção do teor de umidade foi realizada durante os reviramentos ou sempre que o material se apresentou muito seco.



Figura 3-11. Recepção dos resíduos da UTC de Divinésia.



(a)

(b)

Figura 3-12. Montagem das leiras (a) Experimento 1 (28/06/2016) e (b) Experimento 2 (30/08/2016).

O monitoramento dos experimentos foi realizado por meio de análises e determinações físicas, químicas, físico-químicas e bacteriológicas dos resíduos orgânicos e dos efluentes líquidos coletados, de acordo com os cronogramas apresentados nas Tabelas 3-19 e 3-20. As análises físicas, físico-químicas e bacteriológicas foram realizadas no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental, e as análises químicas no Departamento de Solos, ambos da UFV.

As amostras de resíduos orgânicos utilizadas nas análises foram coletadas aleatoriamente em vários pontos da pilha, de modo a se ter uma amostra representativa.

Para evitar interferências nas amostragens, as caixas coletoras dos efluentes líquidos foram esvaziadas após cada análise.

Tabela 3-19. Parâmetros e frequência de análises da matéria orgânica.

ANÁLISE	FREQUÊNCIA
Umidade	Semanal
Temperatura	A cada três dias
pH	Semanal
Sólidos Fixos	Semanal
Sólidos Voláteis	Semanal
<i>Escherichia coli</i>	Semanal
Metais pesados (Cu, Zn, Cr, Pb, Ni, Cd)	Início e fim do experimento

Tabela 3-20. Parâmetros e frequência de análises dos efluentes líquidos coletados.

ANÁLISE	FREQUÊNCIA
Turbidez	Semanal*
Temperatura	Semanal*
pH	Semanal*
<i>Escherichia coli</i>	Semanal*
Metais pesados (Cu, Zn, Cr, Pb, Ni, Cd)	Semanal*

NOTA: *ANÁLISE REALIZADA QUANDO GERADO O EFLUENTE.

3.2.3.1 Determinações físicas

3.2.3.1.1 Temperatura

Para a aferição da temperatura da pilha de resíduos orgânicos utilizou-se um termômetro digital (Modelo TD-870 - ICEL Manaus), com sonda acoplada em haste metálica. As medições foram feitas no centro da pilha, a cada três dias.

Para aferir a temperatura dos efluentes coletados, utilizou-se um termômetro digital do tipo espeto da Incoterm.

3.2.3.1.2 Turbidez

Para a determinação da turbidez dos efluentes coletados, utilizou-se um turbidímetro nefelométrico digital. Primeiramente, executou-se a calibração do equipamento com os padrões, procedendo-se a leitura dos mesmos conforme os procedimentos de calibração automática. Após a calibração, lavou-se a cubeta do turbidímetro com água destilada, que foi, em seguida, preenchida com a amostra, e realizou-se a leitura.

3.2.3.2 Análises químicas

3.2.3.2.1 Metais pesados

As concentrações de Cu, Zn, Cr, Pb, Ni e Cd foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica, método que consiste em determinar a presença de um dado metal, a partir da absorção de radiação ultravioleta por parte dos elétrons.

3.2.3.3 Análises físico-químicas

3.2.3.3.1 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos por Solyon (1977 apud AZEVEDO M., 1993, p.82).

Três amostras, com aproximadamente 20 g do material, foram colocadas para secar em estufa a 70 ± 2 °C, por um período de 24 horas, findo o qual, o material foi resfriado em dessecador e pesado. O teor de umidade foi determinado a partir da diferença entre os pesos úmido e seco do material, que corresponde ao peso da água contida na amostra, dividida pelo peso do material seco. Sendo o resultado final a média aritmética, em porcentagem, dos três valores encontrados.

3.2.3.3.2 Sólidos fixos e voláteis

A determinação do teor de sólidos fixos (SF) e voláteis (SV) foi realizada conforme as recomendações de Kiehl (1985) e APHA (1985).

Em três cadinhos de porcelana pesaram-se, aproximadamente, 2 g de material, previamente seco em estufa e triturado. Em seguida, os cadinhos foram dispostos na mufla, a 550 °C, por duas horas. Após esse período, os cadinhos foram colocados no dessecador, para resfriamento, e pesados em seguida. O teor de sólidos voláteis foi obtido, portanto, pela diferença de peso, dividido pelo peso inicial do material, sendo o resultado final a média aritmética, em porcentagem, dos três valores encontrados.

O teor de sólidos fixos (SF) foi obtido por meio da Equação 14:

$$SF = 100\% - SV \quad (14)$$

3.2.3.3.3 pH

Inicialmente, calibrou-se o pHmetro com os tampões-padrão de pH 4,0 e pH 7,0. Antes das aferições lavava-se a superfície dos eletrodos com água destilada, enxugando-se em seguida com papel absorvente.

Para a realização das leituras de pH dos efluentes líquidos coletados, agitou-se a amostra com bastão de vidro, mergulhando-se, imediatamente, os eletrodos na suspensão homogeneizada.

O pH das amostras de resíduos orgânicos foi determinado em suspensão aquosa, conforme as recomendações de Pereira Neto (1987). Em 10 g da amostra adicionaram-se 250 mL de água destilada. A solução foi agitada, por 3 minutos, no agitador magnético, deixada repousar por 5 minutos e, em seguida, mediu-se o pH.

3.2.3.4 Análises bacteriológicas

3.2.3.4.1 *Escherichia coli*

Para a quantificação de *Escherichia coli*, nas amostras sólidas e líquidas, utilizou-se a técnica de substrato cromogênico da IDEXX (colilert), com cartelas Quanti-Tray.

Essa técnica tem como princípio a identificação dos microrganismos pela análise de suas enzimas características: Beta-Galactosidade (coliformes totais) e Beta-Glucoronidase (*E. coli*). Ao metabolizarem os nutrientes presentes no colilert, essas enzimas liberam o radical orgânico cromogênico, que faz com que a amostra apresente uma coloração amarela para coliformes totais e fluorescência, na presença de luz ultravioleta a 365 nm, para *E. coli*.

Para a quantificação de *E. coli*, acrescentou-se o conteúdo de um frasconete de colilert a cada frasco de 100 mL, contendo água de dissolução mais amostra, que foi agitado até a dissolução do reagente. Posteriormente, transferiu-se o conteúdo de cada frasco para as cartelas Quanti-Tray, que foram seladas e incubadas a 35 °C por 24 horas. Decorrido esse período, procedeu-se a leitura das cartelas, considerando-se os compartimentos que ficaram fluorescentes na presença de luz UV.

Os resultados foram obtidos, portanto, pela relação de valores positivos dos compartimentos maiores e menores da cartela, com aqueles verificados na Tabela estatística do Número Mais Provável - NMP do sistema Quanti-Tray.

3.2.4 Monitoramento da estanqueidade e patologias

O monitoramento da estanqueidade do pátio de compostagem e do surgimento de patologias foi realizado por meio da verificação periódica da caixa coletora da drenagem inferior (representada pela letra G na Figura 3-3), medição do volume de líquido percolado e análise visual da superfície do pátio.

3.2.5 Levantamento de custos da execução do pátio com agregados reciclados

O levantamento de custos foi realizado a partir da estimativa do consumo de materiais para a execução do pátio de compostagem com agregados de RCC e, tomando-se por base os valores fornecidos por Paschoalin Filho et al. (2015), os quais foram convertidos, com base na inflação do dólar, para o ano de 2011. Para a comparação de custos do pátio executado com agregados reciclados com os pátios executados com concreto tradicional e solo-cimento, utilizaram-se os critérios definidos por Novais (2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação das características dos agregados reciclados

4.1.1 Caracterização granulométrica

A ABNT NBR 15116:2004 estabelece que a composição granulométrica dos agregados reciclados miúdos e graúdos deve atender aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2005 (Tabelas 4-1 e 4-2).

Tabela 4-1. Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO (ABNT NBR 7211:2005)				
Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,8	0	0	5	10
2,4	0	10	20	25
1,2	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211:2005.

Tabela 4-2. Limites de distribuição granulométrica da fração graúda do agregado de RCC.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada	
	Limites inferiores	Limites superiores
12,5 mm	0	5
9,5 mm	2	15
6,3 mm	40	65
4,8 mm	80	100
2,4 mm	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211:2005.

Os resultados de distribuição granulométrica do agregado miúdo (Tabela 3-2) encontrados por Cruz D. e Pereira (2015), atenderam aos limites estabelecidos pela norma (Figura 4-1).

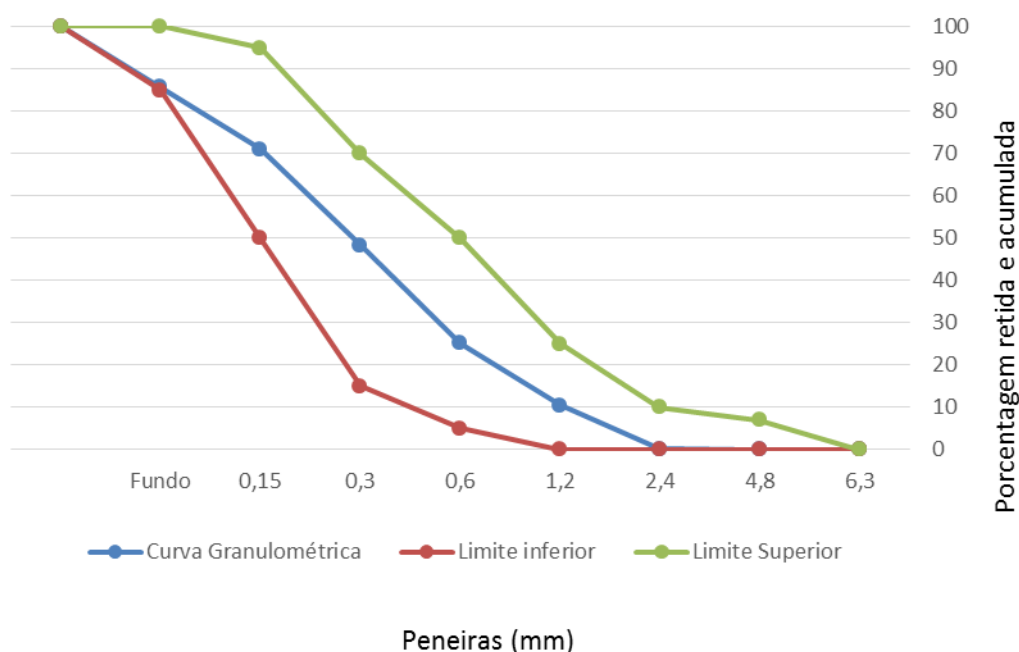


Figura 4-1. Limite inferior e superior da composição granulométrica do agregado miúdo.

Fonte: CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

E os resultados de distribuição granulométrica do agregado graúdo (Tabela 3-3) atenderam, em grande parte, aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2005 (Figura 4-2).

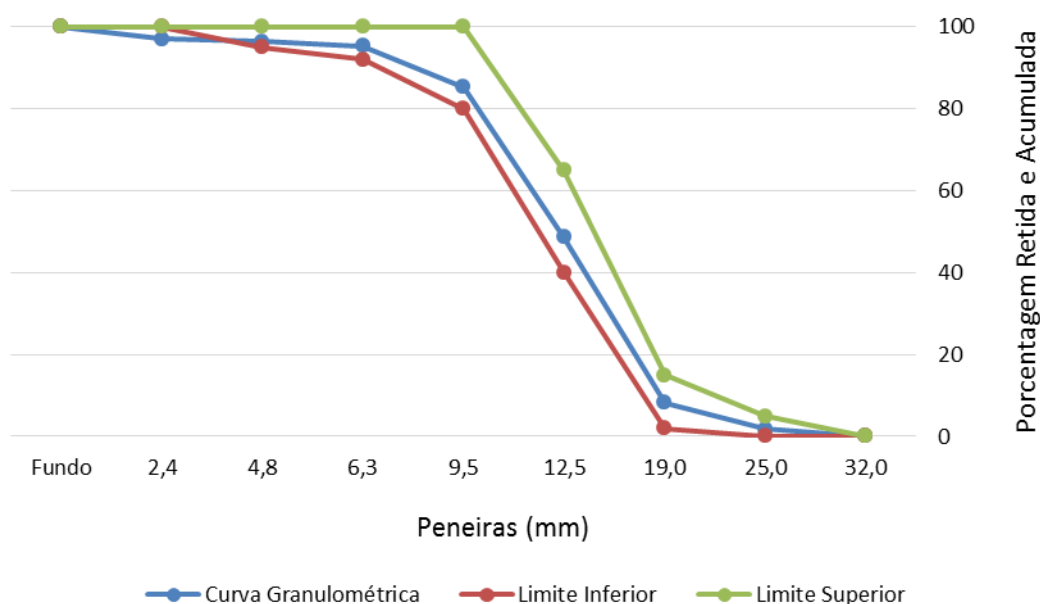


Figura 4-2. Limite inferior e superior da composição granulométrica do agregado graúdo.
 Fonte: CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

4.1.2 Dimensão máxima característica e módulo de finura

Os valores encontrados para a dimensão máxima característica do agregado miúdo (4,8 mm) e graúdo (25 mm) atenderam ao limite estabelecido pela ABNT NBR 15116:2004, que determina que a dimensão máxima característica do agregado reciclado destinado à pavimentação deve ser ≤ 63 mm. Já a ABNT NBR 7211:2005 não especifica limites para este parâmetro.

O módulo de finura encontrado para o agregado miúdo (2,41) está dentro do intervalo especificado pela ABNT NBR 7211:2005, de 2,20 a 2,90, para a composição granulométrica nas zonas ótimas. De acordo com o valor para o módulo de finura, a areia reciclada utilizada no ensaio classifica-se como areia média (módulo de finura entre 2,40 e 3,30) (PETRUCCI, 2005). Quanto ao módulo de finura do agregado graúdo (2,86) não há especificação na ABNT NBR 7211:2005 acerca de seus limites.

4.1.3 Massa específica e absorção de água

O agregado miúdo apresentou massa específica de $2,59 \text{ g cm}^{-3}$, diferenciando-se de agregados naturais que, geralmente, apresentam massa

específica em torno de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (PETRUCCI, 2005). O agregado graúdo apresentou massa específica de $2,53 \text{ g cm}^{-3}$, diferenciando-se, também, de agregados naturais que, geralmente, apresentam massa específica em torno de $2,58 \text{ g cm}^{-3}$ (PETRUCCI, 2005). Esta pequena diferença pode ser explicada pela presença de materiais leves, como cerâmica, na composição dos agregados reciclados.

Quanto à absorção, os agregados miúdo e graúdo apresentaram valores elevados, respectivamente, 7,63% e 7,59%, em relação aos agregados naturais que atingem valores de no máximo 2% (PETRUCCI, 2005). Entretanto, quando comparados aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15116:2004 para agregados do tipo ARM destinados ao preparo de concreto sem função estrutural, verificou-se que os valores de absorção encontrados atenderam aos limites estabelecidos pela norma (absorção de água do agregado graúdo $\leq 12\%$ e absorção de água do agregado miúdo $\leq 17\%$).

4.1.4 Massa unitária

De acordo com os valores encontrados para massa unitária, no estado seco e solto e no estado seco e compactado (Tabela 4-3), os agregados analisados, tanto miúdos quanto graúdos, de forma geral, podem ser classificados como agregados leves, uma vez que possuem massa unitária próxima ou menor do que 1.120 kg m^{-3} (EFFTING, 2014). Os pequenos valores encontrados de massa unitária se devem, principalmente, à elevada porosidade do material analisado.

Tabela 4-3. Massa unitária.

MASSA UNITÁRIA (kg m^{-3})	AGREGADO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
Massa unitária no estado seco e solto	900	1210
Massa unitária no estado seco e compactado	1000	1320

Fonte: CRUZ D. e PEREIRA, 2015.

4.1.5 Teor de material pulverulento

O resultado encontrado (11,56%) diverge das exigências estabelecidas pela ABNT NBR 7211:2005 e ABNT NBR 15116:2004. Segundo a ABNT NBR 7211:2005, o teor de materiais pulverulentos deve ser $\leq 5\%$ e, de acordo com a ABNT NBR 15116:2004, $\leq 10\%$. O valor elevado encontrado se deve ao processo de trituração pelo qual passam os resíduos durante o seu beneficiamento, pois, este processo tende a gerar partículas com diâmetro inferiores a 0,075 mm.

4.1.6 Teor de argila em torrões e materiais friáveis

O resultado encontrado (0,27%) está dentro dos limites especificados pela ABNT NBR 7211:2005 ($< 3\%$) e ABNT NBR 15116:2004 ($< 2\%$).

