

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

HELENTON CARLOS DA SILVA

TRATAMENTO DE EFLUENTE PROVENIENTE DA LAVAGEM DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

PONTA GROSSA

2016

HELENTON CARLOS DA SILVA

TRATAMENTO DE EFLUENTE PROVENIENTE DA LAVAGEM DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa como requisito para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Associação ampla entre UEPG/Unicentro.

Orientador: Profa. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll

Área: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos

Linha de Pesquisa: Tratamento de Águas de Abastecimento e Águas Residuárias

PONTA GROSSA

2016

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

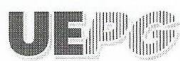
S586 Silva, Helenton Carlos da
Tratamento de efluente proveniente da lavagem de resíduos de construção e demolição/ Helenton Carlos da Silva. Ponta Grossa, 2016.
73f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profª Drª Maria Magdalena Ribas Döll.

1. Resíduo de construção e demolição. 2. Material pulverulento. 3. Caracterização. 4. Argamassa. I. Döll, Maria Magdalena Ribas. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. T.

CDD: 628.35



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: "TRATAMENTO DE EFLUENTE PROVENIENTE DA
LAVAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO"

Nome: **Helenton Carlos da Silva**

Orientador: **Profa. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll**

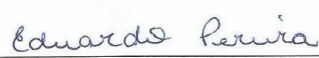
Aprovado pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG



Prof. Dr. Sandro Xavier de Campos
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG



Prof. Dr. Eduardo Pereira
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Ponta Grossa, 31 de março de 2016.

Dedico a minha esposa Aryane, meus pais Luiz e Iloilde e meu irmão Ederson.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre presente em minha vida.

À minha esposa Aryane de Fátima Wosniak Ribeiro de Mello da Silva, que com seu amor, apoio e companheirismo que vibra comigo cada momento do meu crescimento. A quem amo muito e dedico este trabalho.

Aos meus pais Luiz Antônio Batista da Silva e Iloilde de Jesus da Silva por tudo o que me ensinaram e proporcionaram em minha vida. Muito obrigado! Amo vocês!

Ao meu irmão Ederson Luiz da Silva pelo exemplo e amizade.

À Prof^ª. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll pela contribuição de seus conhecimentos e sugestões na orientação desta dissertação, além da paciência e apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

À Prof^ª. M.Sc. Patrícia Kruger pela amizade e compartilhamento de informações que auxiliaram na concretização deste estudo.

Ao Prof. Dr. Eduardo Pereira, à Prof^ª. M.Sc. Ingrid Gomes e à Prof^ª M.Sc. Bianca Penteado de Almeida pela amizade e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UEPG.

Ao acadêmico de Iniciação Científica do curso de Engenharia Civil Henrique Leonardo Schiochet pelo apoio e auxílio no desenvolvimento deste trabalho. E ao acadêmico de mestrado Elias Pereira pelo auxílio no desenvolvimento das argamassas.

Aos laboratoristas Paulo Ubirajara dos Santos, Cícero Wislei Fernandes Guerellus e Milton Domingos Michel pela ajuda nos laboratórios de Materiais de Construção, Saneamento e Ensaio Mecânicos, respectivamente.

Ao colega de mestrado José Geraldo Machado Filho pelo auxílio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas de mestrado, pelo apoio, incentivo e dedicação na elaboração deste trabalho.

Aos professores do programa de Mestrado da UEPG e da Unicentro pelos conhecimentos divididos nas aulas e nos corredores das instituições.

À SANEPAR pelos préstimos para realização de leituras de turbidez de amostras dos efluente.

À empresa Zero Resíduos pelo apoio com o fornecimento do RCD necessário para a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares, amigos e colegas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas, o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo propor um sistema de tratamento para o efluente proveniente da água de lavagem de resíduos de construção e demolição (RCD). Para tanto, foi realizada a caracterização físico-química de um lote do material, do efluente proveniente da lavagem em diferentes proporções de água. Uma massa do material foi lavada seguindo os critérios estabelecidos na Norma Brasileira Regulamentadora Norma MERCOSUL 46 de 2003, para a determinação por remoção física do material pulverulento (partículas menores que 75 μm), que prejudicam a qualidade da argamassa. O RCD foi classificado como agregado miúdo, com dimensão máxima característica de 4,8 mm e módulo de finura médio de 2,77. Para a lavagem do RCD de acordo com o especificado na norma não há quantidade específica de água para a realização do processo. Desta forma o presente estudo visou otimizar essa quantidade obtendo-se uma taxa ótima de massa de RCD para um volume de água de 1,67 : 1,00. O efluente resultante da lavagem do RCD cinza apresentou pH entre 7,54 e 8,34, acidez de 9,09 a 15,25 mg de $\text{CO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ e 10,33 a 17,33 mg de $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. A turbidez variou de 70,93 NTU a mais que 300 NTU. Na sequência foi proposto o tratamento para o efluente com três opções de tratamento: por tanque de sedimentação; por tanque de sedimentação combinado em série com filtro de areia; por processos coagulação, floculação e sedimentação. E após a análise desses três sistemas, observou-se que todos apresentaram eficiência em alguns parâmetros analisados, destacando-se que a turbidez foi removida em 99 % nos três processos. O processo menos eficiente foi à coagulação, floculação e sedimentação com a utilização do coagulante sulfato de alumínio em 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de concentração. Destaca-se ainda que a DQO foi removida mais de 90 % nos três processos propostos. Assim, concluiu-se que o melhor sistema de tratamento observado foi por remoção física e biológica por tanque de sedimentação combinada em série com filtro de areia.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição, material pulverulento, caracterização, argamassa.

ABSTRACT

This paper aims to propose a treatment system for wastewater from the construction and demolition waste washing water (RCD). Therefore, the physico-chemical characterization of a lot of stuff, from washing effluent in different proportions of water was performed. A mass of material was washed following the criteria established in the Brazilian Norm Standard MERCOSUR 46 of 2003, for determination by physical removal of the pulverulent material (particles smaller than 75 μm), which damage the quality of the mortar. The RCD has been classified as fine aggregate with a maximum size of 4,8 mm and feature average fineness modulus of 2,77. For washing RCD according to the specified in the standard no specific amount of water for performing the process. Thus, the present study aimed to optimize this amount obtaining an optimum rate of mass RCD for a water volume of 1,67 : 1,00. The resulting effluent from the washing of ash RCD presented pH between 7,54 and 8,34, acidity from 9,09 to 15,25 mg $\text{CO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ and 10,33 to 17,33 mg of $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. The turbidity of 70,93 NTU varied more than 300 NTU. Following proposed treatment for the effluent with three treatment options: a sedimentation tank; by combined sedimentation tank in series with sand filter; processes for coagulation, flocculation and sedimentation. And after the analysis of these three systems, it was observed that all showed efficiency in some parameters analyzed, highlighting that the turbidity was removed by 99 % in the three cases. The process was less efficient coagulation, flocculation and settling by the use of the coagulant of aluminum sulfate in 100 mg. L^{-1} concentration. It also emphasizes that the COD was removed more than 90 % in the three proposed processes. Thus, it was concluded that the best treatment system was observed by physical and biological combined removal by settling tank in series with a sand filter.

Keywords: Construction and demolition waste, powdery material, characterization, mortar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fluxograma de etapas experimentais deste trabalho.....	27
Quadro 1	Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	28
Quadro 2	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	29
Figura 2	Avaliação do efluente proveniente de lavagem de RCD cinza: 1) Ensaio de Decantação com utilização de uma proveta após a primeira lavagem, 2) Determinação da densidade da água de lavagem com a utilização de picnômetros.....	31
Figura 3	Esquema de tratamento utilizando tanque de sedimentação. 1) recipiente contendo o efluente bruto; 2) tanque de sedimentação; 3) recipiente contendo o efluente tratado.....	35
Figura 4	Esquema de tratamento utilizando tanque de sedimentação seguida de filtro. 1) recipiente contendo efluente bruto; 2) tanque de sedimentação; 3) bomba peristáltica; 4) filtro de areia com escoamento descendente.....	36
Figura 5	Equipamento Jar Test utilizado no tratamento.....	38
Gráfico 1	Curva Granulométrica do RCD Cinza.....	38
Figura 6	Exame de microscopia eletrônica de varredura do material fino removido dos agregados miúdos de RCD por lavagem com água: a) Aumento 30.000X, b) Aumento 12.000X, c) Aumento 5.000X, d) Aumento 1.000X, e) Aumento 240X, f) Aumento 50X.....	41
Quadro 3	Classificação granulométrica do solo.....	42
Gráfico 2	Densidade aparente do efluente obtido na lavagem do RCD.....	43
Figura 7	Demonstrativo de taxas massa : volume utilizadas na lavagem do RCD cinza: a) 0,5:1,00; b) 1,00:1,00; c) 1,67:1,00.....	44
Figura 8	Fotos da consistência das argamassas de revestimento: a) Argamassa com Areia; b) Argamassa com RCD zero; C) Argamassa com RCD seis.....	47
Figura 9	Fotos das argamassas de revestimento obtidas: a) Argamassa com Areia; b) Argamassa com RCD zero; C) Argamassa com RCD seis.....	48
Gráfico 3	Eficiência de remoção de DQO.....	58
Gráfico 4	Eficiência de remoção de condutividade e alcalinidade.....	59
Gráfico 5	Eficiência de remoção de sólidos totais, fixos e voláteis.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Taxas avaliadas de massa de RCD e volume de água adicionada para a lavagem.....	30
Tabela 2	Análises físico-químicas do efluente.....	32
Tabela 3	Análises físico-químicas do monitoramento do efluente bruto e tratado.....	34
Tabela 4	Ensaio de coagulação avaliados em pH = 7,0 em triplicata no efluente da lavagem de RCD.....	37
Tabela 5	Caracterização do RCD cinza.....	39
Tabela 6	Ensaio de determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem nas 3 amostras avaliadas do mesmo lote.....	42
Tabela 7	Resultados dos parâmetros avaliados de caracterização do efluente originado nas lavagens de RCD, média ± desvio padrão (número de amostras).....	44
Tabela 8	Consistência das argamassas de revestimento utilizadas.....	46
Tabela 9	Densidade relativa das argamassas e resistência à compressão axial (MPa).....	49
Tabela 10	Parâmetros para caracterização do efluente após lavagens do RCD comparando-as com 15 e 30 dias após a lavagem em decantação.....	50
Tabela 11	Parâmetros do efluente obtido após o processo por remoção físico químico com tanque de sedimentação (A) combinado em série com filtro de areia (B).....	52
Tabela 12	Parâmetros do efluente obtido após o processo de tratamento de coagulação – floculação – sedimentação com coagulante PAC.....	54
Tabela 13	Parâmetros do efluente obtido após o processo de tratamento de coagulação – floculação – sedimentação com coagulante Sulfato de Alumínio.....	56
Tabela 14	Resultados das amostras de efluentes tratados pelos processos avaliados e valores limites padrão pela Resolução CONAMA 430 (Valores do afluente: média ± desvio padrão).....	60