4.1.7 Abrasão “Los Angeles”

O resultado encontrado (52,1%) diverge das exigências estabelecidas pela ABNT NBR 7211:2005. Segundo a norma, o índice de desgaste por abrasão “Los Angeles” deve ser inferior a 50%, em massa, do material. A ABNT NBR 15116:2004 não contempla este parâmetro.

4.1.8 Análise visual do agregado graúdo

Conforme os resultados obtidos para a fração de cada grupo (Grupo 1: 43,03%; Grupo 2: 40,49%; Grupo 3: 15,91 e; Grupo 4: 0,57%), os agregados classificam-se como ARM (agregado de resíduo misto), segundo a ABNT NBR 15.116:2004, visto que a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 é menor do que 90% (83,52%), sendo permitida a sua utilização em obras de pavimentação e no preparo de concretos sem função estrutural.

4.2 Monitoramento do processo de compostagem

As análises referentes ao processo de compostagem foram realizadas durante os 60 primeiros dias de cada experimento (1 e 2).

4.2.1 Análises da matéria orgânica

A matéria orgânica foi analisada quanto aos seguintes parâmetros: umidade, temperatura, pH, sólidos fixos, sólidos voláteis, *Escherichia coli* e metais pesados.

4.2.1.1 Caracterização da matéria orgânica utilizada nos experimentos

De modo a se caracterizar a matéria-prima utilizada nos experimentos 1 e 2, na data de montagem dos mesmos (28/06/2016 e 30/08/2016), analisou-se a matéria orgânica quanto aos parâmetros anteriormente mencionados (Tabela 4-4). Tomando-se por base os valores encontrados para pH, sólidos voláteis e fixos, observou-se que a matéria orgânica utilizada no experimento 2 encontrava-se em estágio mais avançado de degradação.

Tabela 4-4. Caracterização da matéria orgânica.

PARÂMETRO	EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2
Temperatura (°C)	24 (Temperatura ambiente: 22)	26,7 (Temperatura ambiente: 24,3)
Umidade (%)	71,75	27,33
pH	4,3	6,29
Sólidos voláteis (%)	84,50	81,17
Sólidos fixos (%)	15,50	18,83
<i>E. coli</i> (NMP/g)	---	2,905 x 10 ³
Cobre (mg Kg ⁻¹)	30,05	17,80
Zinco (mg Kg ⁻¹)	81,15	53,20
Cromo (mg Kg ⁻¹)	60,95	37,60
Chumbo (mg Kg ⁻¹)	12,50	---
Níquel (mg Kg ⁻¹)	42,00	17,90
Cádmio (mg Kg ⁻¹)	3,45	0,60

4.2.1.2 Temperatura e umidade

A temperatura da pilha do Experimento 1 com agregados de RCC atingiu a fase termofílica (acima de 40 °C) de forma mais rápida (ao 17º dia) do que as pilhas dos experimentos do pátio de concreto e de solo-cimento (NOVAIS, 2011) (Figura 4-3). Este fato pode ser explicado pela diminuição gradual do teor de umidade (Figura 4-4), no experimento com agregados de RCC, até valores mais próximos da faixa recomendada para o processo de compostagem, de 50 a 60% (AZEVEDO M., 2004). Nesta faixa, os microrganismos, por desempenharem de forma mais eficaz suas atividades metabólicas e fisiológicas, tendem a liberar mais calor para a massa de resíduos, o que provoca o aumento de sua temperatura. Como o índice pluviométrico durante o período inicial dos experimentos nos pátios de concreto e de solo-cimento foi elevado, e uma vez que Novais (2011) conduziu estes experimentos de modo a desenvolver condições anaeróbias para formação de chorume, observaram-se maiores teores de umidade. Tal situação ocasionou em um retardo na atividade microbiológica dos organismos atuantes no processo de degradação da matéria orgânica, fazendo com que a temperatura permanecesse na fase mesofílica por um período maior. Entretanto, verificou-se que as temperaturas dos experimentos com aqueles dois tipos de pátio permaneceram na fase termofílica por um período maior, comparados com o experimento no pátio com RCC. Isto se deve à queda brusca do teor de umidade no experimento com RCC, em função das altas temperaturas ambientes registradas e da escassez de chuvas no período analisado. Apesar de a umidade da pilha do experimento no pátio com RCC ter sido corrigida a partir do 28º dia, a cada três dias, por meio de rega, valores abaixo de 50%, atingindo valores mínimos de 22,6%, foram observados.

Os dados pluviométricos foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2017).

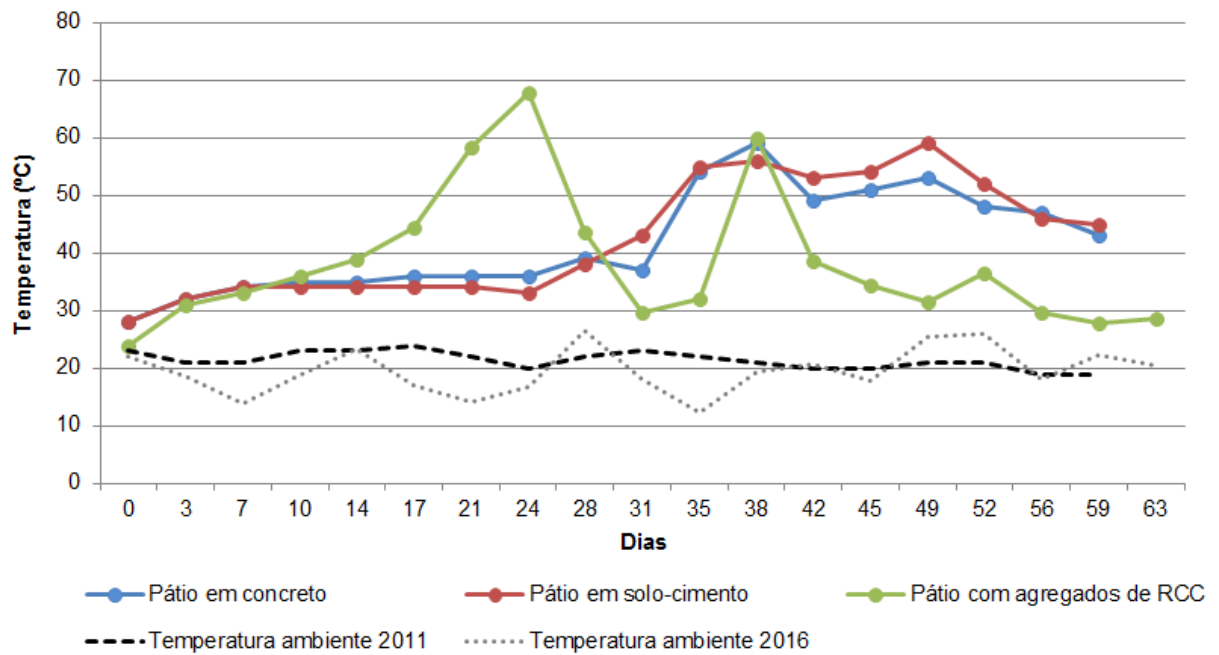


Figura 4-3. Temperaturas do Experimento 1.

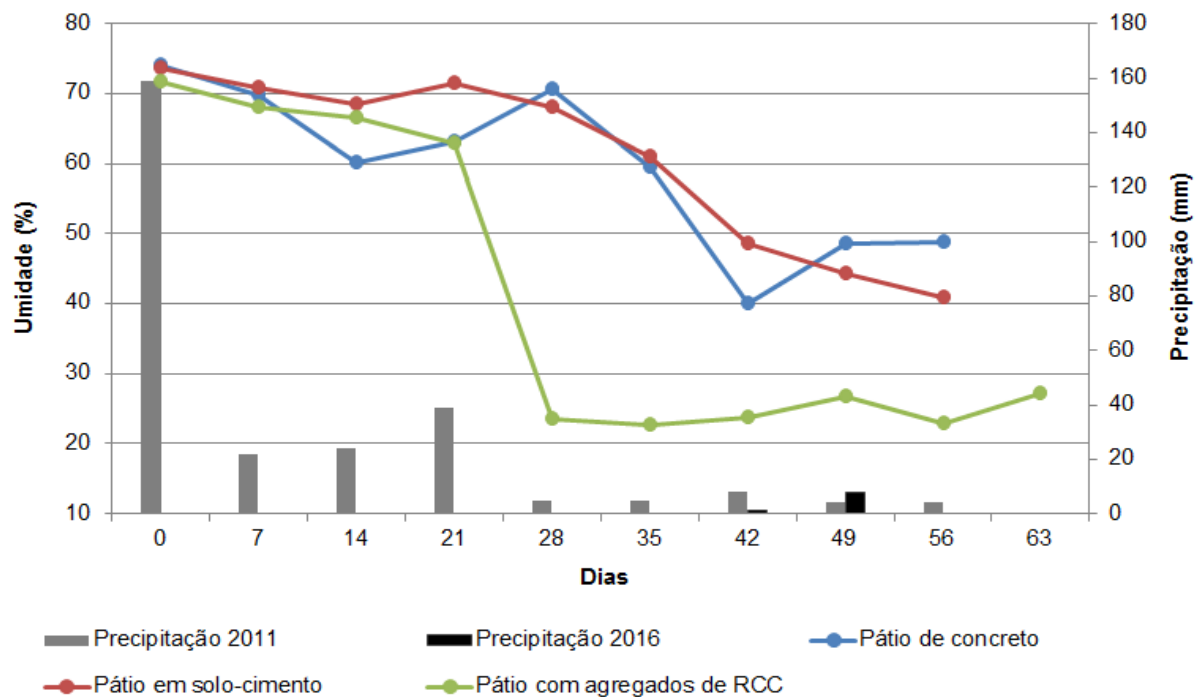


Figura 4-4. Teores de umidade do Experimento 1.

Apesar de os resíduos utilizados no Experimento 2 - Pátio com agregados de RCC, apresentarem, inicialmente, menores teores de umidade (27,3%) em relação aos resíduos utilizados no Experimento 1 – Pátio com agregados de RCC (71,7%), os tais atingiram a fase termofílica mais rapidamente (3º dia) (Figura 4-5), já que

estes se encontravam em estágio mais avançado de degradação. Neste experimento, as temperaturas da fase termofílica se prolongaram por um período maior, entretanto, ficaram abaixo da temperatura considerada ideal para o processo de compostagem (55 °C) (PEREIRA NETO, 1996).

No caso dos pátios em concreto e solo-cimento, a temperatura da pilha atingiu a da fase termofílica após sete dias, fator atribuído aos elevados teores de umidade e precipitações no período inicial do processo de compostagem.

A umidade nos experimentos com os pátios em concreto e solo-cimento se manteve próxima aos valores recomendados para o processo de compostagem (Figura 4-6). A umidade do experimento com RCC, apesar das chuvas registradas e das correções de umidade feitas desde o início do experimento, se manteve, de forma geral, abaixo dos valores ótimos.

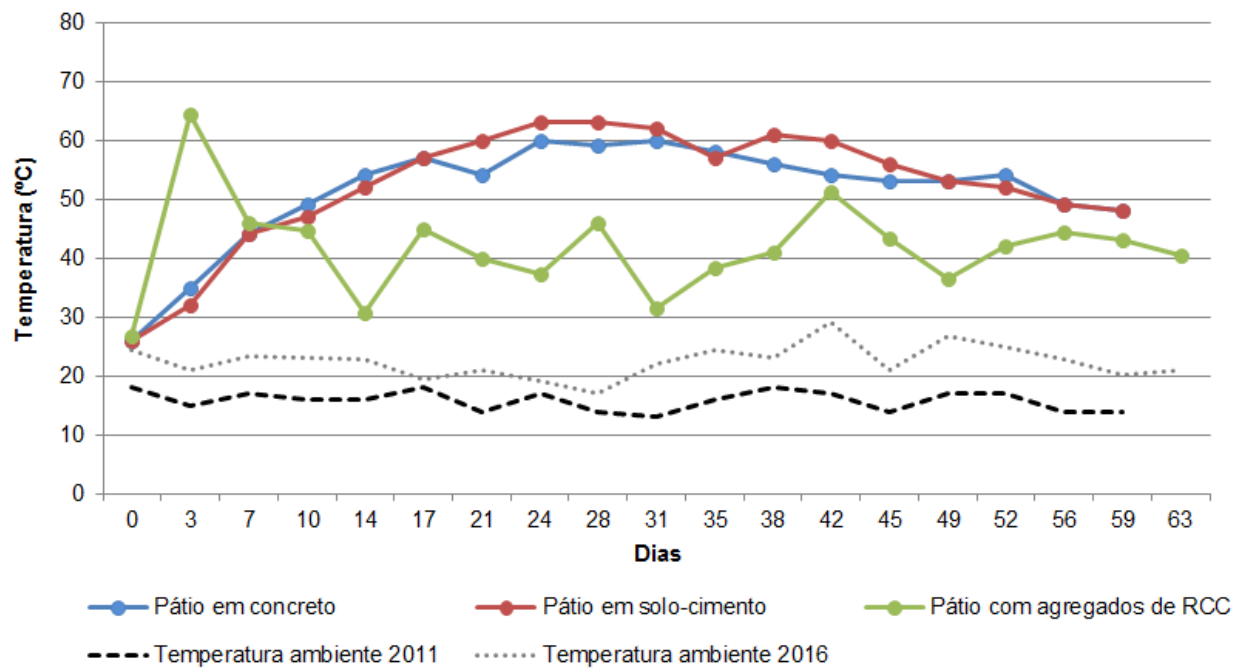


Figura 4-5. Temperaturas do Experimento 2.

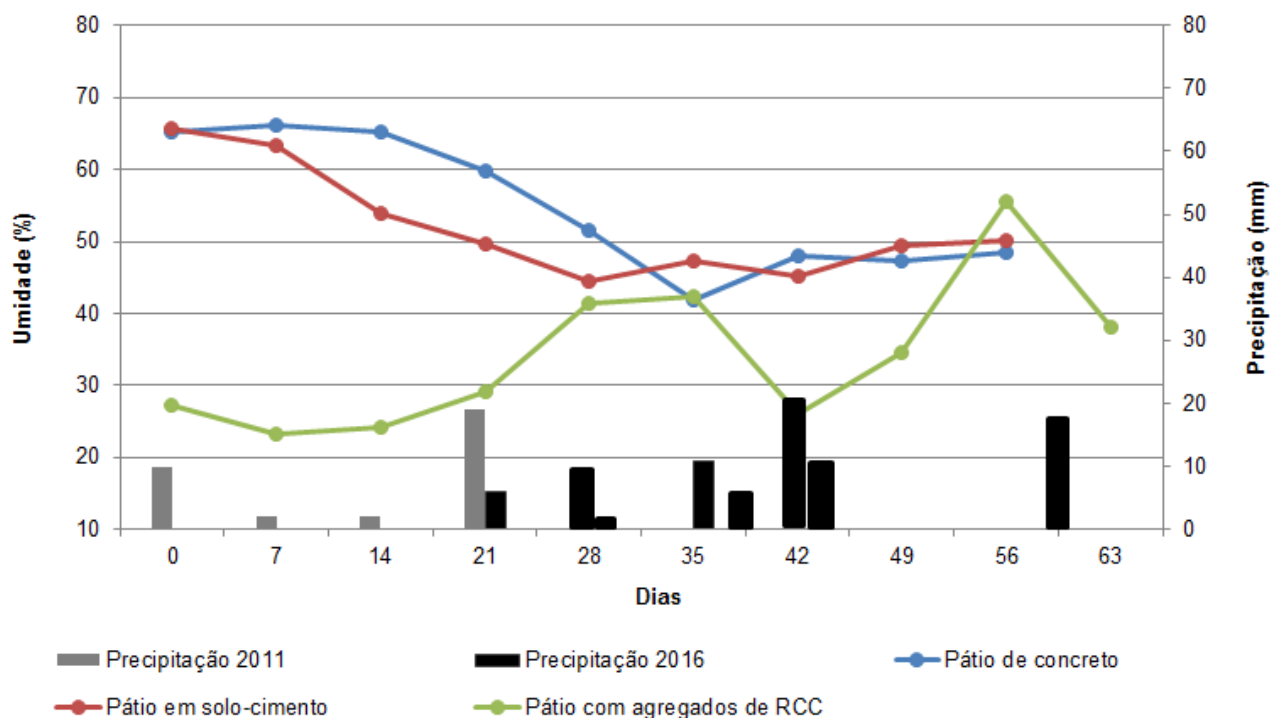


Figura 4-6. Teores de umidade do Experimento 2.