LISTA DE SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
Conama	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
DBO	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO
DMC	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA
DQO	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO
MF	MÓDULO DE FINURA
MO	MATÉRIA ORGÂNICA
NBR	NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA
NM	NORMA MERCOSUL
RCD	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
SST	SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DE DEMOLIÇÃO.....	16
2.2	RECICLAGEM DE RCD.....	17
2.3	ÁGUA DE LAVAGEM DO RCD.....	21
2.4	TRATAMENTO DA ÁGUA DE LAVAGEM.....	22
3	OBJETIVOS.....	26
3.1	OBJETIVO GERAL.....	26
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
4	METODOLOGIA.....	27
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RCD.....	27
4.2	ANÁLISES FÍSICAS DO RCD.....	28
4.3	PROCESSO DE LAVAGEM DOS AGREGADOS RCD E OTIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA USADA.....	30
4.4	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	32
4.5	EXAME MICROSCÓPICO DA FRAÇÃO FINA DO RCD.....	32
4.6	ENSAIOS DE ARGAMASSAS.....	33
4.7	TRATAMENTO DO EFLUENTE.....	34
4.7.1	TRATAMENTO DO EFLUENTE POR REMOÇÃO FÍSICA E BIOLÓGICA COM TANQUE DE SEDIMENTAÇÃO.....	34
4.7.2	TRATAMENTO DO EFLUENTE POR REMOÇÃO FÍSICA E QUÍMICA COM	

	TANQUE DE SEDIMENTAÇÃO COMBINADO EM SÉRIE COM FILTRO DE AREIA.....	35
4.7.3	TRATAMENTO DO EFLUENTE POR REMOÇÃO FÍSICO QUÍMICA COM AS ETAPAS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO RCD.....	38
5.2	EXAME MICROSCÓPICO DO MATERIAL.....	40
5.3	PROCESSO DE LAVAGEM DOS AGREGADOS RCD E OTIMIZAÇÃO DA ÁGUA NA LAVAGEM.....	42
5.4	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	44
5.5	ENSAIOS DE ARGAMASSAS.....	46
5.6	TRATAMENTO DO EFLUENTE POR REMOÇÃO FÍSICA E BIOLÓGICA COM TANQUE DE SEDIMENTAÇÃO.....	50
5.7	TRATAMENTO DO EFLUENTE POR REMOÇÃO FÍSICA E QUÍMICA COM TANQUE DE SEDIMENTAÇÃO COMBINADO EM SÉRIE COM FILTRO DE AREIA.....	52
5.8	TRATAMENTO DO EFLUENTE POR REMOÇÃO FÍSICO QUÍMICA COM AS ETAPAS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.....	54
5.9	RESUMO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO ENCONTRADAS APÓS OS TRATAMENTOS.....	57
6	CONCLUSÕES.....	61
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
8	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Não é recente a preocupação mundial com a escassez dos recursos naturais e seus impactos sobre o meio ambiente, portanto é comum encontrar diversos temas técnicos trazendo alternativas para resolver, reduzir e/ou mitigar esse problema. Soluções caracterizadas pelo crescimento sustentável são muito comuns e nesse contexto remete-se a Reduzir, Reutilizar e Reciclar, bases iniciais da Sustentabilidade.

Para Silva et al. (2004) reduzir, significa diminuir a quantidade de resíduo produzido, desperdiçando menos e consumindo só o necessário, sem exageros; reutilizar, dando nova utilidade a materiais que na maioria das vezes consideramos inúteis e jogamos no lixo, e reciclar, no sentido de dar “nova vida” a materiais a partir da reutilização de sua matéria prima para fabricar novos produtos.

De acordo com Pereira e Tocchetto (2011) é grave a situação da disposição dos resíduos sólidos no Brasil, entre os quais incluem-se os resíduos da construção civil. Para Geus e Garcias (2014, p.124) aproximadamente 75% das cidades brasileiras dispõem seus resíduos sólidos em lixões, o que compromete o meio ambiente e a saúde da população.

Para Antochaves e Pierezan (2012) o RCD é responsável por um grande impacto ambiental, além de ser disposto, com frequência, de maneira clandestina, em terrenos baldios e outras áreas públicas, ou em áreas de bota fora e aterros, tendo sua potencialidade desperdiçada.

Segundo Mattos (2013) citado por Schneider et al (2015):

“O gerenciamento dos resíduos sólidos de construção nos canteiros de obras de pequeno, médio e grande porte, é indispensável para que haja qualidade na gestão ambiental dos centros urbanos. Os resíduos, popularmente chamados de entulho requerem uma gestão adequada para que se possam reduzir custos sociais, financeiros e ambientais, pois são as sobras das construções e demolições, e devem ser gerenciados do projeto à sua destinação final, para que impactos ambientais sejam evitados ou amenizados.”

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (BRASIL, 2002) define como resíduos comumente chamados como entulhos de obras, calça ou metralha são compostos pelos:

“materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc.”

Silva et al. (2004) realizaram uma revisão de literatura em 236 publicações publicadas ao longo de um período de 38 anos, entre de 1977-2004. Na realização deste trabalho examinaram os fatores que afetam as características físicas, químicas, mecânicas, permeabilidade e propriedades de composição de agregados reciclados provenientes de construção e demolição, destinados à produção de concreto. Os dados foram coletivamente submetidos à análise estatística e de desempenho de sua classificação, principalmente para uso em concretos. Destacaram como resultado de sua pesquisa a demolição seletiva, a qual permitiu produzir um meio prático de medir a qualidade dos agregados reciclados, o que pode ser usado para produzir concreto com um desempenho previsível.

Nem todo tipo de RCD pode ser reutilizado no setor por conterem material cerâmico comumente descartado com o RCD cinza, o que gera grande quantidade de material pulverulento que são partículas finas (menores que 75 μm), indesejável no preparo de argamassas, pois estas partículas diminuem a permeabilidade e a resistência mecânica das argamassas e concretos.

Os sólidos presentes nos efluentes podem ser classificados pelas suas características físicas (sólidos em suspensão, sólidos coloidais e sólidos dissolvidos) e pelas suas características químicas (sólidos orgânicos e sólidos inorgânicos). Ainda podem ser classificados pelo tamanho das partículas. (VON SPERLING, 2005).

Executando esse procedimento, há uma opção de uso do resíduo de RCD como agregado na fabricação de argamassas e concretos. Visto pelo lado do reaproveitamento do RCD, esse processo é viável, desde que haja separação das partículas finas.

A separação pode ser feita com água, porém a água utilizada para a lavagem do mesmo também é um fator de preocupação atual. Portanto, há necessidade de reaproveitar essa água de lavagem, e assim otimizar esse processo, tornando-o ainda mais vantajoso, além de tratar este efluente, objetivo principal deste trabalho.

Neste trabalho a metodologia de separação das partículas finas por adição de água foi avaliada, caracterizada após a lavagem de RCD e a quantidade usada foi otimizada partindo da metodologia da NBR NM 46 (ABNT, 2003) que trata sobre a determinação do material fino dos agregados que passa através da peneira 75 μm , por lavagem.

A proposta se justifica em desenvolver um procedimento de remoção de partículas finas do agregado para uso em argamassas com água visando à redução do volume de água no próprio processo de lavagem do material, o tratamento do efluente proveniente da lavagem de resíduos de construção e demolição por três tipos diferentes de processos: (i) por remoção física e biológica por tanque de sedimentação e (ii) por processo físico químico com as etapas

de coagulação, floculação e sedimentação e (iii) por processo físico químico por sedimentação seguido de filtração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos da Construção Civil e de Demolição

A grande quantidade de resíduos sólidos gerados é um dos principais problemas observados em nossa sociedade o qual tende a se acentuar com o crescimento da população e com os novos padrões de consumo, principalmente pela abundância de embalagens descartáveis e do descarte imediato de muitos produtos.

No Manual para Implantação de Sistemas de Gestão de RCD em Consórcios Públicos, BRASIL (2010) considera que a taxa média de RCD encontrada em 10 cidades brasileiras é de 0,5 toneladas de RCD.habitante⁻¹.ano⁻¹.

De acordo com Pereira e Tocchetto (2011) citado por Geus e Garcias (2014, p.124), é grave a situação da disposição dos resíduos sólidos no Brasil, entre os quais se incluem os resíduos da construção civil. Aproximadamente, 75% das cidades brasileiras dispõem seus resíduos sólidos em lixões, o que compromete o meio ambiente e a saúde da população.

Segundo a resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) os resíduos da construção civil e de demolição são tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubagens, fios elétricos e outros comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

Dentre os setores industriais, o da construção civil é um dos que tem maior importância no desenvolvimento das nações, pois, além de ser um dos maiores geradores de emprego, é responsável por obras de infraestrutura, pela viabilização de outras indústrias, centros comerciais e moradias. No entanto, é altamente prejudicial ao meio ambiente, principalmente no que se refere à geração de resíduos (GEUS, 2009).

Conforme Pnuma (2011) o setor da construção civil é responsável pelo consumo de mais de um terço dos recursos do planeta e gera, aproximadamente, 40% dos resíduos sólidos mundiais.

Alguns resíduos gerados na construção civil devem ser tratados com pleno conhecimento técnico, pois são matéria prima para agregados, tendo a possibilidade de utilização em outras etapas do processo construtivo (SILVA; FERNANDES, 2012), com vistas à sustentabilidade ambiental.

De acordo com Yemal et al. (2011) a questão ambiental tem sido de grande importância e preocupação nos dias de hoje, seja em países desenvolvidos ou não, a

quantidade de resíduos gerados pela construção civil tornou-se um dos centros das discussões da sustentabilidade. A incorporação de práticas de sustentabilidade na construção é uma tendência crescente no mercado. Como se pode perceber, uma postura consciente nas mais diversas etapas da construção civil, além de financeiramente viável, demonstra a preocupação da empresa com a situação do meio ambiente junto ao público.

A sustentabilidade na construção civil é um tema de extrema importância, já que a indústria da construção causa um grande impacto ambiental ao longo de toda a sua cadeia produtiva. Esta inclui ocupação de terras, extração de matérias-primas, produção e transporte de materiais, construção de edifícios e geração e disposição de resíduos sólidos (SPOSTO, 2006).

Os resíduos sólidos têm altos índices de reaproveitamento e recuperação nos países mais desenvolvidos do continente europeu, todavia em alguns países há problemas semelhantes aos do Brasil (MÁLIA et al., 2011).

Segundo Santos et al. (2015) no Brasil os RCD denotam a maior parte dos resíduos sólidos urbanos e, em razão da falta de gestão adequada, causam graves problemas ambientais. A solução é o gerenciamento apropriado dos resíduos, conforme previsto na legislação brasileira, a qual prevê ações dos agentes envolvidos e a formação de uma rede de captação e destinação correta aos resíduos gerados.

De acordo com Geus e Garcias (2014) na cidade de Ponta Grossa-PR, em um levantamento realizado entre 01/01/2011 e 31/12/2013, com as empresas que estavam construindo edifícios comerciais e residenciais com área superior a 4.500 m², mais de quatro pavimentos e que estavam em fase de execução e com os projetos aprovados junto a Prefeitura Municipal, a maioria das empresas não faz nenhum tipo de separação, o RCD misturado é depositado diretamente em caçambas estacionárias e a destinação não é conhecida.

2.2 Classificação e reciclagem de RCD como argamassa

No Brasil a referência legal de maior magnitude relacionada à gestão dos resíduos da construção civil é a Resolução CONAMA n° 307 (BRASIL, 2002), que foi alterada pelas Resoluções CONAMA n° 348 (BRASIL, 2004), n° 431 (BRASIL, 2011) e n° 448 (BRASIL, 2012). A CONAMA 448 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (BRASIL, 2002).

A Resolução nº 307 (CONAMA, 2002) completada pelas Resoluções 348 (CONAMA, 2004) e 431 (CONAMA, 2011) estabeleceu a seguinte classificação para os RCD:

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

Para Ferreira e Thomé (2011) uma forma de diminuir os problemas causados pelo acúmulo de resíduos é a sua reciclagem, onde tem-se algumas alternativas viáveis como à produção de novos agregados reciclados para substituírem agregados naturais, a utilização de resíduos de construção em concretos, argamassas, pavimentos, contenções, aterros, solos reforçados, entre outros.

Ulsen et al. (2010), num levantamento de revisão bibliográfica de vários autores afirmam que existe um desejo crescente de aproveitar os agregados reciclados em argamassas, concretos e até como matérias-primas industriais. Neste contexto cita que os métodos tradicionais de caracterização de RCD são baseados, majoritariamente, em determinar a composição do resíduo de forma visual, na questão de proporcionalidade de concreto, argamassa e materiais cerâmicos.

Outra forma de classificação do RCD é apresentada por Vegas et al. (2015) através de um sistema com infravermelho, onde o material é colocado de forma uniforme sobre uma correia transportadora e um sensor infravermelho separa o material de fluxo por jactos de ar comprimido, em duas frações (agregados reciclados e as frações com presença de materiais poluentes); esta tecnologia mostrou que os agregados reciclados tinham alta qualidade técnica e ambiental, devido redução significativa ou até eliminação da presença de sulfatos solúveis,

presentes nas partículas de gesso, e teores de matéria orgânica presentes nas madeiras e plásticos.

Ângulo et al. (2013) utilizaram a separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição, indicando este material resultante para a confecção de concreto, através de diferentes técnicas de processamento mineral, com princípios de separação, eficiência, custos e impactos ambientais distintos. Destacaram que a principal vantagem da separação óptica é o uso reduzido de água ou energia quando comparado com outros processos industriais.

Para a destinação do RCD de forma adequada, França et al. (2013) apresentam uma das aplicações do material como agregados na confecção de blocos de concreto. Destacam as etapas da produção, desde a coleta e seleção do RCD, passando pelas fases de britagem, moagem, classificação, mistura e avaliação da matéria prima. O processo de classificação do material utilizado embasou-se na trituração e moagem, onde os agregados reciclados foram separados por peneiramento e classificados de acordo com a granulometria obtida.

Jochem et. al. (2012) apresentaram um estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD. Para eles a fração miúda dos agregados reciclados (partículas menores que 2,4 mm), oriunda do beneficiamento dos resíduos de construção e demolição, apresenta grande potencial tecnológico para uso em substituições ao agregado natural, especificamente para uso como agregado miúdo para produção de argamassas de revestimento.

Os materiais RCD apresentam composição, propriedades e características variáveis, é desta forma é necessário conhecê-las para o correto uso deste material. Figueiredo e Pimentel (2015) apresentaram uma avaliação da composição e variabilidade das características de agregados reciclados provenientes de material classe A produzidos em cinco usinas recicladoras da região de Campinas - SP, por meio de ensaios de composição granulométrica, teor de finos, capacidade de absorção de água, massa específica, massa unitária, composição do agregado graúdo.

Quando não há possibilidade de reutilização ou reciclagem de RCD, as resoluções determinam a destinação para aterros de resíduos da Classe A. De acordo com a NBR 15113 (ABNT, 2004a) e a Resolução CONAMA nº 448 (BRASIL, 2012) citam que os aterros para deposição do RCD não possuem impermeabilização de base e sistemas de drenagem de lixiviados, o que pode levar estes lixiviados para reservas de água, colocando em risco a saúde da população e do ambiente.

Segundo a NBR 10005 (ABNT, 2004c), lixiviação é o processo para a determinação da capacidade de liberação de substâncias orgânicas e inorgânicas através da dissolução em meio extrator, que pode ser a água.

Fatores físicos interferem na liberação de substâncias a partir do RCD, dentre eles: tamanho da partícula, tempo de contato, relação líquido/sólido, porosidade, sortividade, temperatura. Assim como os parâmetros biológicos pH, potencial de oxidação-redução, complexação, conteúdo de carbono orgânico, alcalinidade, entre outros (VAN DER SLOOT, 1998; TOWNSEND et al., 2003).

No setor da construção civil brasileira, ensaios de lixiviação são utilizados apenas quando se estuda a incorporação de resíduos em matrizes de materiais de construção, sendo empregado o método da NBR 10005 (ABNT, 2004c), destinado à avaliação ambiental de resíduos.

Schaefer et al. (2008) pesquisou em seu trabalho a avaliação da liberação de metais pesados dos agregados reciclados provenientes do beneficiamento de resíduos de construção e demolição. Os seus resultados demonstram que metais pesados estão presentes em pilhas de agregados reciclados dispostas nas centrais de beneficiamento de RCD. Além disso, os resultados da lixiviação e solubilização dos agregados fracionados mostraram concentrações de metais pesados superiores aos limites recomendados pela NBR 10004 (ABNT, 2004b).

As argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais. (TAVEIRA, 2010).

Para Taveira (2010) na utilização das argamassas em assentamento de alvenarias busca-se a trabalhabilidade (consistência e plasticidade adequadas ao processo de execução, além de uma elevada retenção de água), aderência, resistência mecânica, capacidade de absorver deformações. Já para a utilização em argamassa de revestimento torna-se essencial à argamassa a trabalhabilidade (especialmente a consistência, plasticidade e adesão inicial), retração, aderência, permeabilidade a água, capacidade de absorver deformações.

Diante do exposto observa-se que cada material RCD obtido apresenta características próprias, sendo necessária a sua caracterização para buscar soluções e utilizações próprias a cada tipo de material. Nesse contexto, uma opção de uso do RCD como matéria prima para confecção de argamassa é estando livre de material pulverulento, que são as suas partículas finas. Uma das formas de se remover mecanicamente essa fração do RCD pode ser por lavagem com água, assunto que será tratado a seguir.

2.3 Água de lavagem do RCD

Com a lavagem do agregado RCD resulta-se grande quantidade de efluente. De acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003) uma metodologia de lavagem do RCD para remoção e quantificação das partículas finas é: *a)* adicionar uma quantidade de água limpa que deve encobrir a massa de agregado para a remoção de partículas finas dissolvidas ou em suspensão, bem como *b)* o número de vezes que deva ser trocada a água de lavagem para que atinja a limpidez, é subjetiva. A norma recomenda que esta operação deve ser repetida diversas vezes até que água de lavagem fique clara ou límpida, o que também tem caráter subjetivo.

De acordo com Von Sperling (2005) os sólidos presentes nos efluentes podem ser classificados pelas suas características físicas em sólidos em suspensão, sólidos coloidais e sólidos dissolvidos e pelas suas características químicas em sólidos orgânicos e sólidos inorgânicos.

A filtração de suspensões é um processo físico de separação e deve ser feito com a utilização de meio filtrante poroso (em geral, areia), onde há obstrução dos poros pelo material sólido do efluente em tratamento.

Telles e Costa (2007) descrevem as características químicas como substâncias dissolvidas que podem vir a causar alterações nos valores dos parâmetros de potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, acidez, dureza, ferro e manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, matéria orgânica e inorgânica

Devido às dificuldades analíticas para determinar a composição da matéria orgânica de um efluente, tem-se como procedimento já consolidado a utilização de métodos indiretos, que indicam o “potencial poluidor” do despejo, dentre os quais se destacam o da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) (LIMA, 2005).

A matéria orgânica presente nos efluentes é uma característica de fundamental importância. Além de que os poluentes inorgânicos encontrados, geralmente, são tóxicos (VON SPERLING, 2005).

Para Botelho (2010) as características químicas dos efluentes são avaliadas pela determinação do conteúdo em sólidos, matéria orgânica, óleos e graxas, pH, alcalinidade, nutrientes (N,P) e, eventualmente, biocidas, fenóis, cianetos e metais pesados tóxicos.

Butera et al. (2014) estudaram a composição e a lixiviação de RCD na Dinamarca, onde observaram elevada lixiviação do crômio, sulfato e cloreto apresentados na alvenaria.

Concluíram ainda que, geralmente, a lixiviação estava dentro dos limites, exceto para selênio, e dentro alguns casos crômio, sulfato e antimônio.

Já Kulakowski et al. (2014) estudaram uma proposta de método para obtenção de extrato lixiviado de RCD como contribuição à avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos. Para obter o lixiviado utilizaram o método da imersão, simulando um cenário de exposição de intenso e prolongado contato com o lixiviante, como um alagamento; e a irrigação, que busca simular uma exposição à chuva ácida. Os resultados indicaram uma tendência de comportamento coerente e compatível com os resultados obtidos pelo método NBR 10005 (ABNT, 2004c), sendo o método de imersão mais agressivo do que a referida norma.

Entretanto para Jacob et al. (2009), ao analisarem a lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados, destacaram que o Cu foi o metal pesado mais lixiviado, sendo liberado em todas as etapas do ensaio, aumentando 2000 a 18000 mg/m². Também notaram maior absorção de água nos concretos com finos em relação aos sem finos, em função da porosidade dos agregados que constituem o concreto. E a qualidade ambiental dos novos agregados produzidos em centrais de beneficiamento dos RCD pode ser avaliada tomando-se como parâmetro o potencial de lixiviação dos contaminantes.

Ao realizar uma comparação de testes de lixiviação por lotes e a influência do pH na liberação de metais de construção e demolição, Galvín et al. (2012) provaram em seus resultados que o pH é o fator mais relevante na avaliação das diferenças entre os métodos de lixiviação devido à sua forte controle sobre a libertação de poluentes, os quais apresentaram valores abaixo de 7.

2.4 Tipos de Tratamento da Água de Lavagem de RCD

A escolha dos processos de tratamento de efluente é de fundamental importância para o sucesso do mesmo (SILVA FILHO, 2009). Por isso esta deve ser muito criteriosa e fundamentada na caracterização adequada do efluente a ser tratado, no conhecimento das técnicas de tratamento existentes, bem como na estimativa de custos (METCALF; EDDY, 2003).

Existem diversos tipos de tratamento de efluentes e entre os mais usuais temos: filtração, adsorção em carvão ativado, oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio, floculação, separação por membranas, troca iônica, destilação e precipitação, coagulação-floculação e sedimentação (METCALF; EDDY, 2003).

O processo de filtração é composto da passagem de efluentes por leito de material granular para remoção de sólidos, o que exige eventuais lavagens com água em contracorrente para remoção do material retido (MANCUSO; DOS SANTOS, 2003).

O processo de separação por membranas utiliza uma combinação de propriedades seletivas das membranas poliméricas, onde estas são capazes de promover a separação em sistemas onde os filtros comuns não são eficientes (DIAS, 2006).

Nunes (2008) afirma que o processo de sedimentação depende, em especial, da concentração das partículas em suspensão, sendo um fator limitante no dimensionamento de sedimentadores, o qual quanto mais concentrado é o meio, maior é a resistência à sedimentação.