Acredita-se que os baixos teores de umidade verificados nos experimentos com RCC podem ser resultados, também, da influência dos agregados reciclados no desempenho do concreto, uma vez que, segundo Pereira M. (2008), há certos tipos de agregados que tendem a absorver água por várias semanas.

4.2.1.3 pH

O pH das pilhas, do Experimento 1, para os três pátios analisados, mostrou-se ligeiramente ácido no início do processo de compostagem, em razão do acúmulo de ácidos provenientes da degradação dos compostos carbonáceos. De forma geral, os três experimentos analisados apresentaram comportamentos semelhantes (Figura 4-7). O pH elevou-se gradativamente, atingindo valores acima de 9 no fim da fase de degradação ativa.

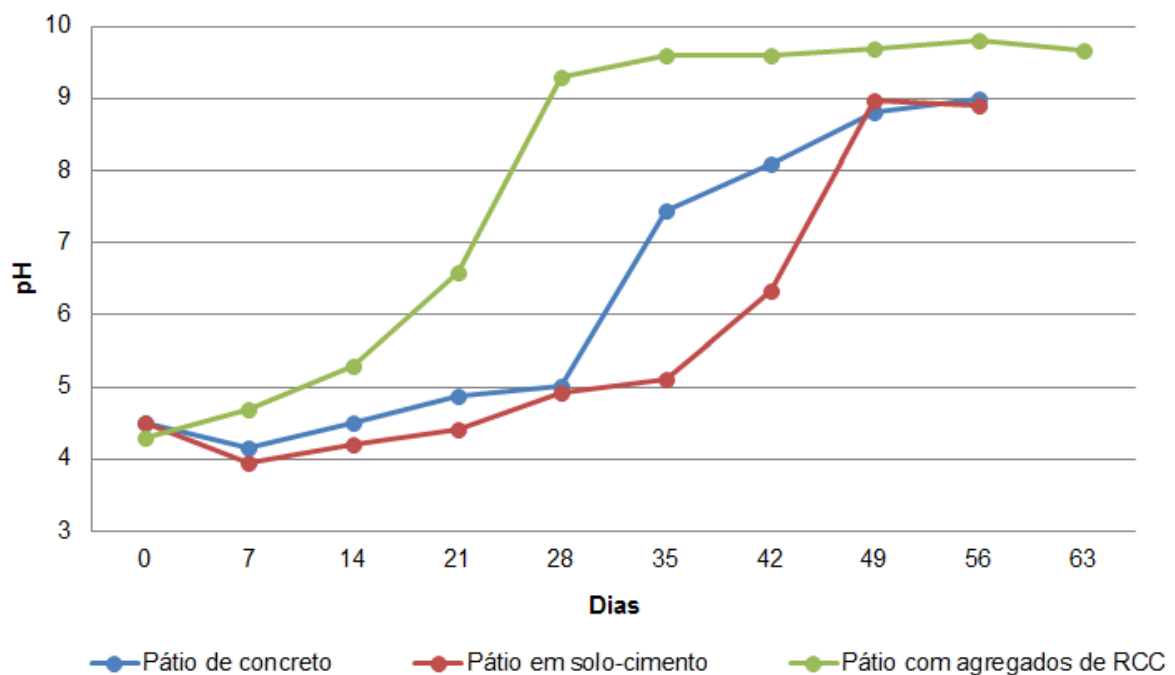


Figura 4-7. Valores de pH do Experimento 1.

Já no Experimento 2, as pilhas de resíduos apresentaram comportamentos diferentes em relação ao pH (Figura 4-8). Tendo em vista os resíduos orgânicos utilizados na compostagem no pátio com agregados de RCC estarem em estágio mais avançado de degradação, valores elevados de pH foram observados já no início do processo, diferentemente dos valores de pH encontrados para os pátios em concreto e em solo-cimento, que apresentaram pH ligeiramente ácido no início. Verifica-se que ao término do processo de compostagem, as pilhas de resíduos dos três pátios analisados apresentaram valores semelhantes de pH, próximos a 9,5.

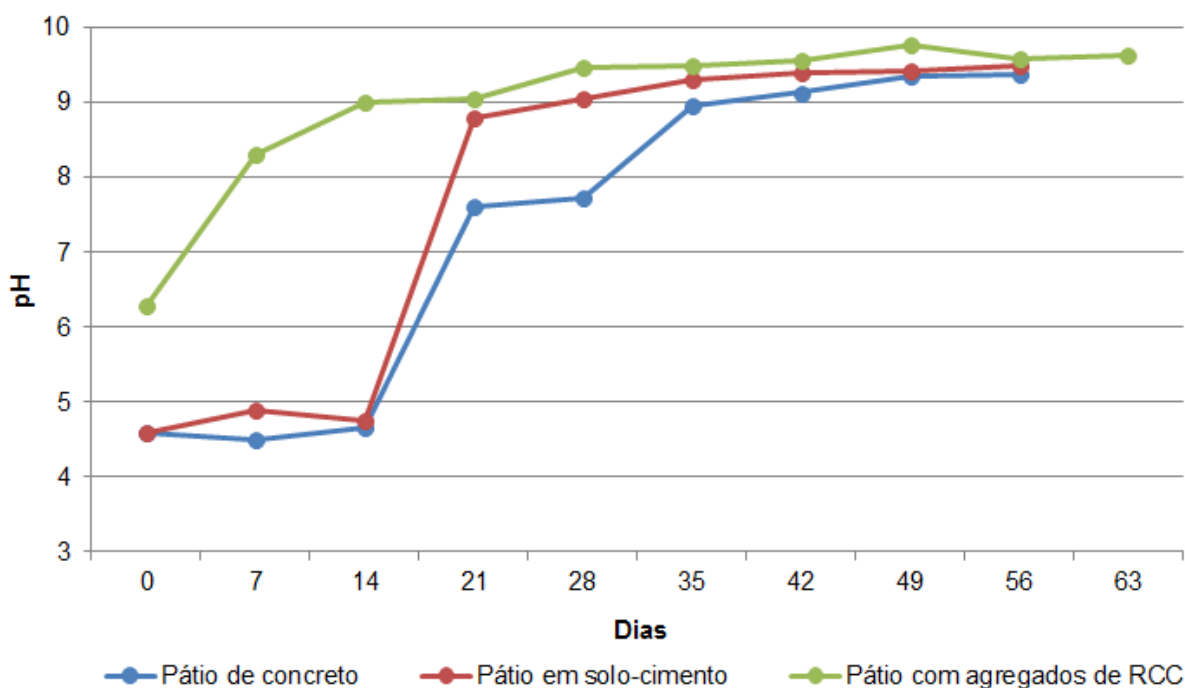


Figura 4-8. Valores de pH do Experimento 2.

Deste modo, pode-se afirmar que os agregados reciclados não influenciaram o desenvolvimento do processo de compostagem, em relação ao pH.

4.2.1.4 Sólidos voláteis e fixos

Nos Experimentos 1 e 2, dos três pátios analisados, a pilha de resíduos do pátio executado com RCC foi a que apresentou maior redução de sólidos voláteis (Figuras 4-9 e 4-10), ou seja, foi a que propiciou maior redução do teor de matéria orgânica presente. Conseqüentemente, a mesma pilha foi a que apresentou os maiores valores de sólidos fixos, o que permitiu maior mineralização da matéria orgânica (Figuras 4-11 e 4-12). Isto pode ser justificado pela menor taxa de umidade associada a elevadas temperaturas no início do processo, o que, provavelmente, favoreceu condições melhores para as atividades microbianas.

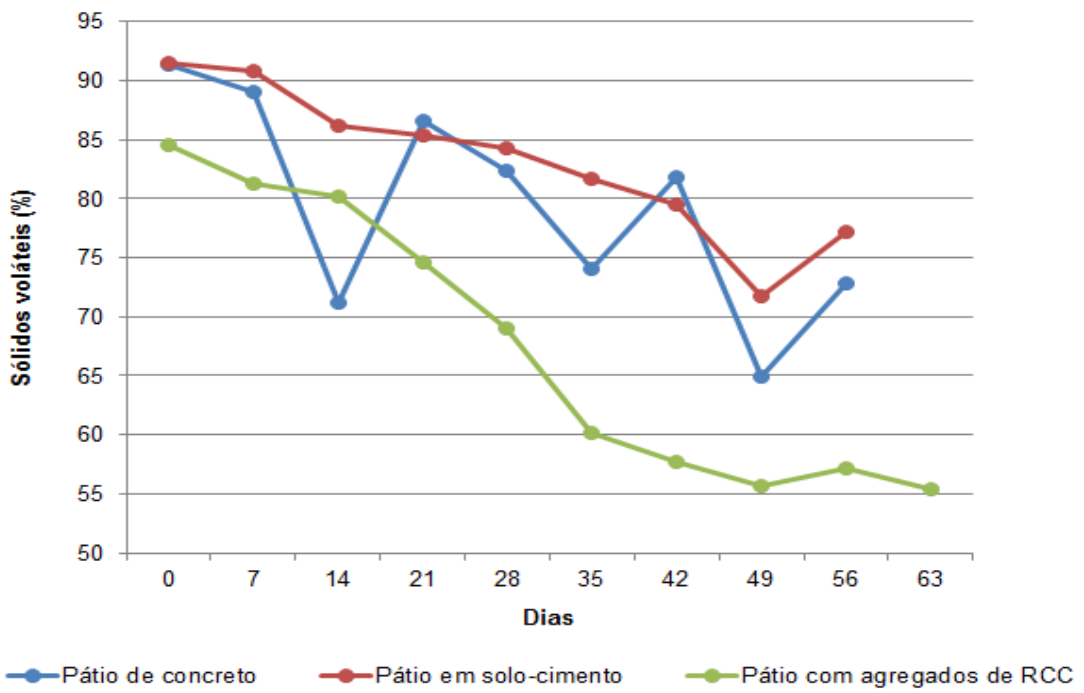


Figura 4-9. Valores de sólidos voláteis do Experimento 1.

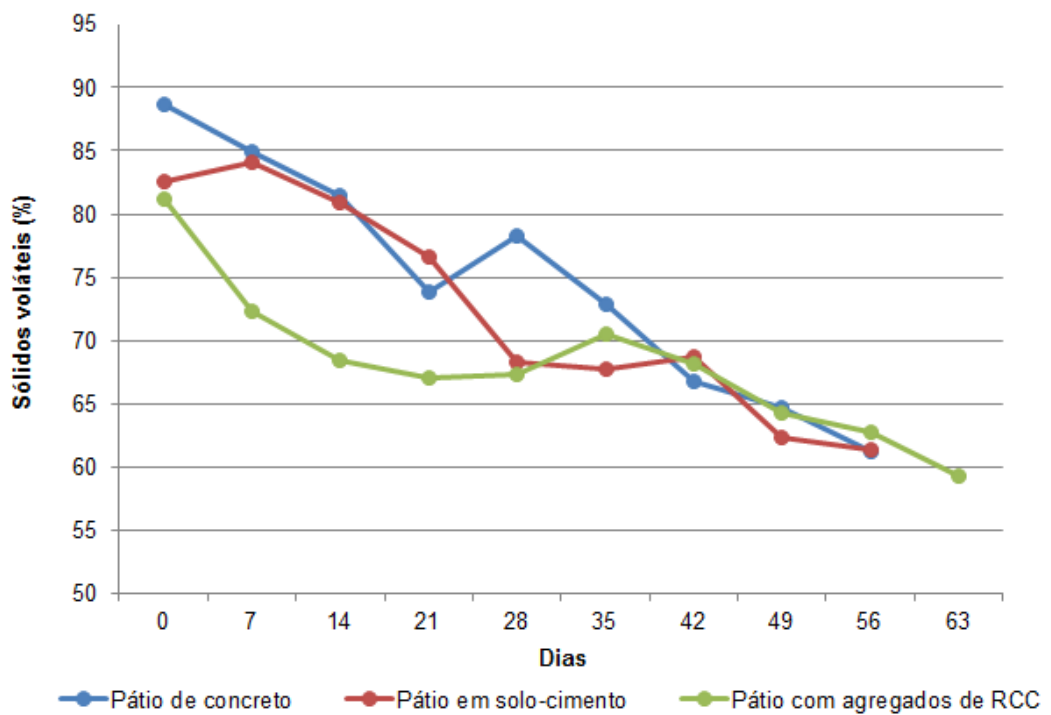


Figura 4-10. Valores de sólidos voláteis do Experimento 2.

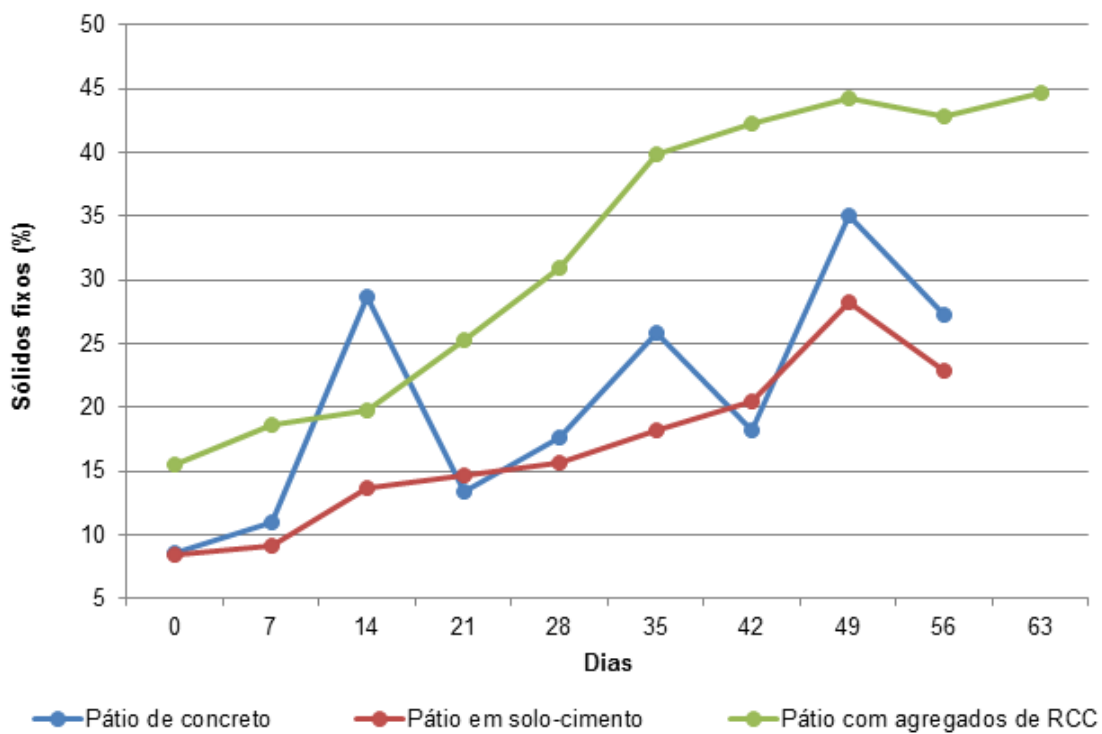


Figura 4-11. Valores de sólidos fixos do Experimento 1.

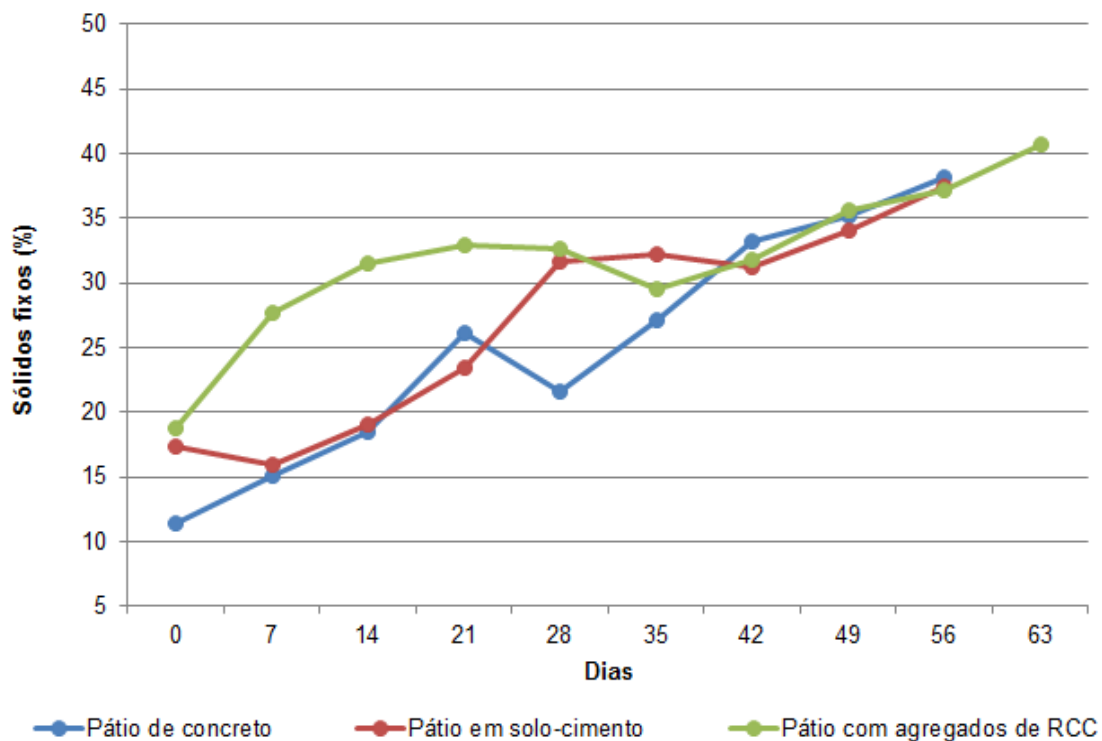


Figura 4-12. Valores de sólidos fixos do Experimento 2.

4.2.1.5 *Escherichia coli*

Quanto às análises de *Escherichia coli*, as pilhas de resíduos do pátio de concreto e do pátio em solo-cimento não apresentaram valores acima do mínimo detectável (< 3 NMP/g) pelo processo de NMP – Número Mais Provável (Tabela 4-5). Os resultados obtidos para a pilha de resíduos do pátio com agregados de RCC, pela técnica de substrato cromogênico da IDEXX (colilert), indicaram que houve sanitização do material ao longo do processo de compostagem (Tabela 4-5). Dessa forma, para todos os experimentos analisados, as temperaturas termófilas permitiram a redução do número de microrganismos indicadores, como a *Escherichia coli*.

Tabela 4-5. Resultados das análises de *Escherichia coli* dos Experimentos 1 e 2.

ANÁLISES DE <i>ESCHERICHIA COLI</i>						
DIAS	EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 2		
	Pátio de concreto	Pátio em solo-cimento	Pátio com agregados de RCC	Pátio de concreto	Pátio em solo-cimento	Pátio com agregados de RCC
0	<3	<3	---	<3	<3	2,905 x 10 ³
7	<3	<3	1,0 x 10 ¹	<3	<3	<1
14	<3	<3	1,43 x 10 ²	<3	<3	1 x 10 ¹
21	<3	<3	4,96 x 10 ²	<3	<3	1,385 x 10 ³
28	<3	<3	2,18 x 10 ²	<3	<3	4,225 x 10 ³
35	<3	<3	4,1 x 10 ¹	<3	<3	6,0 x 10 ¹
42	<3	<3	1,0 x 10 ¹	<3	<3	6,2 x 10 ¹
49	<3	<3	5,2 x 10 ¹	<3	<3	7,2 x 10 ¹
56	<3	<3	1,0 x 10 ¹	<3	<3	4 x 10 ¹
63	<3	<3	1,0 x 10 ¹	<3	<3	1 x 10 ¹

4.2.1.6 Metais pesados

As concentrações de cobre (Cu), zinco (Zn), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e níquel (Ni) nos resíduos orgânicos, foram avaliadas no início e término de cada experimento. Os valores encontrados (Figuras 4-13 e 4-14) foram comparados aos valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375/2006, que regulamenta os limites de concentração de poluentes nos biossólidos,

originados em estações de tratamento de esgotos, destinados para o uso agrícola (Tabela 4-6).

Nos experimentos realizados nos pátios de concreto tradicional e solo-cimento, não houve alterações significativas nas concentrações iniciais e finais dos metais. Já nos experimentos realizados no pátio com agregados de RCC, observou-se um comportamento diferente, e, além disso, houve um aumento expressivo nas concentrações de Cu, Zn, Cr, Pb e Ni no Experimento 2. Acredita-se que este aumento esteja relacionado à incorporação das frações finas, dos agregados reciclados, aos resíduos orgânicos, durante o processo de reviramento do material, uma vez que houve desagregação na estrutura do concreto durante o desenvolvimento da compostagem. Pois, segundo Schultmann et al. (1997) e Queiroz et al. (2014), os materiais constituintes dos RCC Classe A, tais como pedras naturais, concreto e argamassa, são potenciais fontes de metais pesados, e estes tendem a ser encontrados em maiores quantidades nas frações finas dos agregados reciclados.

Apesar disso, todos os experimentos apresentaram valores inferiores aos limites impostos pela Resolução CONAMA nº 375/2006.

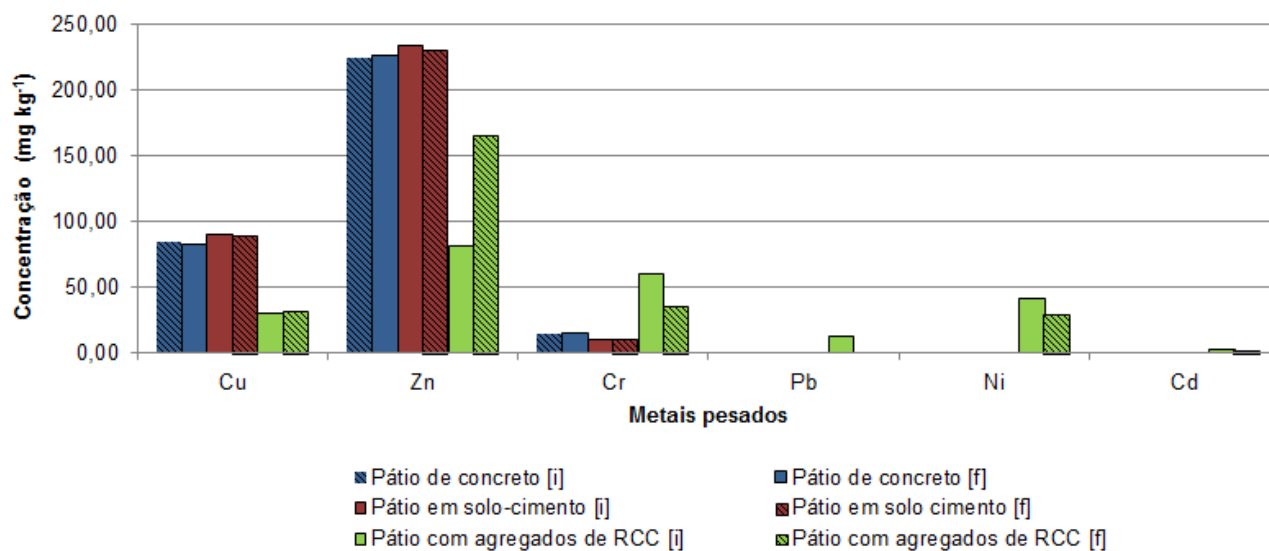


Figura 4-13. Concentração de metais pesados nos resíduos orgânicos do Experimento 1.

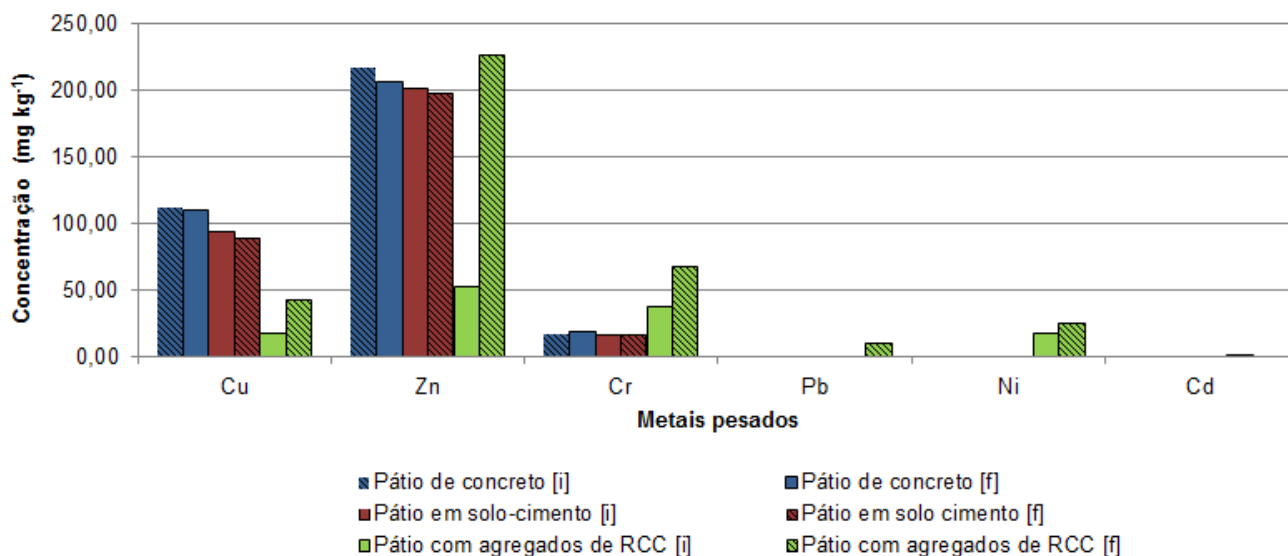


Figura 4-14. Concentração de metais pesados nos resíduos orgânicos do Experimento 2.

Tabela 4-6. Concentração máxima permitida de poluentes em biossólidos.

CONCENTRAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA (mg kg ⁻¹) – RESOLUÇÃO CONAMA 375/2006						
ELEMENTO	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni
LIMITE	1500	2800	39	300	1000	420

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 375/2006.

4.2.2 Análises dos efluentes superficiais

Os resultados das análises dos efluentes superficiais foram comparados àqueles encontrados por Novais (2011), o qual avaliou apenas os efluentes gerados no pátio em solo-cimento.

Em ambos os pátios, a formação de efluentes ocorreu, principalmente, em virtude das precipitações, com exceção do período inicial do Experimento 1 – Pátio com agregados de RCC, em que a geração foi devida a elevada umidade dos resíduos orgânicos, e do estágio final do Experimento 2 - Pátio com agregados de RCC, em que se forçou, por meio de rega, a formação de efluente, a fim de se avaliar as características do mesmo.

4.2.2.1 Turbidez

Em todos os experimentos observou-se, de maneira geral, uma queda na turbidez dos efluentes coletados ao longo do processo de compostagem (Figuras 4-15 e 4-16). Isto se deve à diminuição dos compostos solúveis durante o processo de degradação da matéria orgânica. Como no Experimento 2, realizado no pátio com agregados de RCC, o teor de sólidos voláteis voltou a crescer a partir do 49º dia, aumentou-se a concentração de compostos solúveis a serem estabilizados, o que, conseqüentemente, acarretou em um acréscimo na turbidez dos efluentes coletados.

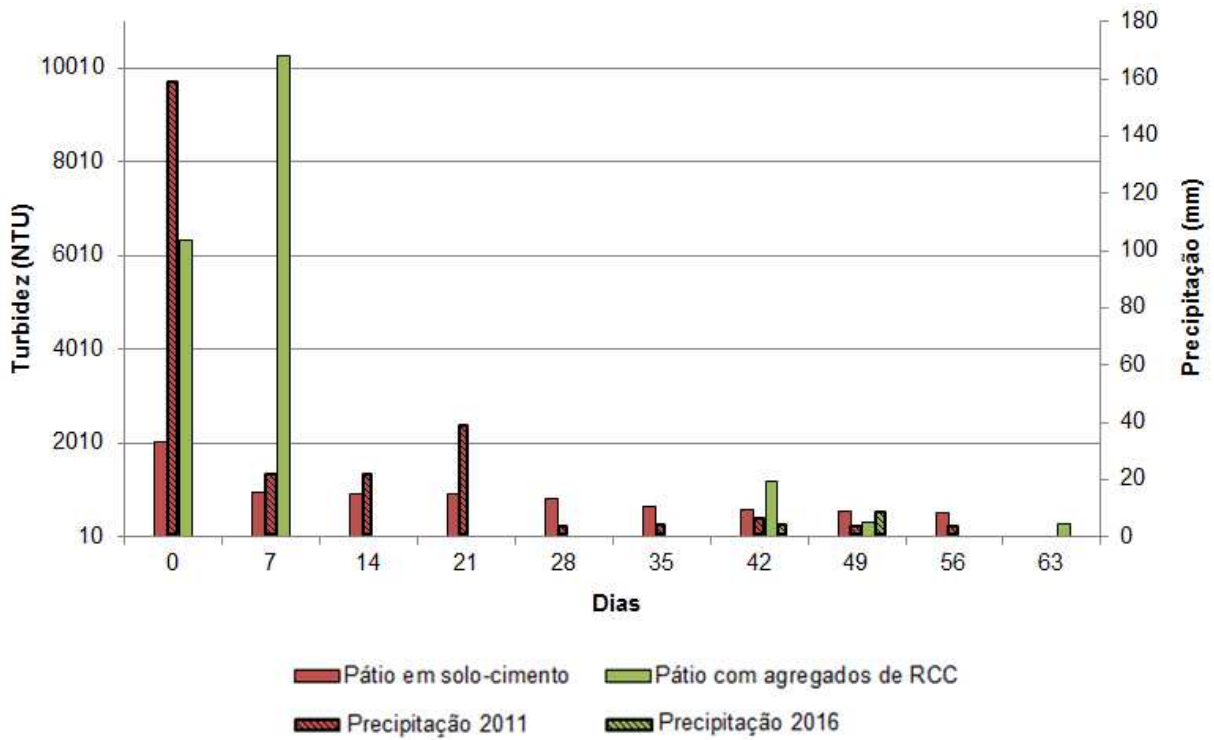


Figura 4-15. Turbidez dos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

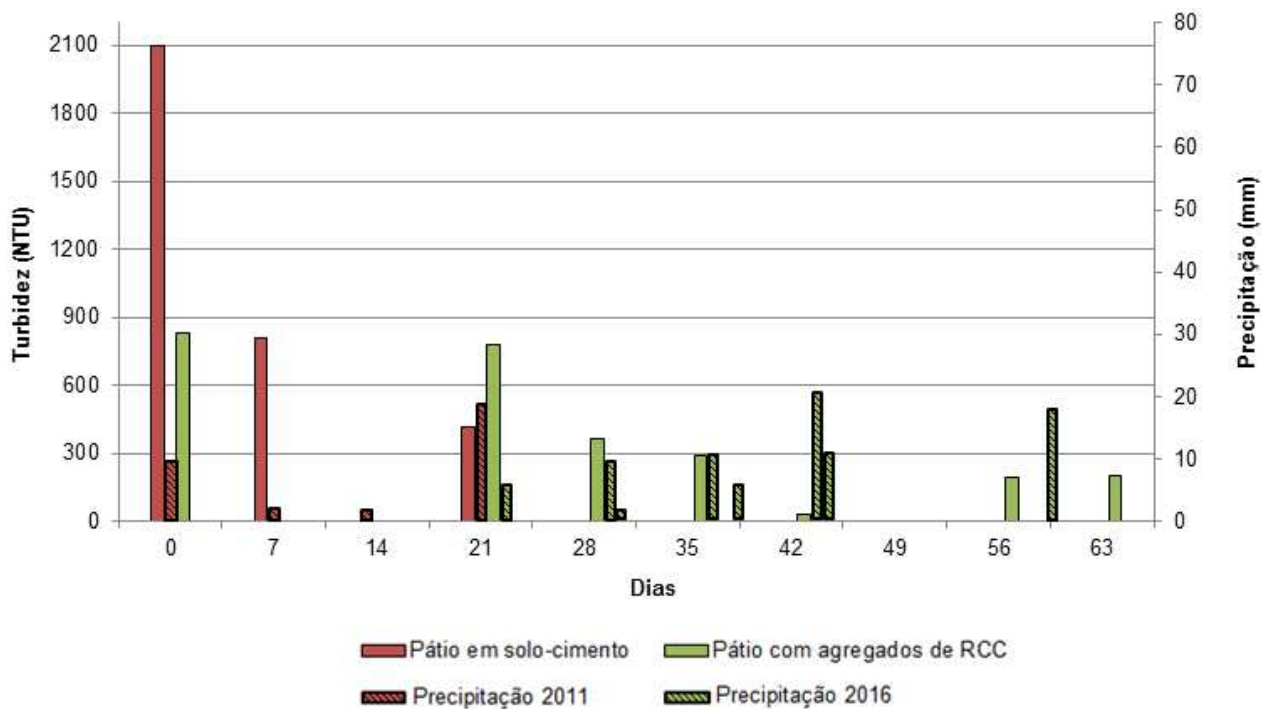


Figura 4-16. Turbidez dos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

4.2.2.2 Temperatura

A temperatura dos efluentes superficiais coletados em ambos os pátios situou-se, de forma geral, acima dos valores registrados para a temperatura ambiente, devido às condições de armazenamento (Figuras 4-17 e 4-18).