Segundo Fagundes (2006) a coagulação-floculação são processos utilizados para agregar colóides e partículas dissolvidas em flocos maiores, que podem ser removidos por processos de sedimentação ou flotação, dependendo das características dos flocos, sejam coesos ou grumosos, respectivamente.

Ao estudar a eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada, Pavanelli (2001) propôs utilizar quatro diferentes coagulantes: sulfato de alumínio, cloreto férrico, hidroxícloreto de alumínio e sulfato férrico, variando suas concentrações entre 10 e 80 mg.L⁻¹ e pH entre 6,50 e 8,50 visando atender os padrões de potabilidade. Concluíram que o coagulante cloreto férrico apresentou desempenho para intervalos de valores próximos à neutralidade, pH próximo a 6,50.

Varela (2010) ao estudar o desenvolvimento de um novo conceito de plantas de lavagem e a classificação para reciclagem de material RCD contaminado, baseado em um processo composto de 3 etapas: alimentação, lavagem e classificação; recuperação de areia; e tratamento de água. Para tanto implantou um sistema de tratamento da água do processo composto por uma estação de floculação, um clarificador de lamelas, uma unidade de filtração e um tanque de água recuperada com capacidade para 22 m³. Ao apresentar este sistema destacou que toda a água utilizada, no processo, é recuperada e recirculada ao processo de lavagem e classificação.

Garcia e Pargament (2015) estudaram a reutilização de águas residuais com o objetivo de trabalhar com a escassez de água, visando às considerações econômicas, sociais e ambientais para a tomada de decisões. Destacaram que a adoção de princípios de Gestão Integrada de Recursos Hídricos irá assegurar que a implementação de projetos de reutilização

de águas residuais vai levar em conta todos os diversos tipos de intervenientes afetados, representando, além dos custos externos e benéficos derivados da decisão de reutilização.

O tratamento dos efluentes e sua posterior reutilização é uma parte essencial de uma racionalização eficiente da água dentro do campo de iniciativas de gestão ambiental (Ruiz-Rosa et al., 2016).

Etchepare (2012) cita que atividades industriais que envolvem operações de lavagem e geração de efluentes, consideradas potencialmente poluidoras, como, por exemplo, terminais intermodais (aquele que envolve mais de uma modalidade de transporte), possuem a exigência de licenciamento ambiental e uma fiscalização mais rígida.

Para Cavallini (2015):

“Embora os processos convencionais de tratamento de efluentes, na maioria das vezes, sejam suficientes para atender a legislação vigente quanto à qualidade do efluente lançado nos corpos hídricos, o aumento pela demanda de água incentiva a utilização de novas tecnologias que possam conduzir estes efluentes para fins mais nobres.”

Varela (2010) estudou o desenvolvimento de um novo conceito de usinas de lavagem e a classificação para reciclagem de material agregado da construção civil contaminado. Em seu trabalho descreveu um conceito de uma usina compacta por três módulos base: lavagem e classificação, recuperação de areia e tratamento de água. Dependendo da quantidade de impurezas contidas no material a ser processado, a capacidade da planta pôde chegar a 100 t/h. A planta foi projetada para reciclar materiais com tamanho de partícula variando entre 0-63 mm, porém dependendo da aplicação a usina pode processar partículas até 150 mm.

O autor utilizou em seu um sistema de tratamento da água o processo composto por uma estação de floculação (com o objetivo de agregar as partículas ultrafinas, aumentando a velocidade de sedimentação das mesmas no clarificador de lamelas - onde o *overflow* do clarificador de lamelas é enviado, por gravidade, para o tanque de água tratada e o *underflow* é bombeado para a unidade de filtração), uma unidade de filtração (com filtro do tipo correia de pressão, o qual comprime a pasta gerando uma torta com, aproximadamente, 20% de umidade, com capacidade de alimentação de, aproximadamente, $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de polpa, onde são produzidas $4 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ de sólidos com tamanho de partícula menor que $63 \mu\text{m}$) e um tanque de água recuperada com capacidade para 22 m^3 .

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de remoção de partículas finas de RCD por lavagem com a menor quantidade possível de água e propor um tratamento deste efluente proveniente da lavagem dos resíduos de construção e demolição que podem ser utilizados para a confecção de argamassas.

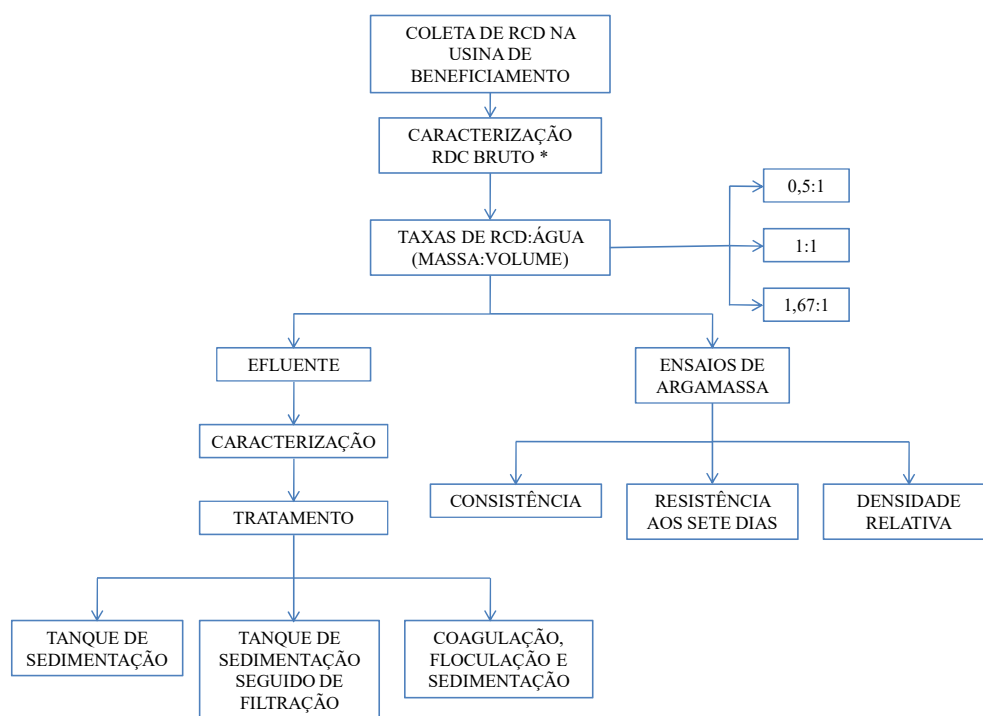
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o processo de lavagem de RCD fundamentando inicialmente a quantidade de água e RCD segundo o procedimento estabelecido pela NBR NM 46 (ABNT, 2001) com otimização do volume de água necessário;
- Caracterizar físico-quimicamente o efluente gerado nos processos de lavagem avaliados;
- Analisar a qualidade da argamassa lavada seguindo os critérios de trabalhabilidade, densidade relativa e resistência à compressão aos sete dias utilizando RCD como agregado miúdo;
- Avaliar três processos de tratamento do efluente proveniente da lavagem do RCD: (i) por remoção física e biológica por tanque de sedimentação e (ii) por processo físico químico com as etapas de coagulação, floculação e sedimentação e (iii) por processo físico químico por sedimentação seguido de filtração.

4 METODOLOGIA

A fim de ilustrar a condução experimental seqüencial deste trabalho, está apresentado na Figura 1 um fluxograma das etapas avaliadas.

Figura 1 – Fluxograma das etapas experimentais deste trabalho.



Fonte: Os autores (2015).

4.1 Caracterização do RCD

O RCD na forma de agregados miúdos utilizado nos experimentos foi fornecido por uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil da cidade de Ponta Grossa, no Paraná.

Os RCD obtidos estavam separados em RCD com cerâmica e RCD sem cerâmica, denominados vermelhos e cinzas, respectivamente (RUDNITSKI et al., 2016; ÂNGULO, 2005). O lote de RCD coletado foi submetido à secagem, no laboratório de materiais de construção, localizado no Bloco E da Universidade Estadual de Ponta Grossa, à temperatura ambiente média de 23° C por 7 dias, sendo espalhado em camadas de 5 cm aproximadamente,

revolvidos diariamente e verificando-se visualmente e tatilmente sua umidade, apresentando características de secos após serem manuseados.

Após a secagem este RCD foi submetido ao ensaio de granulometria, de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987a).

Para aplicação desta norma destaca-se:

3.1 Série normal e série intermediária

Conjunto de peneiras sucessivas que atendem à NBR 5734, com as seguintes aberturas apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1 – Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
-	12,5 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: adaptado de ABNT (1987a).

O referido ensaio foi realizado com RCD cinza e com RCD vermelho, com amostras do mesmo lote em triplicata, onde foram separados 1,0 kg de cada material bruto como proveniente da usina com granulometria mista, os quais foram peneirados e pesados suas quantidades retidas em cada peneira. Após a pesagem obteve-se as características de dimensão máxima característica (DMC), módulo de finura (MF), classificação e descrição de origem do agregado (ABNT, 2004c). O ensaio foi realizado também com pedrisco como controle e comparação com os resultados, haja vista que o pedrisco é um material comumente utilizado na argamassa como agregado miúdo.

4.2 Análises físicas do material

A obtenção das porcentagens retidas foi determinada pela relação entre a massa individual da peneira considerada e a massa retida total no ensaio, para cada granulometria, conforme norma NBR 7211 (ABNT, 2004d) (Equação 1).

$$\%M_{\#i} = \frac{M_{\#i}}{M_T} \times 100 \quad (1)$$

Onde: $\%M_{\#i}$ = porcentagem retida individual da peneira considerada
 $M_{\#i}$ = massa retida na peneira considerada
 M_T = massa retida total no ensaio

A determinação das porcentagens acumuladas nas peneiras foi obtida somando-se a porcentagem na peneira considerada mais a porcentagem da peneira anterior, resultando na última peneira 100 % da massa total pesada (Equação 2).

$$\%RA_{\#} = \%R_{\#i} + \%R_{\#i-1} \quad (2)$$

Onde: $\%RA_{\#}$ = porcentagem retida acumulada da peneira considerada
 $\%R_{\#i}$ = porcentagem retida individual da peneira considerada
 $\%R_{\#i-1}$ = porcentagem retida individual da peneira anterior a peneira considerada

A DMC é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada em massa igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O MF foi obtido através da soma da porcentagem retida acumulada das peneiras da série normal divididas por 100, excluindo-se o fundo (bandeja coletora do material que não se enquadra na última peneira de 75 μ m). O módulo de finura é uma grandeza adimensional e deve ser apresentado com aproximação de 0,01.

A classificação do material foi obtida, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2004d), analisando-se os valores de DMC e MF, observando se os grãos do agregado passaram pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficaram retidos na peneira com abertura de malha de 0,150 mm; os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo, estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
9,5 mm	0	0	0	0

6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: BRASIL (2004c).

4.3 Processo de lavagem dos agregados RCD e otimização da quantidade de água usada

Para a lavagem dos agregados RCD utilizou-se o procedimento recomendado pela NBR NM 46 (ABNT, 2003) sobre determinação do material fino que passa pela peneira 75 µm por lavagem com água, que neste trabalho foi usada água de abastecimento público.