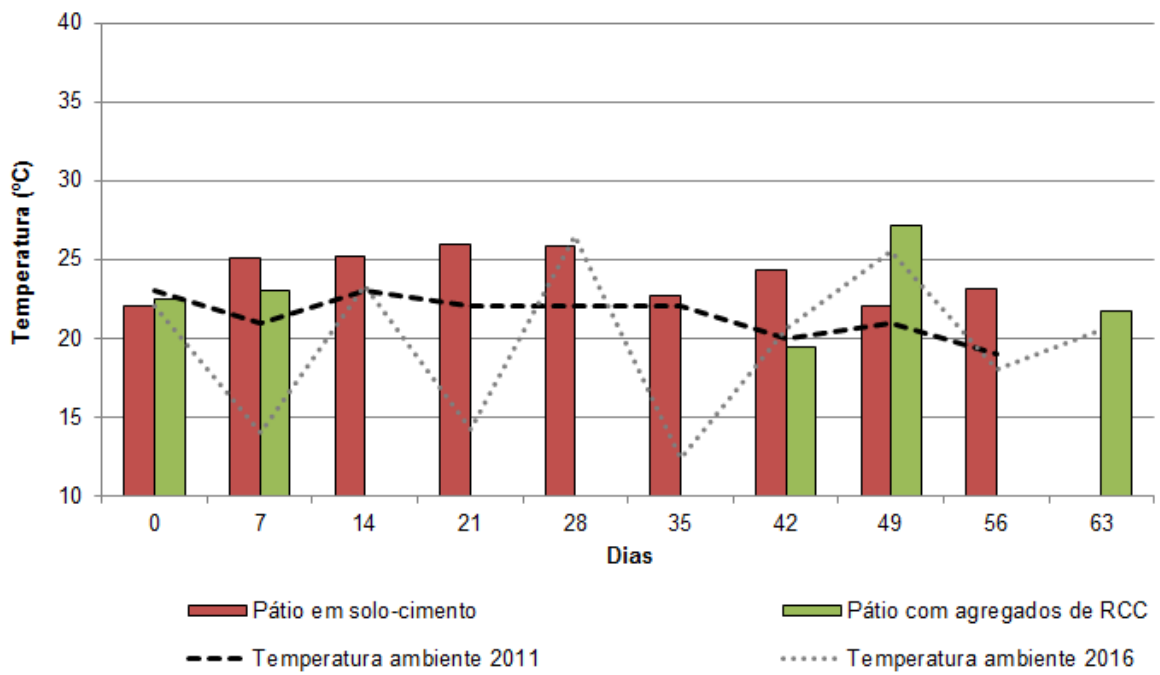


Figura 4-17. Temperatura dos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

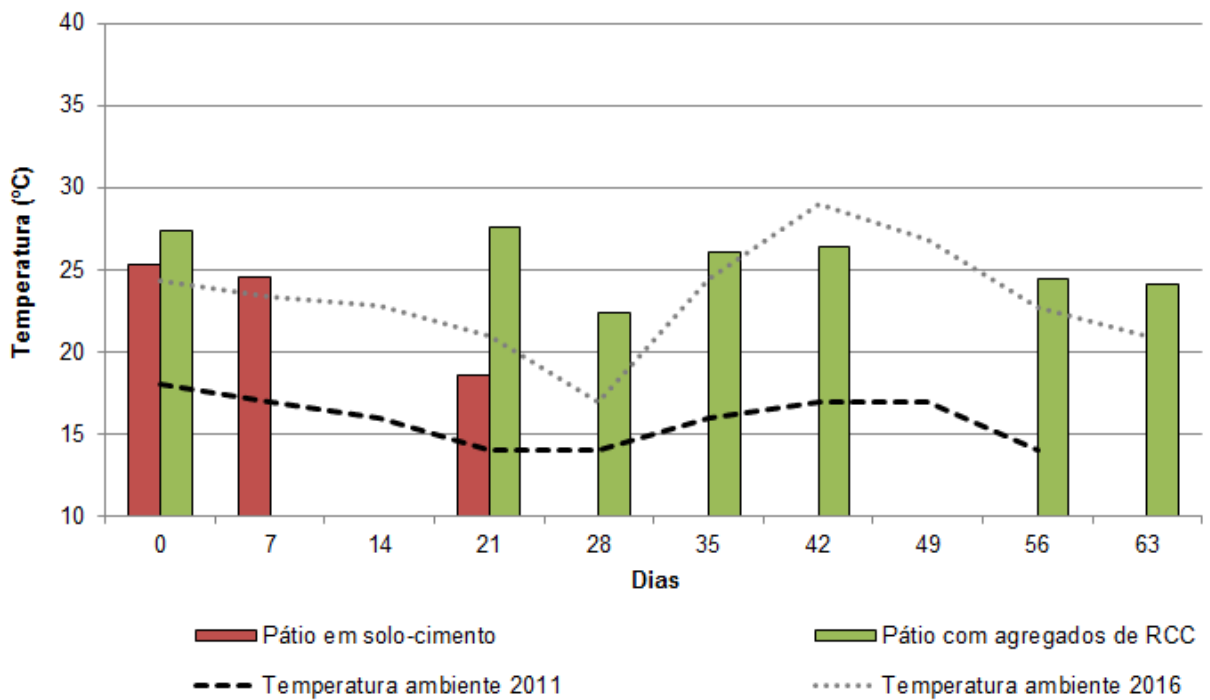


Figura 4-18. Temperatura dos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

4.2.2.3 pH

O pH dos efluentes coletados no Experimento 1, no pátio em solo-cimento, apresentou um valor inicial de 5,41 (Figura 4-19). Devido ao acúmulo de ácidos nos primeiros dias do processo de compostagem, o pH decresceu a valores próximos de 4,0, voltando a subir gradativamente somente após a quarta semana do processo, atingindo um valor final de 6,0. O pH dos efluentes coletados, no Experimento 1, no pátio executado com agregados de RCC, acompanhou, de certa forma, a variação de pH apresentada pela pilha de compostagem (Figura 4-19).

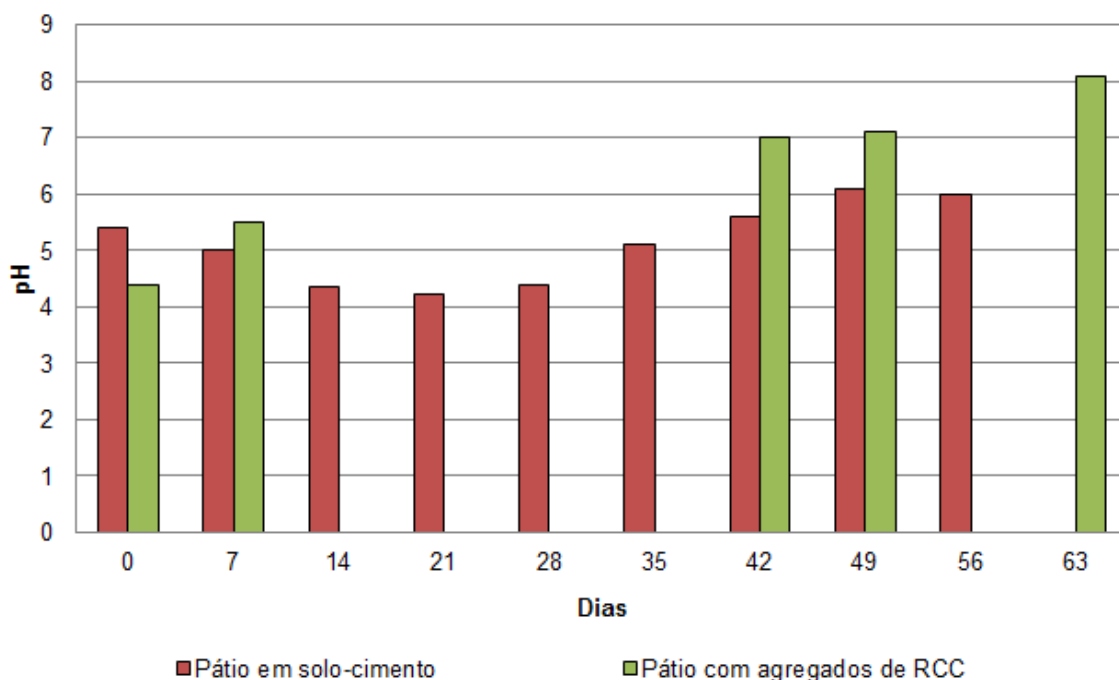


Figura 4-19. Valores de pH dos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

O pH dos efluentes coletados no Experimento 2, no pátio em solo-cimento, apresentou um valor inicial de 5,98, decrescendo para 4,98 (Figura 4-20), devido ao acúmulo de ácidos nos primeiros dias do processo de compostagem. O pH dos efluentes coletados, no Experimento 2, no pátio executado com agregados de RCC, apresentou valores próximos do neutro, tanto no início, quanto no término do processo de compostagem (Figura 4-20).

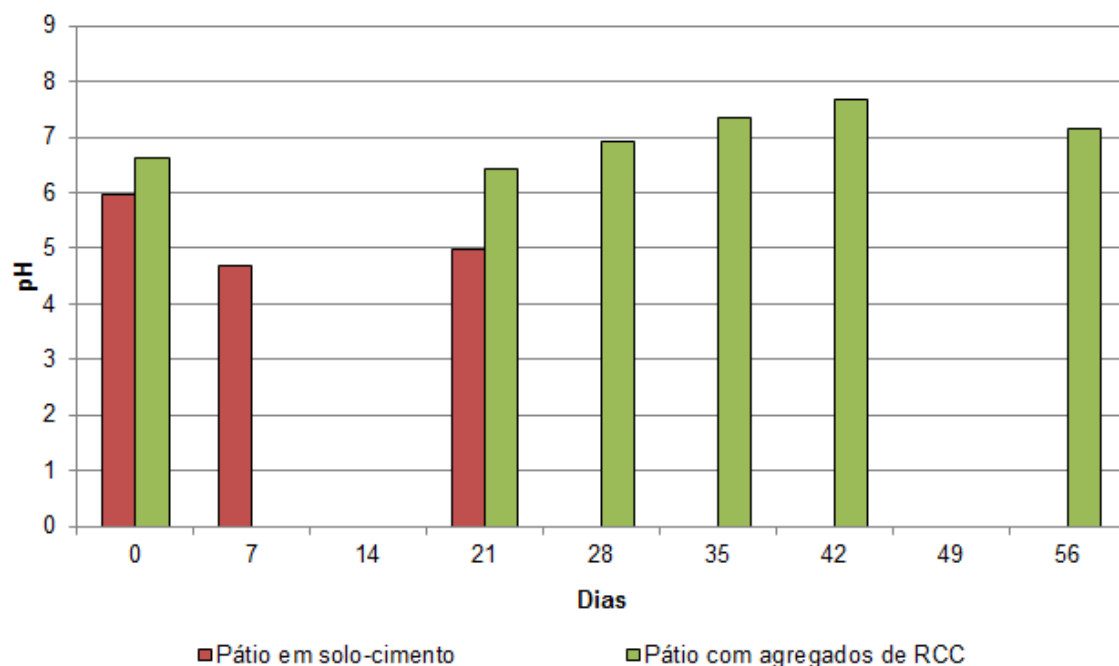


Figura 4-20. Valores de pH dos efluentes superficiais coletados nos Experimentos 2.

4.2.2.4 *Escherichia coli*

Quanto às análises de *Escherichia coli*, os efluentes coletados nos Experimentos 1 e 2 no pátio em solo-cimento não apresentaram valores acima do mínimo detectável (< 3 NMP/mL) pelo processo de NMP – Número Mais Provável (Tabela 4-7). Os resultados obtidos para os Experimentos 1 e 2, no pátio executado com agregados de RCC, pela técnica de substrato cromogênico da IDEXX (colilert), indicaram que os efluentes coletados (águas provenientes das chuvas e das regas), em virtude do contato com os resíduos orgânicos, permaneceram contaminados durante todo o período analisado (Tabela 4-7).

Tabela 4-7. Resultados das análises de *Escherichia coli* dos Experimentos 1 e 2.

ANÁLISES DE <i>ESCHERICHIA COLI</i>				
DIAS	EXPERIMENTO 1		EXPERIMENTO 2	
	Pátio em solo-cimento	Pátio com agregados de RCC	Pátio em solo-cimento	Pátio com agregados de RCC
0	<3	2,18 x 10 ³	<3	2,025 x 10 ⁴
7	<3	5,99 x 10 ³	<3	---
14	<3	---	---	---
21	<3	---	<3	1,86 x 10 ³
28	<3	---	---	2,348 x 10 ³
35	<3	---	---	1,13 x 10 ²
42	<3	9,78 x 10 ³	---	7,3 x 10 ¹
49	<3	1,0112 x 10 ³	---	---
56	<3	---	---	3 x 10 ¹
63	<3	1,28 x 10 ³	---	4 x 10 ¹

4.2.2.5 Metais pesados

Os valores das concentrações de Cu, Zn, Cd, Pb, Cr e Ni nos efluentes superficiais analisados foram comparados aos valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes nos corpos hídricos. Nas Figuras 4-21 a 4-26 encontram-se os valores das concentrações dos metais para o Experimento 1 e, nas Figuras 4-27 a 4-32 apresentam-se os valores para o Experimento 2.

Uma vez que os metais possuem maior mobilidade em ambientes ácidos (SOUZA V. et al., 2015), no Experimento 1 – Pátio com agregados de RCC, devido ao baixo pH inicial (4,4) e à geração de ácidos orgânicos no início da compostagem, no sétimo dia do processo, observou-se um aumento nas concentrações de Cu, Zn, Cr e Cd (Figuras 4-21, 4-22, 4-23 e 4-26). Tais concentrações extrapolaram os limites especificados pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Nos demais experimentos, as concentrações dos metais permaneceram abaixo dos limites da CONAMA nº 357, durante todo o período analisado.

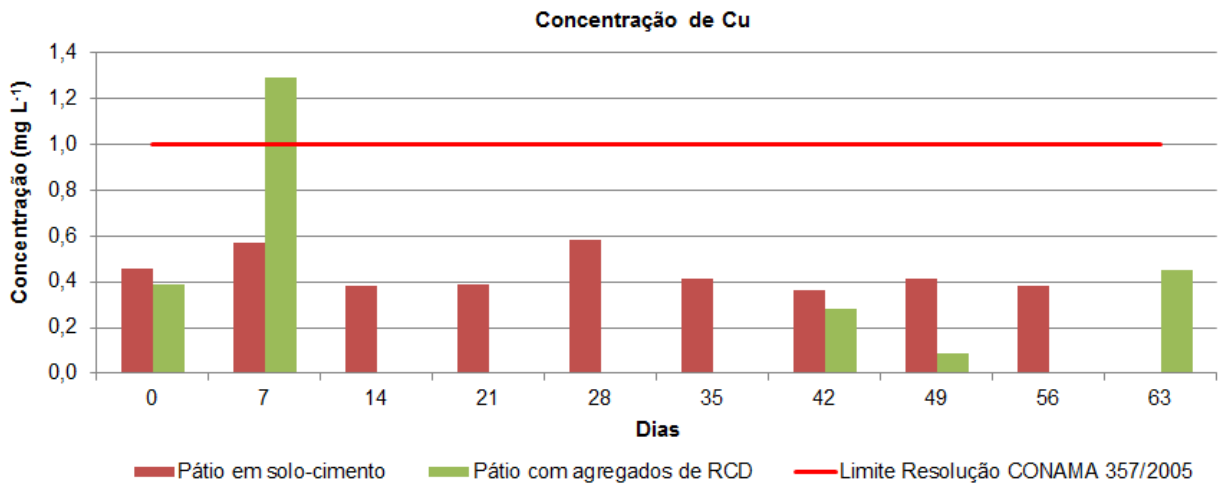


Figura 4-21. Concentração de Cu nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