A amostra foi coberta com água, agitada vigorosamente de forma aleatória com cuidado de não se perder amostra ou água ou desestruturar os agregados.

Primeiramente pesou-se 500 g do material RCD cinza, em seguida colocou-se este material em um frasco plástico de formato cilíndrico, com dimensões de 20 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Na sequência colocou-se um volume de água conhecido de forma a cobrir a amostra. Esse volume de água foi variado de acordo com a Tabela 1 visando sua redução, desconsiderando a densidade aparente do RCD.

De acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003) “a quantidade de água a ser utilizada para a lavagem do RCD deve cobrir a amostra”. Como essa quantidade tem caráter subjetivo, várias taxas (massa de RCD cinza:volume de água de abastecimento) foram avaliadas, conforme apresentado na Tabela 1. O volume de água de abastecimento foi gradualmente reduzido mantendo-se a massa de RCD.

Tabela 1 – Taxas avaliadas de massa de RCD e volume de água adicionada para a lavagem.

Ordem de lavagem	Volume de água adicionada (mL)	Massa de RCD (g)	Taxa* (massa:volume)	Número de lavagens do RCD	Recipientes usados para medir sólidos sedimentáveis
1	1000	500	0,50:1,00	20 x	Ensaio de decantação com utilização de proveta
2	500	500	1,00:1,00	20 x	Ensaio de decantação com utilização de cone <i>Imhoff</i>
3	300	500	1,67:1,00	20 x	Ensaio de decantação com utilização de cone <i>Imhoff</i> e ensaio de densidade com utilização de picnômetros

Fonte: os autores (2015).

Depois disso misturou-se o material utilizando uma haste metálica até a observação visual de homogeneidade da turbidez da água sobrenadante. Em seguida, após parar a agitação, considerou-se que todas as partículas menores de $75\ \mu\text{m}$ separaram-se das maiores, restando o material fino em suspensão. Posteriormente passou-se só a água sobrenadante pelas peneiras $75\ \mu\text{m}$ e $1,18\ \text{mm}$. A água passante pelas peneiras foi depositada em uma proveta para medição do seu volume e posterior determinação do material pulverulento decantado.

Na sequência o procedimento acima descrito foi repetido por várias vezes com o material anteriormente lavado até que a água se tornasse clara, comparando-a visualmente com a limpidez entre a água pura e o efluente depois da lavagem.

Após o término dos procedimentos retornou-se o material lavado em um recipiente para sua secagem ambiente e posterior utilização na confecção de argamassas. E na Figura 2 pode-se observar a água passante pelas peneiras depositada na proveta para determinação do seu volume e posterior determinação do material pulverulento decantado, após a primeira lavagem do material.

A partir da segunda repetição do ensaio, definiu-se como quantidade de água utilizada para a lavagem do agregado igual a $500\ \text{mL}$, pois esta quantidade se baseou na norma, a qual estabelece que deve ser adicionada água até cobrir a amostra. Ainda a partir desta repetição do ensaio substituiu-se a proveta por um cone *Imhoff*, para o ensaio de sedimentação.

Figura 2: Avaliação do efluente de lavagem de RCD cinza: 1) Ensaio de Decantação com utilização de uma proveta após a primeira lavagem, 2) Determinação da densidade da água de lavagem com a utilização de picnômetros.



(1)



(2)

Fonte: Os autores (2014).

A partir da segunda repetição do ensaio, definiu-se como quantidade de água utilizada para a lavagem do agregado igual a 500 mL, pois esta quantidade se baseou na norma, a qual estabelece que deve ser adicionada água até cobrir a amostra. Ainda a partir desta repetição do ensaio substituiu-se a proveta por um cone *Imhoff*, para o ensaio de sedimentação.

Para tal determinação pesaram-se os picnômetros vazios que tinham volume conhecido igual a 50 mL, e posteriormente foram pesados com água de lavagem dos RCD. Este ensaio foi realizado em triplicata para melhor análise dos resultados.

4.4 Análises físico-químicas de caracterização do efluente

O efluente resultante da lavagem do agregado foi caracterizado em tréplica de cada lote analisando-se os parâmetros apresentados na Tabela 2, sendo armazenados em frascos em geladeiras e homogeneizados a cada realização dos ensaios:

Tabela 2: Análises físico-químicas do efluente.

Método	Código	Metodologia
Acidez	n.4	MACEDO (2005)
Alcalinidade	n.5	MACEDO (2005)
Condutividade	2510 B	APHA (2012)
Demanda Química de Oxigênio - DQO	5220 B	APHA (2012)
pH	4500 B	APHA (2012)
Sólidos sedimentáveis	2540 F	APHA (2012)
Sólidos Totais Fixos e Voláteis	2540 B	APHA (2012)
Turbidez	2130 B	APHA (2012)

Fonte: Os autores (2015).

Na terceira taxa avaliada (1,67:1,00) realizou-se a medição da densidade aparente da água de lavagem do RCD, por determinação da massa de amostra de água de lavagem do RCD comparada com a massa de um líquido conhecido, no caso a água, com a utilização dos picnômetros apresentados na Figura 2.

Após as lavagens do RCD, o efluente foi armazenado em recipientes plásticos de trinta litros por sete dias em temperatura ambiente. No momento da retirada da amostra para análises (Tabela 2), o efluente armazenado no recipiente era homogeneizada com uma haste metálica cilíndrica.

4.5 Exame microscópico

Após a lavagem do RCD foi realizada exame microscópico eletrônico de varredura com o objetivo de visualizar a superfície do material e identificar o tamanho médio das partículas e suas características. Para tanto utilizou-se o microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, metalizador da marca Shimadzu, modelo IC-50 Ion Coarter. Pequenas amostras de RCD foram colocadas em um *stub* com uma fita de carbono, em seguida cobertas com uma camada fina de ouro no metalizador. Foi empregado um feixe de elétrons para promover aumento de 50X, 240X, 1.000X, 5.000X, 12.000X e 30.000X.

4.6 Ensaaios de argamassas

Para conhecer as características das argamassas confeccionadas com RCD em substituição ao agregado miúdo e verificar a influência de sua adição nas propriedades de consistência, resistência aos sete dias e densidade relativa foram realizados os ensaios de argamassas.

Foram confeccionadas três misturas de argamassas de revestimento com cimento:cal:agregado miúdo, uma utilizando areia fina do Rio Tibagi como agregado miúdo (Areia), outra mistura com RCD cinza lavado sem presença de material pulverulento (RCD zero) e outra com RCD cinza lavado com adição de 6 % de material pulverulento (RCD seis). Esta quantidade de 6 % de material pulverulento foi definida a partir da quantidade média do material passante na peneira 150 μm , obtido no Ensaio de Granulometria.

O traço adotado foi de 1:2:9 (cimento:cal:agregado miúdo), recomendado por Carasek (2007), apresentado pela NBR 7200 (ABNT, 1998) e com teor água/cimento (a/c) igual a 2,2, baseado no consumo médio para argamassa convencional do traço pré-definido em volume (1:2:9). Durante o procedimento de confecção da argamassa observou-se, visualmente, que com a relação a/c igual a 2,1 já estava em acordo com a consistência adequada ao traço utilizado.

O cimento adotado foi o CP II-32, o qual apresenta composição intermediária entre o cimento portland comum e o cimento portland com adições (alto-forno e pozolânico). Este cimento combina bons resultados de baixo calor de hidratação, com o aumento de resistência.

Moldaram-se cinco corpos-de-prova cilíndricos para cada mistura, com dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. As argamassas foram moldadas numa argamassadeira eletromecânica automática de bancada, com capacidade de 5 litros, duas velocidades e movimento planetário para misturas de cimento e argamassas, e o procedimento adotado foi de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997), realizando a mistura dos materiais secos –

cimento, cal e agregado miúdo – para depois colocá-los na argamassadeira para a mistura completa.

Para a análise das argamassas no estado fresco, utilizou-se o ensaio da mesa de consistência de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997). Já para a análise das argamassas no estado endurecido, foi realizado ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 7 dias, com os cinco exemplares de corpos-de-prova. Os corpos de prova eram moldados, curados imersos em água saturada de cal até as idades do ensaio, e capeados com mistura de enxofre a quente, com todas as etapas de acordo com a referida norma.

Durante o procedimento realizou-se ainda o ensaio de densidade relativa dos corpos de prova curados, de acordo com os procedimentos da NBR 13278 (ABNT, 1995a).

4.7 Tratamento do Efluente

Para o tratamento do efluente, resultante da lavagem de resíduos de construção e demolição, de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003), lavando-se 500 g do material RCD com a utilização da taxa de lavagem igual a 1,67:1,00 (massa:volume), estabeleceu-se alguns processos de tratamento conhecidos, comparando os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Análises físico-químicas do monitoramento do efluente bruto e tratado.

Método	Unidades de medida	Código	Método	Metodologia
Acidez total	mg de $\text{CO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ e mg de $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$	n.4	Titulométrico	MACEDO (2005)
Alcalinidade total	mg de $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$	n.5	Titulométrico	MACEDO (2005)
Condutividade elétrica	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	2510 B	Potenciométrico	APHA (2012)
DQO	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5220 B	Espectrofotométrico	APHA (2012)
pH	-	4500 B	Potenciométrico	APHA (2012)
Sólidos sedimentáveis	$\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$	2540 F	Gravimétrico	APHA (2012)
Sólidos Totais Fixos e Voláteis	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2540 B	Gravimétrico	APHA (2012)
Turbidez	NTU	2130 B	Potenciométrico	APHA (2012)

Fonte: Os autores (2015).

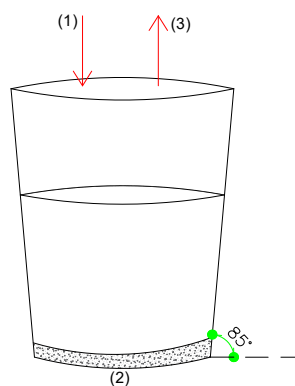
A seguir, serão descritos os três processos de tratamento do efluente em condições específicas.

4.7.1 Tratamento do efluente por remoção física e biológica com tanque de sedimentação

O tanque de sedimentação usado neste estudo em escala de bancada foi composto por um recipiente tronco cônico, de material tipo de plástico, tampado. As dimensões deste tanque

eram 30 cm de diâmetro na base e 38 cm de diâmetro superior e 50 cm de altura. O tempo de detenção hidráulica do efluente foi de 15 dias para tratamento e o regime de alimentação em batelada. O volume do tanque era de 30 L. O efluente era proveniente do tratamento de um lote de RCD que foi lavado nas seguintes proporções: 1,67:1,00 (massa:volume) de RCD cinza e água de abastecimento. Essas diferentes águas foram tratadas pelo tanque de sedimentação nas mesmas condições operacionais. A temperatura média do período experimental foi de 23° C, não havendo controle da temperatura interna no tanque. Como este ensaio era exploratório, não foram realizadas repetições do tratamento em regime batelada. A Figura 3 apresenta o esquema de tratamento utilizando o tanque de sedimentação.

Figura 3: Esquema de tratamento utilizando tanque de sedimentação. 1) efluente bruto; 2) tanque de sedimentação; 3) efluente tratado.



Fonte: Os autores (2015).

Após estes 15 dias foram realizadas as análises dos parâmetros já apresentados na Tabela 3 no efluente sobrenadante, tomando-se o cuidado para não agitar o líquido e suspender sólidos já sedimentados.

Posteriormente, a água material continuou em repouso no tanque tronco cônico, tampado, por mais 15 dias, totalizando 30 dias após a lavagem do RCD.

Novamente foram realizadas as análises dos parâmetros já apresentados na Tabela 3.

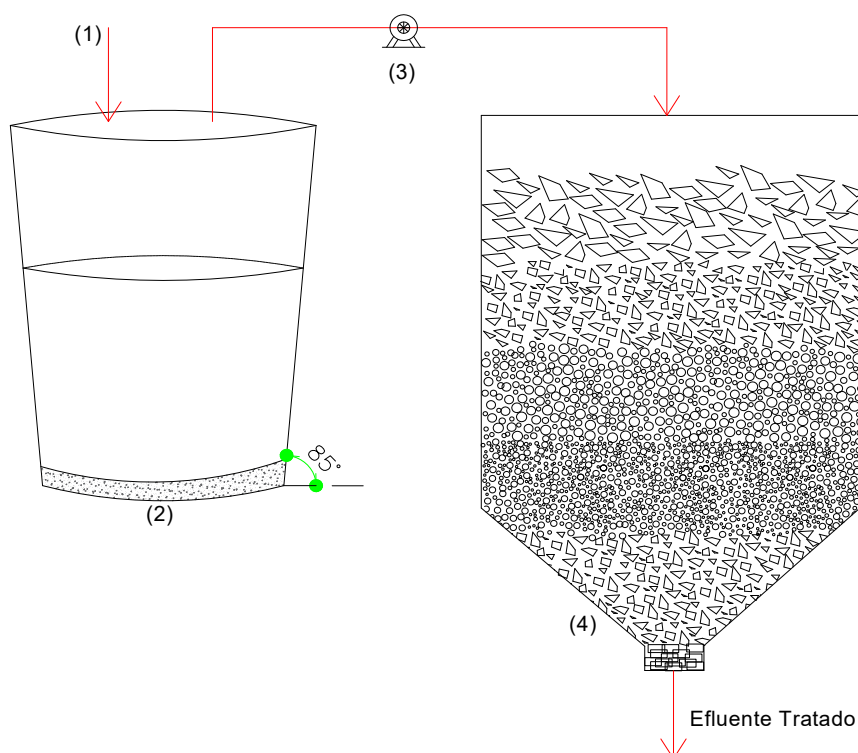
4.7.2 Tratamento do efluente por remoção física e química com tanque de sedimentação combinado em série com filtro de areia

Para a execução desse sistema, combinaram-se os dois processos, a sedimentação e o uso do filtro profundo de escoamento descendente. A Figura 4 apresenta um esquema do sistema de tratamento.

O efluente resultante desta lavagem passou pelo processo de sedimentação por 16 horas de retenção hidráulica no mesmo protótipo de bancada descrito anteriormente.

Após este processo com a utilização de uma bomba peristáltica, o efluente passou para o segundo sistema de tratamento, um filtro composto por uma camada inferior de espuma (cubos) com arestas de 5,0 x 5,0 x 1,0 cm, uma camada de pedrisco (de 7,0 cm de espessura) de granulometria entre 12,5 e 6 mm, uma camada de areia fina (de 3,5 cm de espessura) de 0,2 à 0,05 mm de diâmetro, uma camada de areia grossa (de 3,5 cm de espessura) de 2,0 à 0,5 mm de diâmetro, uma camada de pedrisco (de 3,5 cm de espessura) de 12,5 a 6,0 mm de diâmetro, uma camada de brita média (de 3,0 cm de espessura) e uma camada livre de 4 cm na superfície do filtro, totalizando 6 camadas de recheio do filtro. O tempo de retenção hidráulica foi de 6 minutos no filtro e a vazão de alimentação foi de 1000 mL/s.

Figura 4: Esquema de tratamento utilizando tanque de sedimentação seguida de filtro. 1) efluente bruto; 2) tanque de sedimentação; 3) bomba peristáltica; 4) filtro de areia com escoamento descendente.



Fonte: Os autores (2015).

Após a aplicação deste tratamento combinado foram realizadas as análises de monitoramento Tabela 3.

4.7.3 Tratamento do efluente por remoção físico química com as etapas de coagulação, floculação e sedimentação

O terceiro processo de tratamento avaliado foi o processo de coagulação, floculação e sedimentação.

Foram usados como coagulantes o cloreto de polialumínio (PAC) e o Sulfato de Alumínio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] nas concentrações apresentadas na Tabela 4, com pH igual a 7,0, e as análises foram realizadas em triplicata.

Tabela 4: Ensaio de coagulação avaliados em pH = 7,0 em triplicata no efluente da lavagem de RCD.

Coagulante	Concentração (mg/L)	Parâmetros avaliados
Sulfato de Alumínio	50	Acidez total
	100	Alcalinidade total
	200	Condutividade elétrica
	400	Demanda química de oxigênio - DQO
	50	pH
Policloreto de Alumínio	100	Sólidos sedimentáveis
	200	Sólidos totais, fixos e voláteis
	400	Turbidez

Fonte: Os autores (2015).

As condições ótimas para a coagulação e a floculação foram realizadas em Teste de Jarros (conhecidos como *Jar Test*). Esses testes foram realizados a fim de estabelecer as melhores condições de concentrações de coagulantes, tempo de mistura e taxas de sedimentação. O *Jar Test* utilizado neste experimento era composto por seis copos tipo béquer (volume de teste de 2,0 L) e agitador com regulagem de velocidade para a mistura rápida e/ou lenta, conforme apresentado na Figura 5.

A etapa de agitação rápida (coagulação) foi realizada com agitação de 100 rpm e duração de um minuto. Na floculação, a agitação lenta foi de 20 rpm. Após a floculação, a agitação era interrompida e a mistura repousava por um tempo de decantação de 20 minutos. Após esse tempo, as amostras de efluente de cada copo foram analisadas conforme Tabela 3.

Figura 5: Equipamento *Jar Test* utilizado no tratamento do efluente.



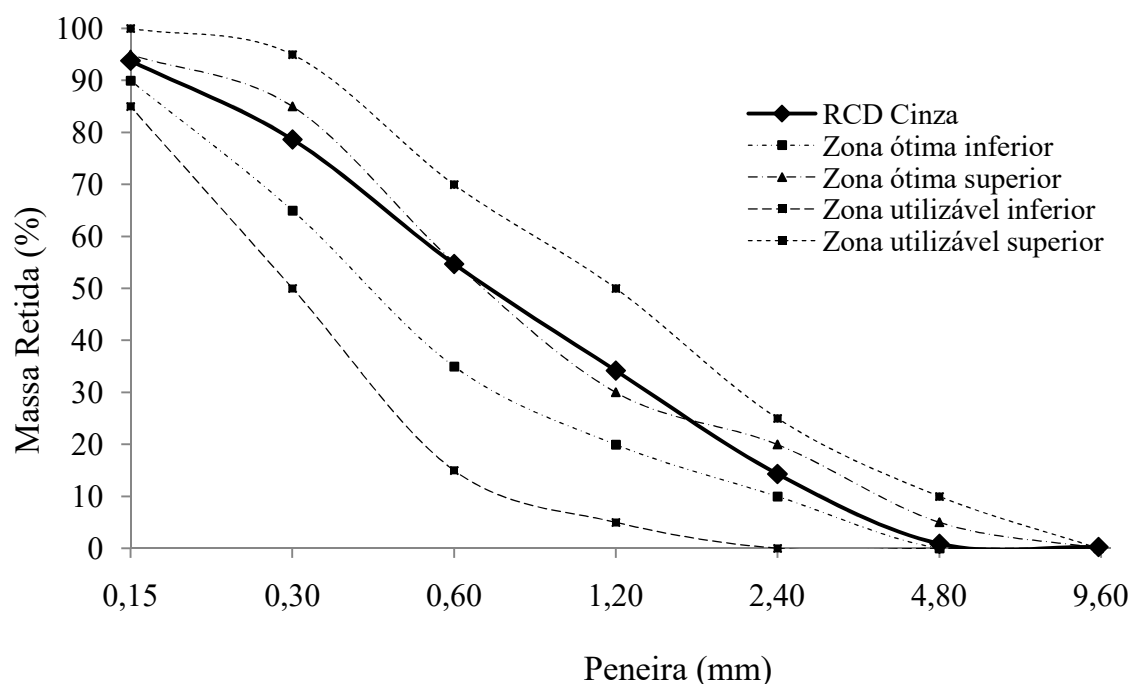
Fonte: Os autores (2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do RCD

O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica do RCD cinza médio obtido através de porcentagem retida acumulada para 3 repetições com o material oriundos do mesmo lote fornecidos pela usina de reciclagem de resíduos da construção civil.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do RCD Cinza.



Fonte: Os autores (2015).

Observa-se no Gráfico 1 que até a peneira 4,8 mm não foram observados valores consideráveis de porcentagem retida, observando-se ainda a caracterização do RCD cinza bruto em triplicata, com as 3 repetições do ensaio no Apêndice A.

A partir da peneira 2,4 mm observa-se que existe uma grande quantidade de material retido nas peneiras, sendo observado que a granulometria deste RCD cinza está, aproximadamente, 92 % entre 2,4 mm e 0,15 mm.

Destaca-se ainda que a presença de material composto de partículas finas passante pela peneira 0,15 mm e retida na peneira 0,075 mm e no fundo está na ordem de 6 % do total da massa do material.

Kruger et al. (2013) obtiveram em ensaio de granulometria o valor de 12,37 % de material pulverulento presente no RCD cinza analisado, valor acima do recomendado pela norma para argamassa. Em contraponto neste trabalho o valor de material pulverulento presente no RCD cinza em questão foi de 6 %, valor que se enquadra nos limites da norma, observados no Quadro 2.

Por serem frágeis, os materiais constituintes do RCD, ao serem submetidos ao processo de reciclagem, produzem uma quantidade considerável de material pulverulento, sendo este material medido pelo ensaio de teor de finos 0,075 mm. (OLIVEIRA e CABRAL, 2011).

Oliveira e Cabral (2011) estudaram o desempenho de argamassas de revestimento produzidas substituindo-se parcialmente o agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de RCD e obtiveram teor de finos para o agregado reciclado igual a 11,42 % e para agregado natural 5,58 %.

Na sequência, com os dados de granulometria estão apresentados os resultados de DMC, MF, classificação e origem do material na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do RCD cinza – Características.

Características	I	II	III
Dimensão Máxima Característica - DMC (mm)	4,8	4,8	4,8
Módulo de Finura – MF	2,72	2,74	2,84
Classificação - NBR 7211	Agregado Miúdo	Agregado Miúdo	Agregado Miúdo
Origem	RCD	RCD	RCD

Fonte: Os autores (2015).

Conforme observa-se na Tabela 5, o DMC dos 3 materiais é 4,8 mm, tendo em vista que é obtida pelo número da peneira cuja porcentagem acumulada é menor do que 5%, levando em consideração que a peneira seguinte tem porcentagem acumulada maior do que os mesmos 5%. Nas 3 repetições os valores obtidos foram próximos, sendo observado no Gráfico 1 os valores de 1,24%, 0,73% e 0,70%, respectivamente nas análises I, II e III, referentes a linha da peneira 4,8 mm.