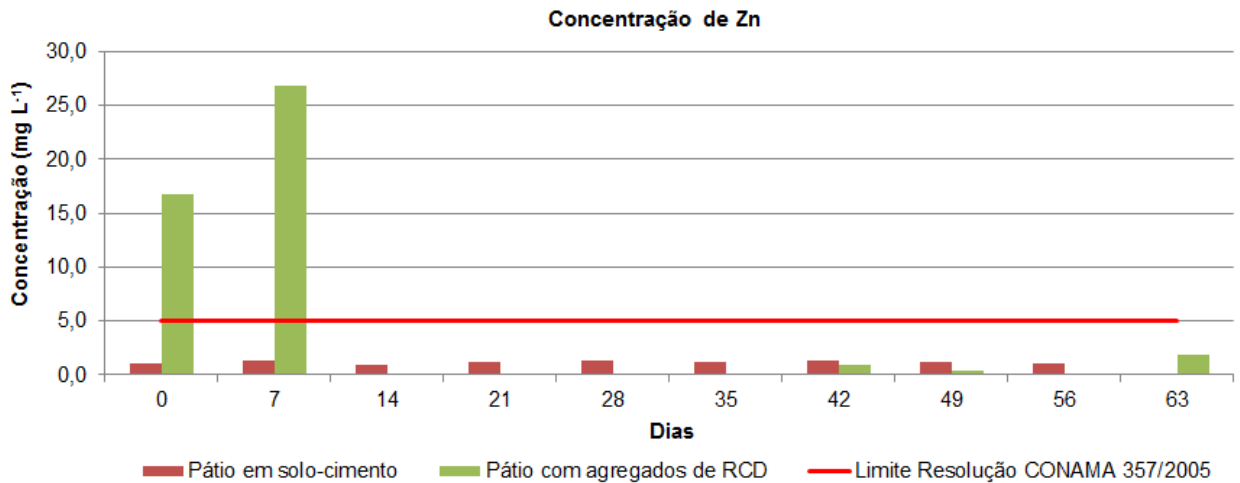


Figura 4-22. Concentração de Zn nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

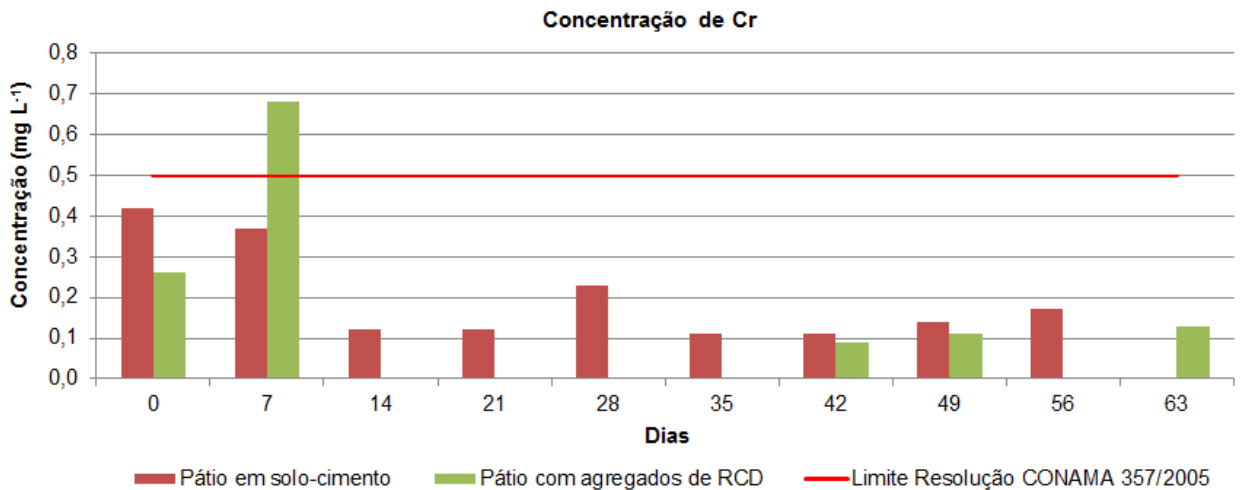


Figura 4-23. Concentração de Cr nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

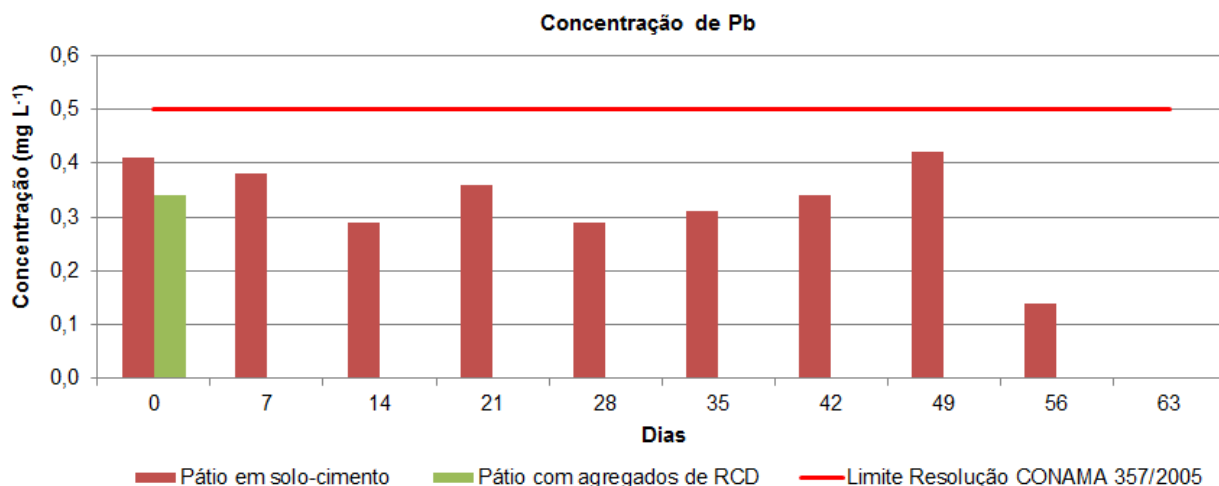


Figura 4-24. Concentração de Pb nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

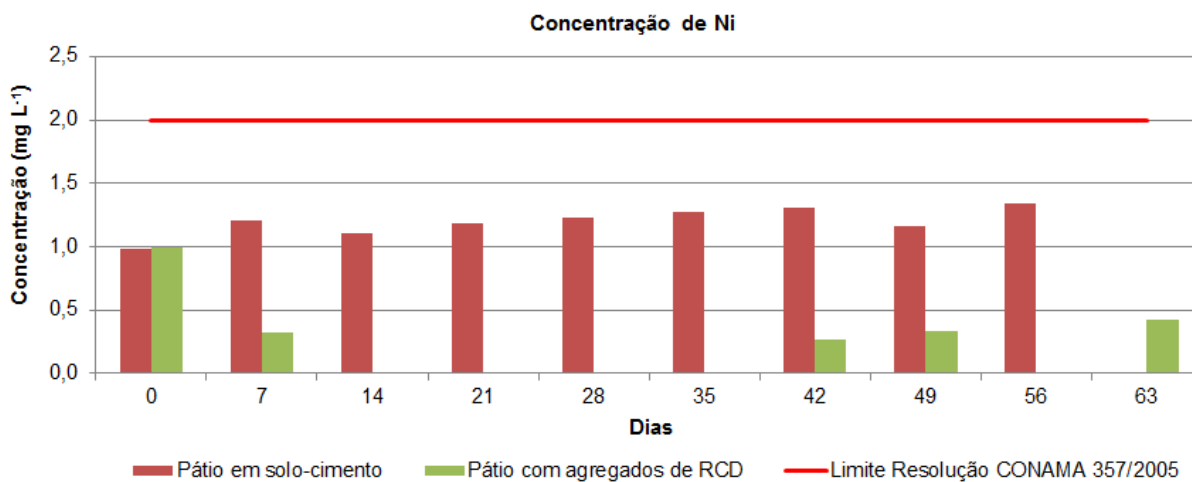


Figura 4-25. Concentração de Ni nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

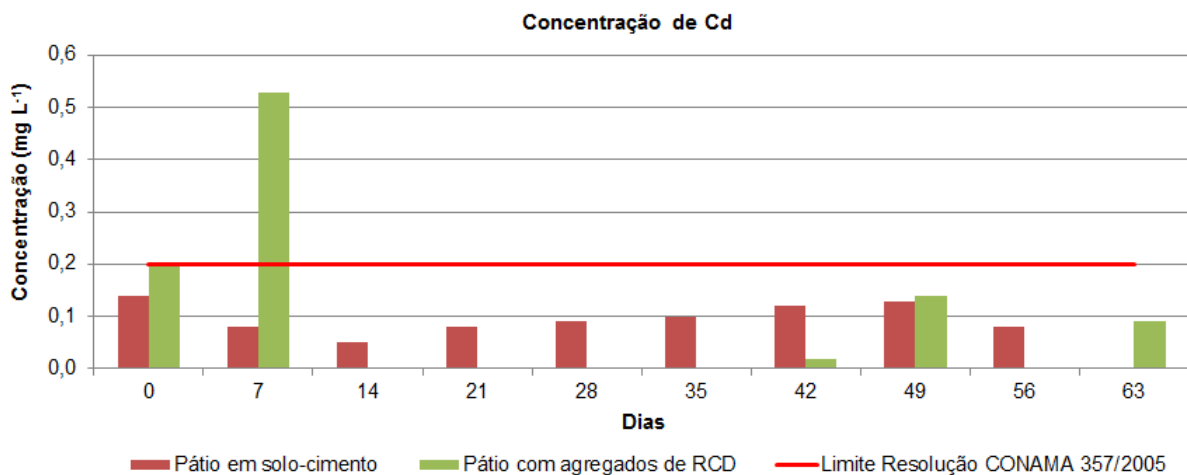


Figura 4-26. Concentração de Cd nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1.

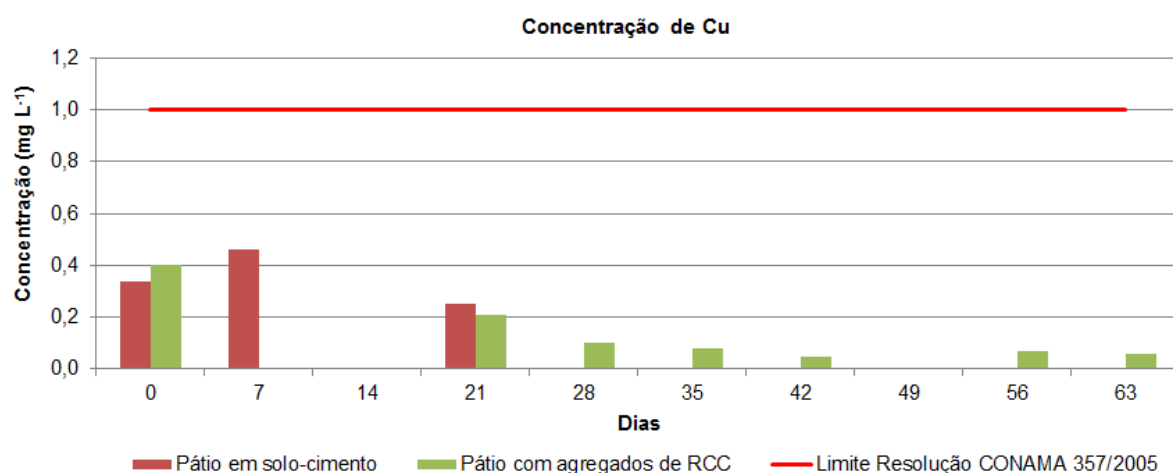


Figura 4-27. Concentração de Cu nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

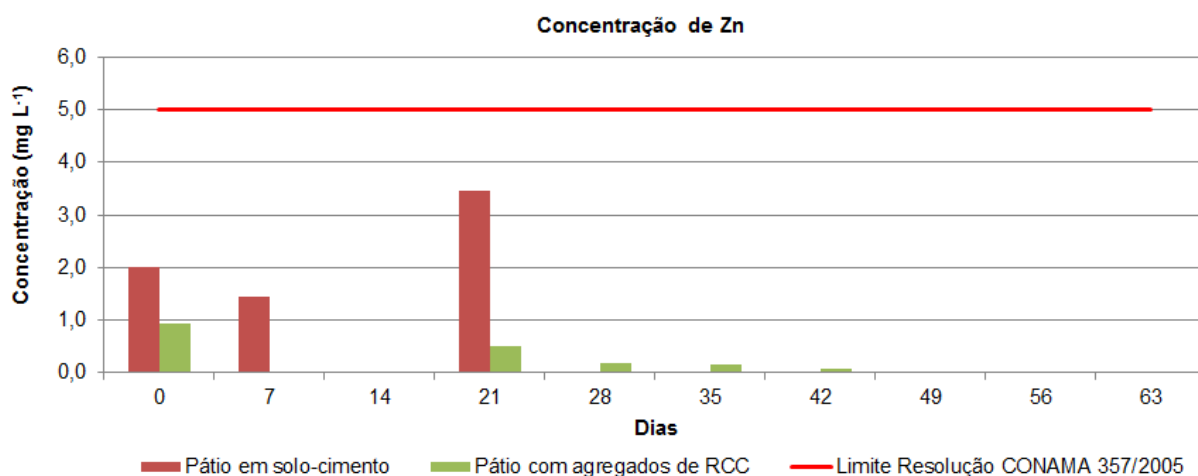


Figura 4-28. Concentração de Zn nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

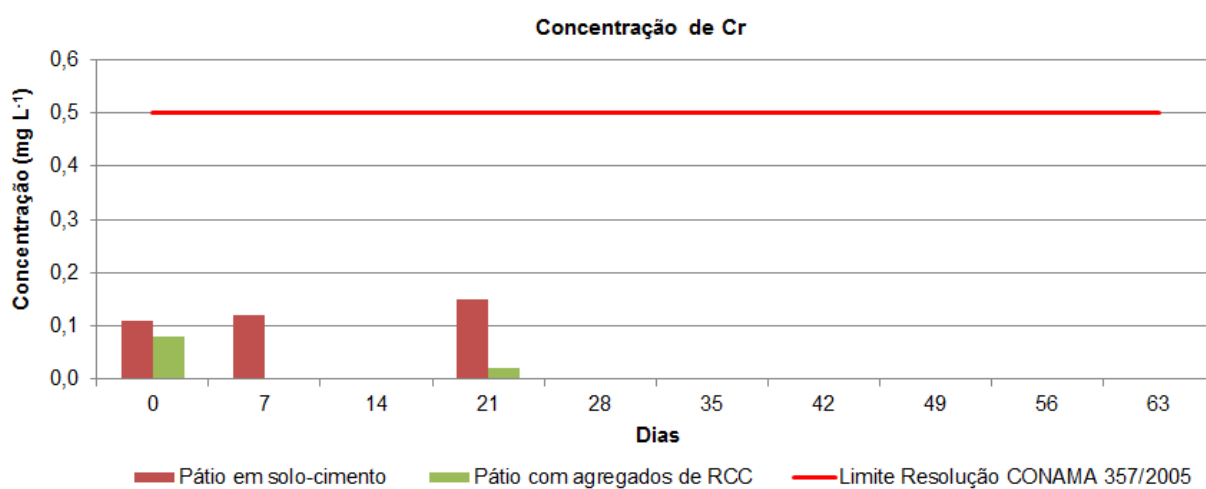


Figura 4-29. Concentração de Cr nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

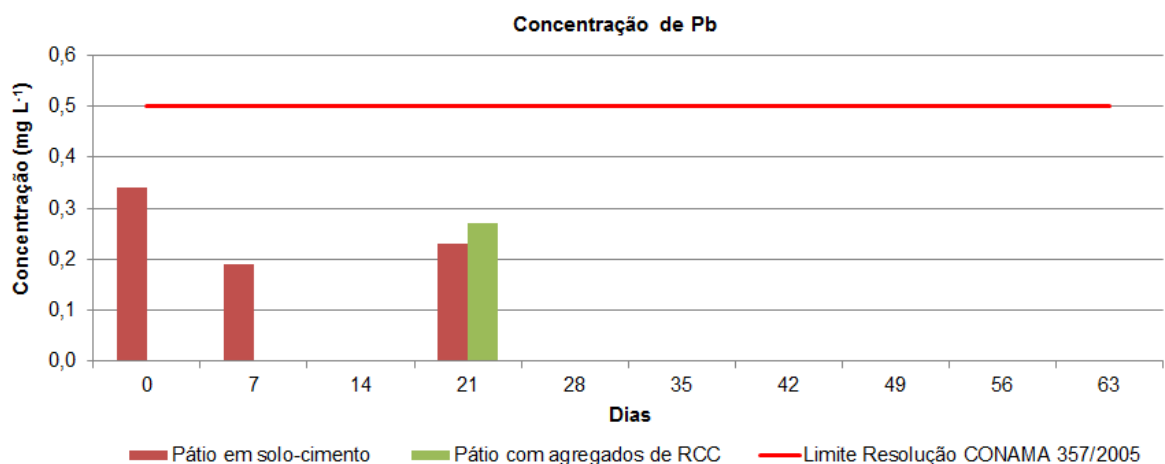


Figura 4-30. Concentração de Pb nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

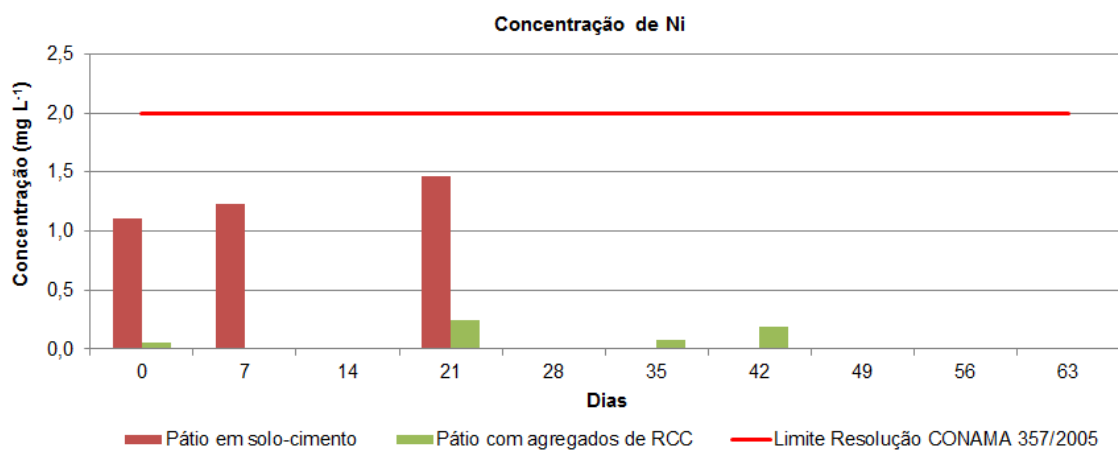


Figura 4-31. Concentração de Ni nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

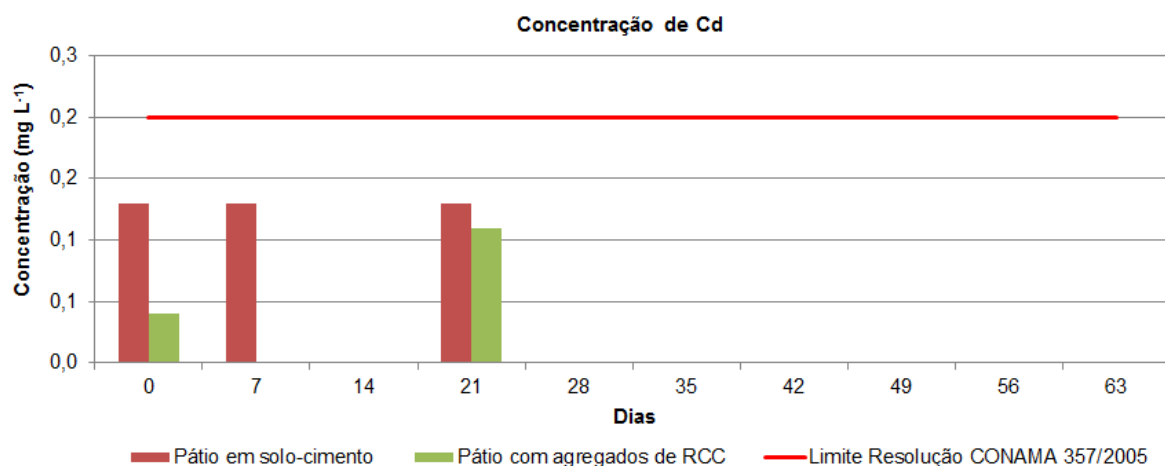


Figura 4-32. Concentração de Cd nos efluentes superficiais coletados no Experimento 2.

4.2.3 Análises dos efluentes infiltrados

Diferentemente dos pátios executados com concreto tradicional e solo-cimento, nos quais não houve infiltração, o pátio com agregados de RCC registrou a infiltração de aproximadamente 36 litros de efluente, durante o desenvolvimento do Experimento 2. Os resultados das análises dos efluentes infiltrados foram comparados com os encontrados para os efluentes superficiais.

4.2.3.1 Turbidez

O efluente infiltrado apresentou valores menores de turbidez em relação aos valores encontrados para os efluentes superficiais (Figura 4-33), o que evidencia o bom desempenho da camada drenante e da manta geotêxtil quanto à filtração de materiais.

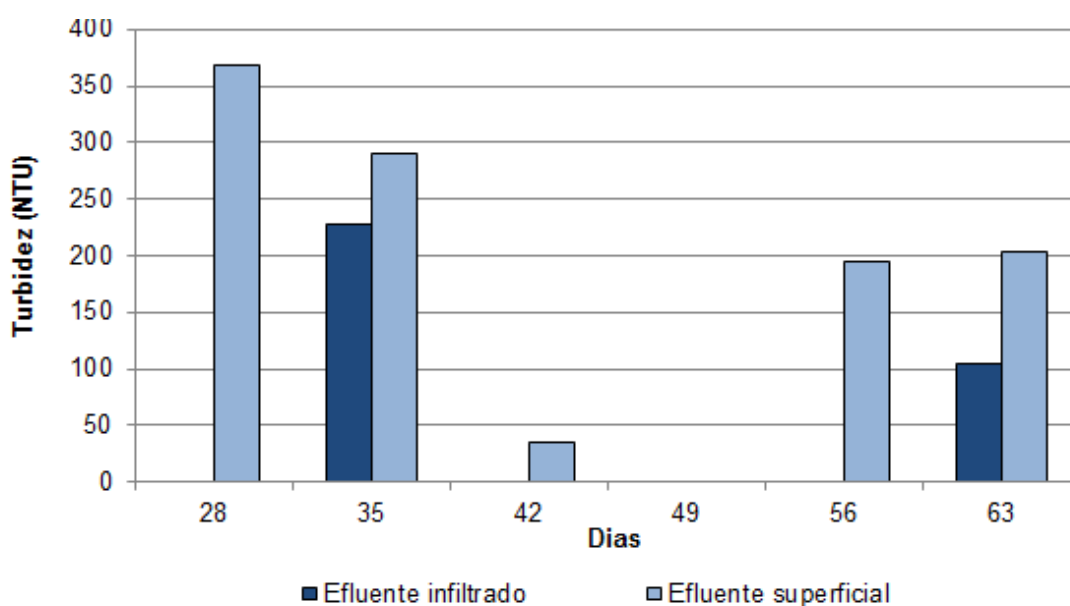


Figura 4-33. Turbidez do efluente infiltrado.

4.2.3.2 Temperatura

As temperaturas do efluente infiltrado foram inferiores às registradas para os efluentes superficiais, mas, permaneceram próximas à temperatura ambiente, devido às condições de armazenamento (Figura 4-34).

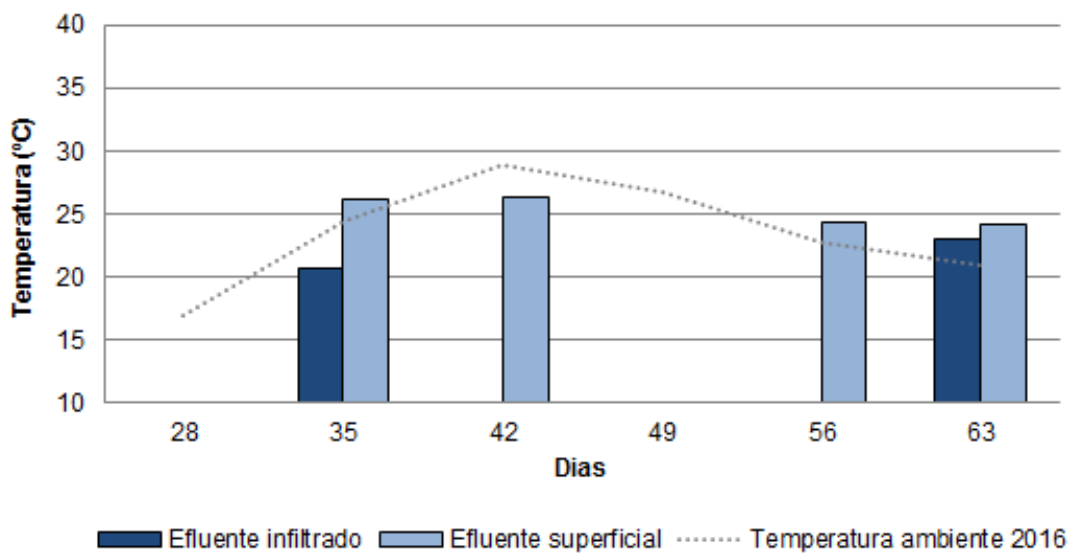


Figura 4-34. Temperaturas do efluente infiltrado.

4.2.3.3 pH

Os valores de pH do efluente infiltrado foram superiores aos encontrados para os efluentes superficiais (Figura 4-35). Logo, o contato do efluente infiltrado com os materiais constitutivos do pátio com agregados de RCC promoveu o aumento da basicidade do efluente.

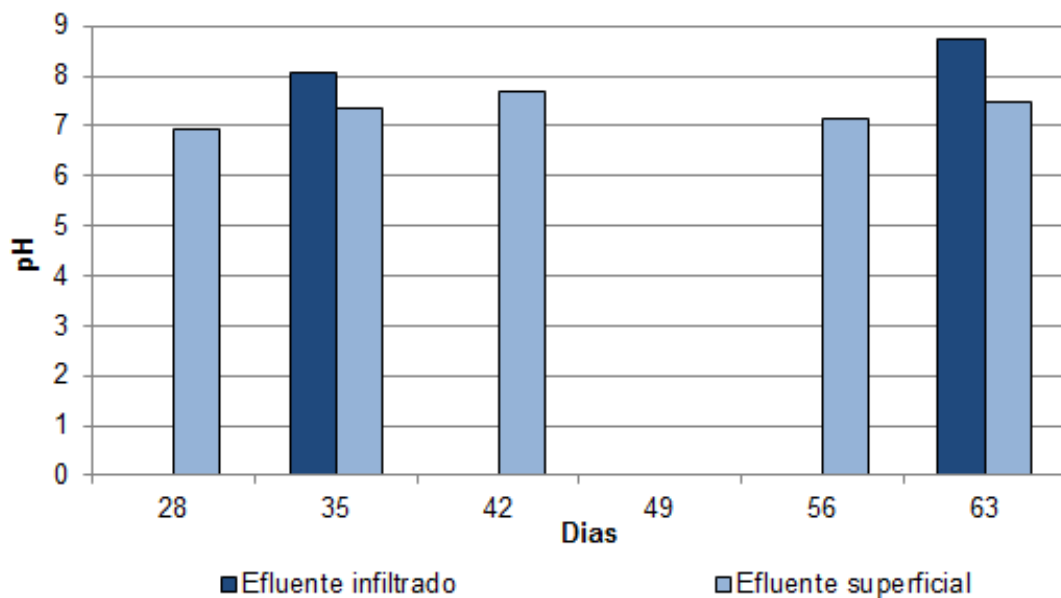


Figura 4-35. Valores de pH do efluente infiltrado.

4.2.3.4 *Escherichia coli*

Assim como os resultados obtidos para os efluentes superficiais, os obtidos para os efluentes infiltrados também indicaram a contaminação por *E. coli*, devido ao contato com os resíduos orgânicos (primeira coleta (04/10/2016): $1,34 \times 10^2$ NMP/mL; segunda coleta (01/11/2016): $1,09 \times 10^2$ NMP/mL).

4.2.3.5 Metais pesados

Foram avaliadas nos efluentes infiltrados, as concentrações de Cu, Zn, Cd, Pb, Cr e Ni, tendo sido detectadas apenas concentrações de Cu e Zn, referentes à primeira coleta (Tabela 4-8). Os valores encontrados foram comparados aos valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, estando dentro dos limites impostos pela norma.

Comparados aos resultados obtidos para os efluentes superficiais, coletados no mesmo dia, os efluentes infiltrados apresentaram menores concentrações de Cu, Zn e Ni (Tabela 4-9). Acredita-se que tais resultados estejam relacionados à maior basicidade do meio (pH = 8,08), já que nessa condição os metais possuem menor mobilidade (SOUZA V. et al., 2015).

Tabela 4-8. Concentrações de metais pesados nos efluentes infiltrados.

COLETA	METAIS PESADOS					
	Cu (1,0 mg L ⁻¹)	Zn (5,0 mg L ⁻¹)	Cr (0,5 mg L ⁻¹)	Pb (0,5 mg L ⁻¹)	Ni (2,0 mg L ⁻¹)	Cd (0,2 mg L ⁻¹)
1	0,07	0,12	ND	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*ND – NÃO DETECTÁVEL.

Tabela 4-9. Concentrações de metais pesados no efluente infiltrado e superficial no dia 04/10/2016.

EFLUENTE	METAIS PESADOS					
	Cu (1,0 mg L ⁻¹)	Zn (5,0 mg L ⁻¹)	Cr (0,5 mg L ⁻¹)	Pb (0,5 mg L ⁻¹)	Ni (2,0 mg L ⁻¹)	Cd (0,2 mg L ⁻¹)
SUPERFICIAL (pH – 7,33)	0,08	0,17	ND	ND	0,08	ND
INFILTRADO (pH – 8,08)	0,07	0,12	ND	ND	ND	ND

*ND – NÃO DETECTÁVEL.

4.3 Monitoramento da estanqueidade e patologias

Os pátios analisados apresentaram distintos comportamentos quanto à estanqueidade e ao surgimento de patologias. Os pátios executados com concreto tradicional e solo-cimento se mostraram satisfatórios em relação a tais parâmetros, uma vez que alterações e infiltrações não foram constatadas. Já no pátio executado com agregados de RCC, por meio da verificação visual periódica do aspecto da superfície do pátio, observou-se o aparecimento de anomalias, como fissuração e desagregação na estrutura do concreto (Figuras 4-36 e 4-37), ao longo do processo de compostagem, o que possivelmente contribuiu para a infiltração de cerca de 36 litros de efluentes superficiais.

Como os agregados reciclados tendem, no geral, a apresentar reduções nas suas propriedades físicas e mecânicas, quando comparados aos naturais (CABRAL, 2007), tais resultados eram esperados e se assemelham aos encontrados por Topçu (1997), Dhir et al. (2004) e Zaharieva et al. (2003).

Nos experimentos realizados por Topçu (1997) e Dhir et al. (2004), os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram elevada abrasão em relação aos concretos produzidos com agregados naturais, devido ao elevado teor de finos. Zaharieva et al. (2003), ao avaliarem as propriedades de permeação do concreto produzido com agregados reciclados, constataram que a permeabilidade à água deste, correspondeu ao dobro da permeabilidade verificada para o concreto confeccionado com agregados naturais.

Desse modo, acredita-se que o surgimento de patologias no pátio com agregados de RCC esteja relacionado ao elevado teor de materiais pulverulentos (11,56%) encontrado nos agregados reciclados utilizados na execução do pátio de

compostagem. Como consequência, este teor incidiu na taxa de absorção de água elevando-a (em torno de 7%), o que, possivelmente, acarretou em maior desgaste por abrasão e fissuração do concreto endurecido.

Supõe-se que a fluência e o desgaste por abrasão sejam os principais fatores responsáveis pela degradação do concreto, considerados os contínuos esforços mecânicos exercidos sobre a superfície do pátio durante o processo de compostagem. Além destes, a degradação do concreto está também possivelmente relacionada à atividade metabólica dos microrganismos atuantes no processo de degradação da matéria orgânica, que tendem a liberar produtos de caráter ácido, que comprometem a integridade do concreto.



Figura 4-36. Fissuras do pátio executado com agregados de RCC.



Figura 4-37. Desagregação do pátio executado com agregados de RCC.

4.4 Comparação de custos

Tomando-se por base a quantidade de materiais gastos na execução do pátio de compostagem com agregados reciclados e, levando-se em conta os preços de areia reciclada (R\$ 29,33) e brita reciclada (R\$ 29,00), fornecidos por Paschoalin Filho et al. (2015), que corrigidos, corresponderam, respectivamente, a R\$ 14,74 e R\$ 14,57, o valor do metro quadrado do pátio com agregados de RCC seria de R\$ 32,08 (Tabela 4-10).

Em relação ao pátio executado com concreto tradicional, este valor representaria uma redução de 18,68% nos custos de implantação desta estrutura de uma UTC. Assim, de acordo com os orçamentos realizados por Novais (2011), a adoção de agregados reciclados na confecção do pátio de compostagem proporcionaria uma redução de 4,64% no valor total de implantação de uma UTC, para um município com até 10.000 habitantes (Tabela 4-11).