Já o MF obtido nas análises foram de 2,72, 2,74 e 2,84, obtido pela soma da porcentagem acumulada das peneiras da série normal, descritas no Quadro 1 já apresentado, dividindo-se este valor por 100 e desconsiderando o valor do fundo.

Com base nos valores de DMC e MF classificou-se o material como agregado miúdo, sendo estes os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,150 mm.

No Quadro 2, já apresentado, é possível observar os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo, onde os valores encontrados para o material RCD cinza em questão enquadram-se aos limites da zona ótima.

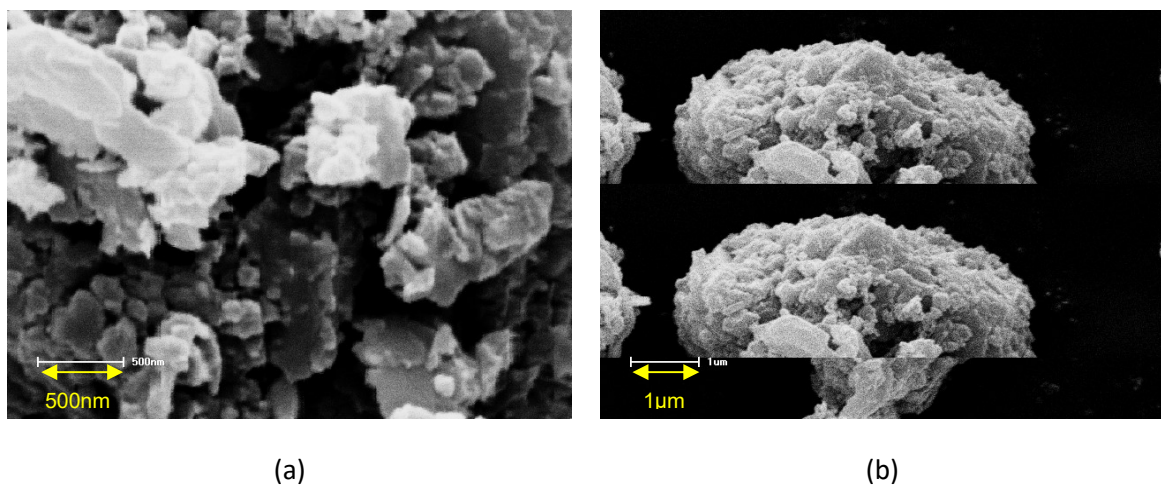
Silva e Arnosti Jr. (2005) ao estudarem a caracterização de RCD reciclado, verificaram, através dos resultados obtidos para a distribuição granulométrica do RCD, a predominância da fase arenosa (areia fina, média e grossa), com partículas de 0,06 a 4,8 mm de diâmetro e concluíram que, segundo a NBR 11804 (ABNT, 1991), o material com essa distribuição granulométrica é excelente para base e sub-base de pavimentos estabilizados.

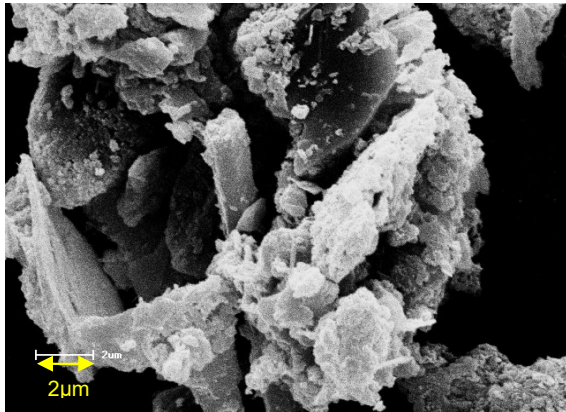
Oliveira e Cabral (2011), na realização da distribuição granulométrica dos grãos dos agregados natural e reciclado, destacaram que os agregados naturais e reciclado possuem uma distribuição granulométrica dos grãos semelhante, embora o agregado reciclado possua ligeiramente uma maior quantidade de grãos de diâmetro entre 4,8mm e 2,4mm, enquanto que o agregado natural possui uma maior quantidade de grãos mais finos, entre 1,2 e 0,15mm. O DMC encontrado para o agregado reciclado foi de 6,3 mm e para o agregado natural foi de 4,8 mm. Já o MF encontrado para o agregado natural foi de 3,07 e para o agregado reciclado foi de 2,82.

5.2 Exame microscópico do material

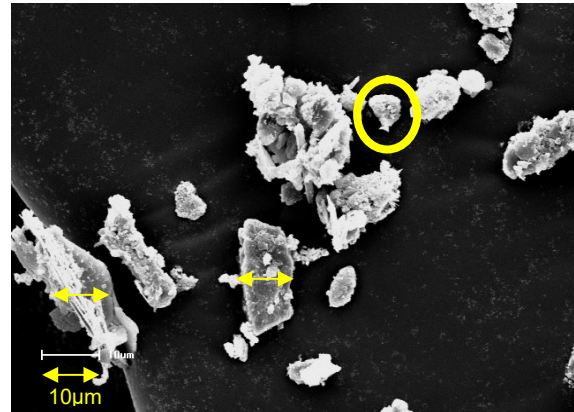
As partículas finas presentes no material RCD cinza resultantes da lavagem foram analisadas apresentando tamanhos de partículas variados, em função da origem do material ser proveniente de resíduos de construção e demolição, onde percebeu-se, visualmente, conforme Figura 6 detalhes d, e, f, dimensões variando de 10 a 200 μm , além de diversas partículas menores do que 200 μm , observadas no detalhe f da mesma figura. Observa-se ainda a evolução de uma partícula destacada na Figura 6 onde os detalhes a, b, c apresentam esta partícula com aumentos na ordem de 30.000X, 12.000X e 5.000X, respectivamente, e a mesma partícula está destacada nos detalhes d, e, f.

Figura 6: Exame de microscopia eletrônica de varredura do material fino removido dos agregados miúdos de RCD por lavagem com água: a) Aumento 30.000X, b) Aumento 12.000X, c) Aumento 5.000X, d) Aumento 1.000X, e) Aumento 240X, f) Aumento 50X.

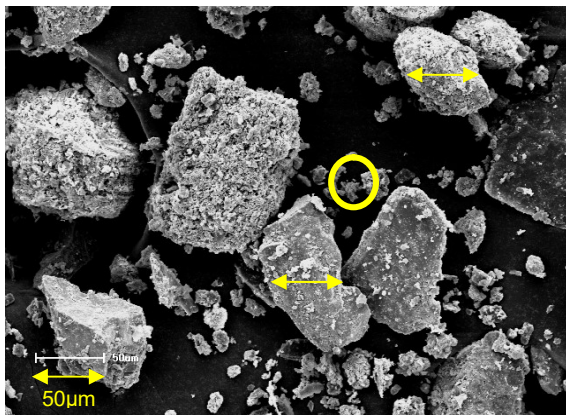




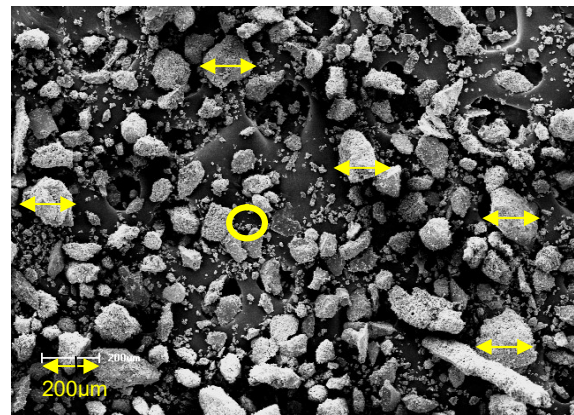
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Os autores (2015).

De acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995b) a classificação dos solos, de acordo com sua granulometria, é realizada conforme Quadro 3.

Quadro 3: Classificação granulométrica do solo.

Classificação	Diâmetro dos grãos (mm)
Argila	$\varnothing < 0,002$
Silte	$0,002 < \varnothing < 0,06$
Areia	$0,06 < \varnothing < 2,0$
Pedregulho	$2,0 < \varnothing < 60,0$

Fonte: Brasil (1995)

Observando-se o diâmetro das partículas finas encontradas no material RCD cinza resultante da lavagem e comparando-as com a classificação granulométrica do solo observa-se que o material RCD tem dimensões próximas ao silte (diâmetro de 0,002 a 0,06 mm).

5.3 Processo de lavagem dos agregados RCD e otimização da água na lavagem

Para a lavagem dos agregados, de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003), obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Ensaios de determinação do material fino que passa pela peneira 75 μm , por lavagem nas três amostras avaliadas do mesmo lote.

Medições	Volume da água de lavagem (mL)			Sólidos sedimentados (mL)		
	I	II	III	I	II	III
1 ^a	865,0	495,0	295,0	48,0	15,0	19,0
2 ^a	950,0	495,0	290,0	10,0	11,5	15,0
3 ^a	990,0	495,0	285,0	5,0	6,0	3,5
4 ^a	982,0	500,0	295,0	3,0	4,0	9,5
5 ^a	985,0	500,0	300,0	3,0	2,5	4,0
6 ^a	995,0	495,0	295,0	2,0	2,5	3,0
7 ^a	985,0	495,0	280,0	2,0	2,0	3,0
8 ^a	972,0	495,0	290,0	2,0	1,6	2,0
9 ^a	990,0	500,0	275,0	1,0	1,7	1,5
10 ^a	950,0	500,0	300,0	1,0	1,6	1,0
11 ^a	980,0	500,0	290,0	1,0	1,1	1,0
12 ^a	960,0	500,0	285,0	0,5	1,1	0,5
13 ^a	971,0	500,0	285,0	0,5	0,9	0,8
14 ^a	982,0	490,0	290,0	0,5	1,0	0,8
15 ^a	960,0	500,0	290,0	0,5	1,0	0,9
16 ^a	945,0	500,0	295,0	0,3	1,0	0,8
17 ^a	990,0	500,0	300,0	0,3	0,9	0,7
18 ^a	990,0	500,0	295,0	0,3	0,9	0,5
19 ^a	945,0	500,0	275,0	0,2	0,9	0,5
20 ^a	965,0	495,0	270,0	0,1	0,8	0,5

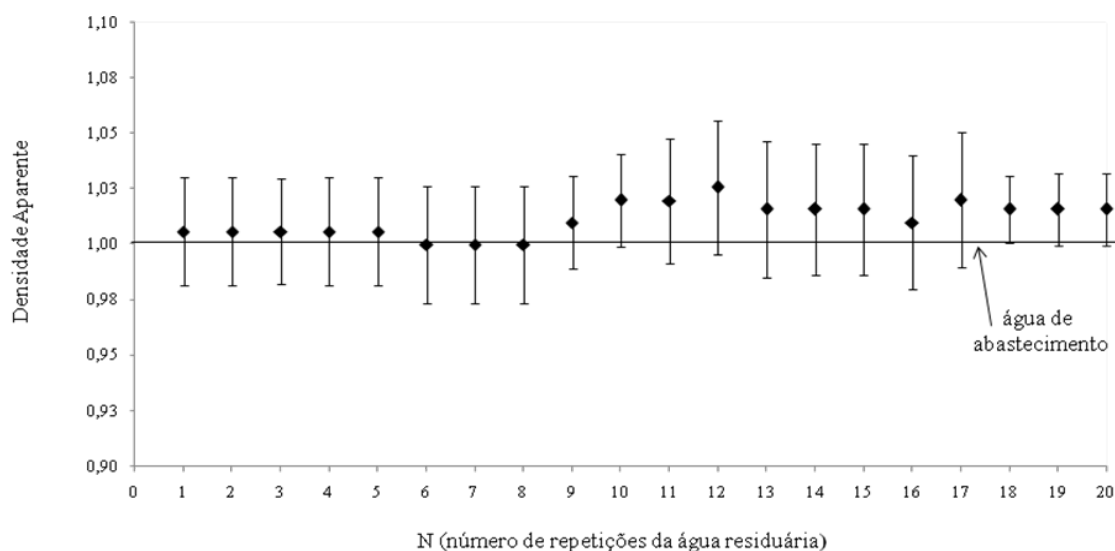
Fonte: Os autores (2015).