Todavia, em relação ao pátio em solo-cimento, o pátio executado com agregados reciclados apresentou menor viabilidade econômica, visto que superou o custo deste em 17,77%. O que elevaria o custo total de implantação de uma UTC em 3,30%.

Tabela 4-10. Orçamentos ilustrativos de pátios em concreto tradicional, em solo-cimento e com agregados de RCC (R\$/m²).

ITEM	UNIDADE	PÁTIO EM CONCRETO		PÁTIO EM SOLO-CIMENTO		PÁTIO COM AGREGADOS DE RCC	
		Preço unitário	Preço total por m ²	Preço unitário	Preço total por m ²	Preço unitário	Preço total por m ²
Limpeza de terreno	m ²	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Nivelamento	m ²	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Locação de obra	m ²	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
Fôrma e desfôrma	m ²	15,37	15,37	15,37	15,37	15,37	15,37
Concreto tradicional	m ³	232,94	18,64	--	--	--	--
Cimento	Kg	--	--	0,39	4,08	0,39	10,37
Areia reciclada	m ³	--	--	--	--	14,74	0,47
Brita reciclada	m ³	--	--	--	--	14,57	0,43
Escavação e transporte de solo de 1 ^a categoria	m ³	--	--	4,07	0,33	--	--
Compactação mecanizada	m ²	--	--	2,02	2,02	--	--
TOTAL	R\$/m²		39,45		27,24		32,08

Fonte: Adaptado de Novais (2011).

Tabela 4-11. Orçamento de uma UTC com pátio em concreto, solo-cimento e com agregados de RCC.

DESCRIÇÃO	PREÇO TOTAL (R\$)		
	Concreto tradicional	Solo-cimento	Agregados de RCC
UTC (exceto pátio)	131.452,97	131.452,97	131.452,97
Pátio em concreto tradicional (1.100 m ²)	43.395,00	--	--
Pátio em solo-cimento (1.100 m ²)	--	29.964,00	--
Pátio com agregados de RCC (1.100 m ²)	--	--	35.288,00
TOTAL	174.847,97	161.416,97	166.740,97

Fonte: Adaptado de Novais (2011).

CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve por objetivo avaliar e comparar o desempenho de um pátio de compostagem, construído em concreto com agregados reciclados provenientes de resíduos Classe A, com o de pátios construídos com solo-cimento e concreto tradicional, avaliados por Novais (2011). Para isso, foram analisadas as características dos agregados reciclados, com base nos resultados obtidos por Cruz D. e Pereira (2015), realizados ensaios de monitoramento do processo de compostagem, e monitoradas a estanqueidade e o surgimento de patologias na estrutura do concreto.

As conclusões extraídas desse trabalho são as seguintes:

- Verificou-se que, de forma geral, as características dos agregados reciclados atenderam às especificações estabelecidas pelas normas ABNT NBR 7211:2005 e ABNT NBR 15116:2004.
- A compostagem nos Experimentos 1 e 2, realizada no pátio com agregados de RCC, ocorreu com baixos teores de umidade. Tal situação dificultou o prolongamento da fase termofílica e, conseqüentemente, restringiu a atividade microbiológica.
- Apesar de terem sido observadas variações na temperatura e umidade nos experimentos, as pilhas de resíduos dos três pátios analisados apresentaram valores semelhantes de pH ao término do processo.
- O processo de compostagem no pátio com agregados de RCC realizou-se de forma satisfatória quanto à redução de sólidos voláteis, à mineralização da matéria orgânica e à redução de microrganismos indicadores.
- As concentrações de metais pesados, tanto no composto orgânico, quanto nos efluentes infiltrados coletados, não foram significativas, não oferecendo, portanto, risco de contaminação.
- As concentrações de Cu, Zn, Cr e Cd nos efluentes superficiais coletados no Experimento 1 – Pátio com agregados de RCC, no sétimo dia do processo de

compostagem, superaram os limites especificados pela Resolução CONAMA nº 357/2005, o que aponta para a necessidade de tratamento.

- Diferente dos pátios executados com concreto tradicional e solo-cimento, a resistência mecânica do pátio executado com agregados de RCC se mostrou insatisfatória, tendo sido observado o desenvolvimento de anomalias, como fissuração e desagregação do concreto, ao longo do processo de compostagem.
- A estanqueidade do pátio com agregados de RCC também se mostrou insatisfatória, tendo sido coletados, durante o período analisado, cerca de 36 litros de efluente. Em relação a esse atributo, o pátio em solo-cimento se mostrou satisfatório.
- Quanto à viabilidade econômica, quando comparado ao pátio executado com concreto tradicional, a adoção de agregados reciclados na confecção do pátio de compostagem representaria uma redução de 18,68% nos custos de sua implantação e proporcionaria uma redução de 4,64% no valor total de implantação de uma UTC, para um município com até 10.000 habitantes.
- O pátio em solo-cimento apresentou maior viabilidade econômica, entre os três analisados.

Por fim, como sugestão para prosseguimento da pesquisa recomenda-se:

- Avaliar a adição de outros materiais aos agregados reciclados a fim de melhorar o desempenho de sua resistência e estanqueidade.
- Analisar a aplicabilidade de outros materiais para a confecção do pátio de compostagem.
- Examinar o desempenho do concreto executado com agregados reciclados com menores teores de finos.
- Verificar diferentes traços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Entulho: mercado**. 2014. Disponível em: <<http://www.abrecon.org.br/mercado/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

ABRELPE – Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. São Paulo, SP: ABRELPE, 2015. 120 p.

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. 2006. 173 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. MG, 2006.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: APHA/AWWA/WPCF, 1985. 1268p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 170 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concretos - Especificação. Rio de Janeiro, 2005, 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001, 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001, 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregado – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “*Los Angeles*”. Rio de Janeiro, 2001, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 2010, 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12254**: Execução de Sub-Base ou Base de Solo-Cimento. Rio de Janeiro: 1990. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: 2004. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: 2004. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: 2004. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: 2004. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. 12 p.

AZEVEDO, I. C. A. D.; MESQUITA, L. C. **Resíduos da construção civil no município de Viçosa, MG**: avaliação da atual gestão e de seu uso em barreiras químicas e como agregado na construção civil. Viçosa, MG: PIBIC/CNPq, 2012. Relatório.

AZEVEDO, M. A. **Compostagem de Resíduos Sólidos Orgânicos – Aspectos Teóricos e Operacionais**. DEC/UFV, 2004. 55 p. (Apostila).

AZEVEDO, M. A. **Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras**. 1993. 230 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) Escola de Engenharia da UFMG, – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1993.

AZEVEDO, M. A.; CRUZ, M.C.C. **Unidades de triagem e Compostagem – Implantação e Operação**. Convênio SEMAD/UFV. Viçosa, 2008. 68 p. (Apostila).

BATALHA, E. Política Nacional de Resíduos Sólidos: lixões tempo esgotado. **Radis**, Rio de Janeiro, RJ, nº 149, p. 29-31, Fev. 2015. Disponível em: <http://www6.ensp.fiocruz.br/radis/sites/default/files/radis_149_site.pdf>. Acesso em: 14 out. 2015.

BERTOLDI, M.; VALLINI, G.; PERA, A. The biology of composting: a review. **Waste Management & Research**, p. 157-176, 1983.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120 p.

BIDONE, F. A. (Org.). **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: eliminação e valorização**. Brasília: FINEP/PROSAB, 2001. 216 p.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2000.

BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2010.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, SP, v. 61, n. 358, p. 178-189, Abr./Jun. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00178.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254 f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2002.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. **Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2004.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2005.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2006.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. **Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2011.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 448, de 18 de janeiro de 2012. **Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2012.

CONEN. **Plano Municipal de Saneamento Básico:** Divinésia. 2014. Disponível em: <http://54.94.199.16:8080/publicacoesArquivos/ceivap_pubMidia_Processo_064-2013_Divinesia_VF.pdf>. Acesso em: 15 de dez. 2016.

CRUZ, D. S.; PEREIRA, R. M. R. **Avaliação de concreto dosado com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2015. 64 f. Monografia (Conclusão de curso) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. **Cimentos.** 2016. Disponível em: <http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59832>. Acesso em: 06 de dez. 2016.

CUNHA JÚNIOR, N. B. (Coord.). **Cartilha de gerenciamento de resíduos sólidos para a construção civil.** SINDUSCON-MG, 2005. 38 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER ES-305/97.** Pavimentação-base de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1997.

DHIR, R.; PAINE, K.; DYER, T. Recycling construction and demolition wastes in concrete. **Concrete**, v. 38, n. 3, p. 25-28, 2004.

EFFTING, C. **Laboratório de materiais de construção** - II – 1ª parte – Agregados. Joinville, 2014. 45 p. (Apostila). Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carmeane/materiais/APOSTILA__E_NSAIOS__TECNOLOGICOS_AGREGADOS_2014_1__4_.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2017.

FAGURY, S. C.; GRANDE, F. M. Gestão de resíduos da construção e demolição (RCD): aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP. **Exacta**, São Paulo, SP, v.5, n.1, p.35-45, Jan./Jun. 2007. Disponível em: <http://www.uninove.br/PDFs/Publicacoes/exacta/exactav5n1/exacta_v5n1_3b46.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

GOLUEKE, C. G. Biological processing: composting and hydrolisis. In: WILSON, D. G. (Ed.). **Handbook of solid waste management**. New York: Van Nostrand Reinholds Company, 1977. p. 197-225.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316 p.

HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**: Divinésia. 2016b. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/municipio/3121902>>. Acesso em: 15 de dez. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2016**. 2016a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2016/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 15 de dez. 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações automáticas** – gráficos. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 07 jan. 2017.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**: relatório de pesquisa. Brasília, 2012a. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**: relatório de pesquisa. Brasília, 2012b. Disponível em:

<http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

JORNAL O DIA. **Restos de obras viram problema para o meio ambiente**. 2012. Disponível em: <<http://odia.ig.com.br/portal/cienciaeidade/vidaemeioambiente/restos-de-obras-viram-problema-para-o-ambiente-1.487008>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem**: maturação e qualidade do composto. 4. ed. Piracicaba: Editora Degaspari, 2004. 173 p.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.

MACHADO, G. B. **Lei 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Portal dos resíduos sólidos. 2013. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/lei-12-3052010-politica-nacional-de-residuos-solidos/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

MARTINS, P. B. M. **Influência da granulometria agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. 2008. 80 f. Monografia (Conclusão de curso) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997.

NOGUEIRA, C. M.; CAMPOLINA, G.; RIBEIRO, L. L.; GUADANINI, L. E. M.; BARBOSA, M. L. M.; FABRI, E. S. Reciclagem de resíduos da construção civil: Estação SLU – Estoril / Belo Horizonte/MG. **Pós em Revista do Centro Universitário Newton Paiva**, Belo Horizonte, MG, ed. 6, p. 162-166, 2012. Disponível em: <<http://blog.newtonpaiva.br/pos/wp-content/uploads/2013/04/PDF-E6-ENG19.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

NOVAIS, T. M. F. **Execução de um pátio de compostagem em solo-cimento análises de suas propriedades e influência no processo de compostagem**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

OLIVEIRA, D. D.; SOARES, F. D. N.; BATISTA, G. S.; MAGNI, J. R.; KRUG, L. F. Produção de concreto com uso de agregados reciclados oriundos de resíduos da construção civil. In: Seminário de Iniciação Científica, 24., 2016, Panambi. **Anais...** Panambi. 2016. Disponível em: <<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/download/7218/5985>>. Acesso em: 07 jan. 2017.

OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem**. Piracicaba. Universidade de São Paulo/ESALQ. 2008.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; FARIA, A. C.; PIRES, G. W. M. O. Custos de implantação de usinas para reciclagem de resíduos de construção civil no estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, 18., 2015. **Anais...** 2015. Disponível em: <http://www.simpoi.fgvsp.br/arquivo/2015/artigos/E2015_T00201_PCN33492.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2017.

PEIXOTO, R. T. G. **Compostagem: opção para o manejo orgânico do solo**. Londrina: IAPAR, 1988, 48p.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de compostagem processo de baixo custo**. Belo Horizonte: UNICEF. 1996. 56p.

PEREIRA NETO, J. T. Tratamento, reciclagem e impacto ambiental de dejetos agrícolas. In: CONFERÊNCIA SOBRE AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE, 1., 1992, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV-NEPEMA, 1994. p. 61-74.

PEREIRA NETO, J. T.; LELIS, M. P. N. Importância da umidade na compostagem: uma contribuição ao estado da arte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 1691-1698.

PEREIRA NETO, J. T.; LELIS, M.P.N. A contaminação biológica na compostagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001. p.1-6.

PEREIRA NETO, J.T. **On the treatment of Municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting** - A low cost technology approach. 1987. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Leeds Metropolitan University, Leeds, Inglaterra, 1987.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 14 ed. São Paulo: Editora Globo, 2005. 307 p.

PINTO, T. P. (Coord.). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil**. SINDUSCON-SP, 2005. 48 p.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.

QUEIROZ, M. T. A.; QUEIROZ, C. A.; SABARÁ, M. G.; LEÃO, M. M. D.; AMORIN, C. C. Estudo de caso: aproveitamento do resíduo da construção civil em Coronel Fabriciano, Minas Gerais. **Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial**, Florianópolis, SC, v. 6, n. 11, 2014. Disponível em: <http://incubadora.periodicos.ufsc.br/index.php/IJIE/article/view/2964/pdf_33>. Acesso em: 11 nov. 2016.

QUEMEL, L. **A caracterização e resistência do seixo fino (quebradinho) no município de Santarém – PA**. 2015. 41 f. Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos e Saneamento Urbano) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2015.

RIBEIRO, F. H. M. **Agregados para a construção civil**. 2009. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/guestd71d29/aula-agregados-1>>. Acesso em: 08 jan. 2017.

RICHARD, T.; TRAUTMANN, N.; KRASNY, M.; FRENDENBURG, S.; STUART, C. **The science and engineering of composting**. The Cornell composting website, Cornell University. 2002. Disponível em: <http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/cornell_composting.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2015.

RODRIGUES, M. S.; SILVA, F. C.; BARREIRA, L. P.; KOVACS, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C.; RIBEIRO, W. (Ed.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006. p. 63-94.

SCHULTMANN, F.; SINDT, V.; RUCH, M.; RENTZ, O. Strategies for the quality improvement of recycling materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE BUILDINGS AND THE ENVIRONMENT, 2., 1997, Paris. **Proceedings**. Paris, 1997. p. 611-618.

SILVA, M. R.; PINHEIRO, S. M. M. Biodeterioração do concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 28, p. 857- 878.

SOUZA, L. M.; ASSIS, C. D.; SOUTO, S. B. G. Agregado reciclado: um novo material da construção civil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, RS, v. 18, n. 1, p. 273-278, Abr. 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/11297/pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2017.

SOUZA, V. L. B.; LIMA, V.; HAZIN, C. A.; FONSECA, C. K. L.; SANTOS, S. O. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 03, p. 01-13, 2015.

TANG, J. C.; KANAMORI, T.; INOUE, Y.; YASUTA, T.; YOSHIDA, S.; KATAYAMA, A. Changes in the microbial community structure during termophilic composting of manure as detected by the quinone profile method. **Process Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 1999–2006, 2004.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação das propriedades do concreto com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2007.

TIQUIA, S. M. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. **Journal of Applied Microbiology**, v. 99, p. 816-828, 2005.

TOPÇU, I. B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 12, p. 1817-1823, 1997.

TUOMELA, M.; VIKMAN, M.; HATAKKA, A.; ITAVAARA, M. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. **Bioresource Technology**, v. 72, p. 169-183, 2000.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JÚNIOR, B. S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v. 58, p. 59-85, 2009.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. D. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 4, n. 4, p. 47-63, Dez./Out. 2004. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3575/1979>>. Acesso em: 11 out. 2016.

VIMIEIRO, G. V.; PEREIRA, L. Z.; LANGE, L. C. Trabalho e qualidade de vida em usinas de triagem e compostagem de resíduos urbanos. **Revista de Administração FACES Journal**, Belo Horizonte, MG, v. 8, n. 2, p. 94-105, Abr./Jun. 2009. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/facesp/article/view/149/146>>. Acesso em: 15 out. 2015.

VINNERAS, B.; BJÖRKLUND, A.; JONSSON, H. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method — laboratory-scale and pilot-scale studies. **Bioresour Technol**, v. 88, p. 47-54, May. 2003.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.

ZUCCONI, F.; BERTOLDI, M. Organic waste stabilization throughout composting and its compatibility with agricultural uses. In: WISE, D. L. (Ed.). **Global Bioconversions**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1986, p. 109-37.