Na Tabela 6 pode-se observar que o volume de água de lavagem na amostra I foi sempre próximo a 1000 mL, porém não exatamente o valor de 1000 mL em virtude de que uma parte da água (3,24% em média) é absorvida pelo agregado durante sua lavagem e não passa nas peneiras 75 μm e 1,18 mm.

Na mesma Tabela 6 ainda é possível observar os valores de volume decantado em mL, obtidos durante o ensaio, no decorrer das lavagens o volume decantado diminui de 48,0 mL na primeira lavagem até 0,1 mL na vigésima lavagem. Na amostra II, o valor de volume decantado diminui de 15,0 mL na primeira lavagem até 0,8 mL na vigésima lavagem. E, na amostra III, o volume variou de 19,0 mL na primeira medição para 0,5 mL na vigésima medição. Estes valores se aproximam muito de zero a partir da décima segunda lavagem, como observado, onde os valores começaram a diminuir com menor variação das observadas nas onze primeiras lavagens do RCD.

Na a determinação da densidade relativa do efluente resultante da lavagem do RCD os resultados obtidos seguem no Gráfico 2:

Gráfico 2: Densidade relativa do efluente obtido na lavagem do RCD.

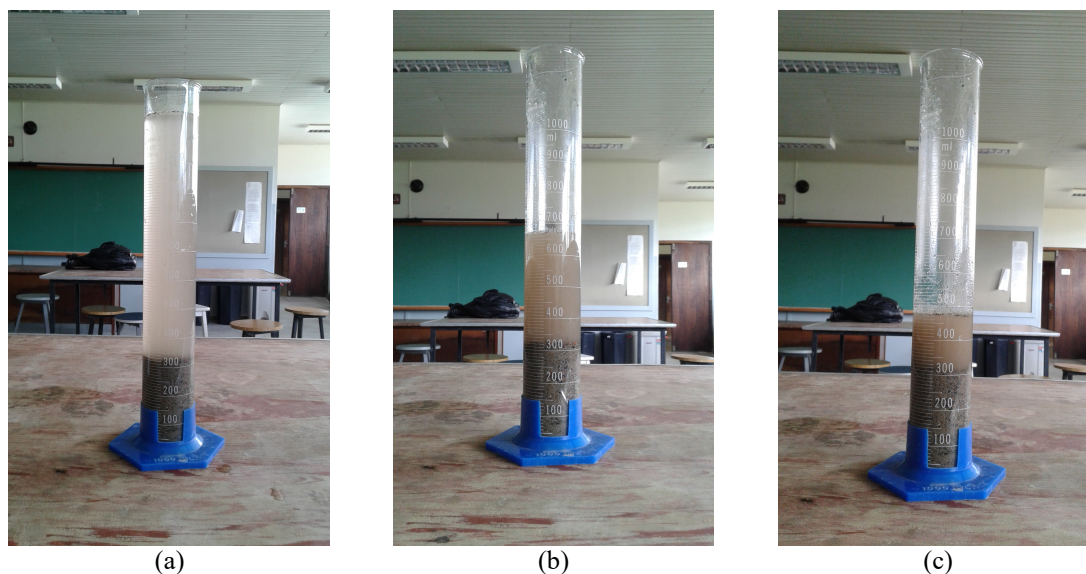


Fonte: Os autores (2015).

Com os dados obtidos no Gráfico 2 observou-se que a densidade relativa dos efluentes originados desde a primeira lavagem até a vigésima lavagem da mesma quantidade de material apresentou a média de 1,01 e desvio padrão de 0,02. Este valor é próximo ao da densidade média da água, $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$ a 4°C , de acordo com propriedades básicas dos fluídos (BRUNETTI, 2008). Desta forma observou-se que o efluente resultante da lavagem do RCD tem densidade próxima à densidade da água.

A taxa de 1,67:1,00 (massa : volume) foi considerada visualmente a taxa limite de redução de volume de água para a lavagem do RCD. Conforme pode ser observada na Figura 7, uma lâmina líquida gradualmente medida com uma proveta com os respectivos volumes de água utilizadas na lavagem do RCD e a massa de RCD cinza, logo após a homogeneização do material.

Figura 7: Demonstrativo de taxas massa : volume utilizados na lavagem do RCD cinza: a) 0,5:1,00; b) 1,00:1,00; c) 1,67:1,00.



Fonte: Os autores (2014).

5.4 Análises físico-químicas de caracterização do efluente

Os resultados dos parâmetros avaliados de caracterização do efluente originado nas lavagens do RCD são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados dos parâmetros avaliados de caracterização do efluente originado nas lavagens de RCD, média $\pm$ desvio padrão (número de amostras).

Parâmetro	Taxas aplicadas (massa do RCD : volume de água)		
	0,50:1,00	1,00:1,00	1,67:1,00
pH	8,34 $\pm$ 0,73 (3)	7,54 $\pm$ 0,39 (3)	7,88 (2)
Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	207,90 $\pm$ 87,83 (3)	272,67 $\pm$ 21,25 (3)	238,23 $\pm$ 9,89 (3)
DQO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	28,00 $\pm$ 6,70 (3)	95,00 $\pm$ 47,70 (3)	373,10 (2)
Acidez a $\text{CO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ (mg de $\text{CO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)	14,30 (2)	9,09 $\pm$ 1,11 (3)	15,25 $\pm$ 21,08 (3)
Acidez a $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (mg de $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$)	16,25 (2)	10,33 $\pm$ 1,26 (3)	17,33 $\pm$ 23,96 (3)
Alcalinidade (mg de $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$)	99,67 $\pm$ 69,87 (3)	142,33 $\pm$ 104,51 (3)	79,47 $\pm$ 7,81 (3)
Sólidos sedimentáveis ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	5,66 $\pm$ 1,38 (3)	2,97 $\pm$ 1,55 (3)	11,00 (1)
Turbidez (NTU)	153,67 $\pm$ 28,01 (3)	70,93 $\pm$ 28,90 (3)	>300 (1)
Sólidos totais ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0,29 $\pm$ 0,15 (3)	0,58 $\pm$ 0,08 (3)	5,32 $\pm$ 4,48(3)
Sólidos fixos ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0,16 $\pm$ 0,04 (3)	0,48 $\pm$ 0,12 (3)	4,62 $\pm$ 3,96 (3)
Sólidos voláteis ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0,13 $\pm$ 0,15 (3)	0,10 $\pm$ 0,05 (3)	0,70 $\pm$ 0,52 (3)

Fonte: Os autores (2015).

Com os ensaios dos parâmetros citados observa-se que o efluente, proveniente da lavagem do RCD apresenta pH variando entre 7,54 e 8,34.

Galvin et al. (2014) trabalharam com o líquido lixiviado de agregados reciclados de construção e demolição e obtiveram pH variando entre 7,26 e 12,10.

Butera et al. (2014) também avaliaram amostras de lixiviados de resíduos de construção e demolição obtendo um valor médio de 11,92.

Jacob et al. (2009) trabalharam com RCD objetivando analisar a lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados deste RCD, e obtiveram pH variando de 11,03 a 12,08, valores menores do que o esperavam, pois para eles os com agregados reciclados consumiriam mais Ca(OH)_2 reduzindo a quantidade de íons hidroxila e indicando valores menores de pH, no entanto, este fato não foi observado nas amostras analisadas, os valores de pH dos concretos com agregados reciclados e agregados naturais foram muito parecidos.

A acidez do efluente expressado como CO_2/L variou de 9,09 a 15,25 mg de CO_2/L e a acidez a CaCO_3/L variou de 10,33 a 17,33 mg de CaCO_3/L . A acidez total representa o teor de dióxido carbono livre, de ácidos minerais, de ácidos orgânicos e sais fortes, os quais na hidrólise produzem íons de hidrogênio para a solução (MACEDO, 2005).

A alcalinidade do efluente obtido foi de 79,47 a 142,33 (mg de CaCO_3/L).

A alcalinidade da água é representada pela presença de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato. A importância do conhecimento das concentrações destes íons permite a definição de dosagens de agentes floclantes, fornece informações sobre as características corrosivas ou incrustantes da água analisada (MACEDO, 2005).

Este fator sugere que seja aplicado um sistema de coagulação, floculação e sedimentação, pois a condutância de uma solução eletrolítica, em qualquer temperatura depende somente dos íons presentes e das respectivas concentrações (MACEDO, 2005). Quanto maior a condutividade elétrica mais íons presentes na água. O valor da condutividade elétrica encontrado nos efluentes variou de 207,9 a 272,67 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, o que indica a presença de íons na água.

Butera et al. (2014), trabalhando com caracterização e verificação da lixiviação do RCD na Dinamarca obtiveram condutividade elétrica média de 4680 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor muito superior ao encontrado no material RCD deste trabalho.

Jacob et al. (2009) trabalhando com a análise da lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados de RCD obtiveram condutividade elétrica variando de 508 a 2390 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, e segundo os mesmos a condutividade dos extratos lixiviados dos concretos com RCD e suas referências foram muito semelhantes entre si.

Sani et al. (2005) avaliaram a possibilidade de reutilizar agregado reciclado de construção ou demolição como um substituto para o agregado natural na produção de concreto e encontraram condutividade elétrica dos lixiviados variando de 4000 a 8000 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$.

¹, onde os valores mais elevados foram obtidos na presença de agregados reciclados, enquanto o inferior com agregados naturais.

Desta forma observa-se que para o efluente originado nas lavagens do RCD em estudo, utilizando a taxa 1,00:1,00 (massa : volume) enquadrar-se-ia na disposição para classe II e III, e para as taxas 0,5:1,00 e 1,67:1,00 não se enquadra em nenhuma das 3 classes especificadas na resolução federal.

O valor da DQO variou entre 28 e 373,08 mg/L, sendo que estes resultados referem-se à quantidade necessária de oxigênio para oxidação da matéria orgânica por meio de um agente químico (MACEDO, 2005). O valor dos sólidos totais variou de 0,287 a 5,317 mg/L, dos fixos variou de 0,157 a 4,617 mg/L e dos voláteis variou de 0,1 a 0,7 mg/L.

5.5 Ensaio de argamassas

Para o traço utilizado (1:2:9) e a relação água/cimento (2,1) para as argamassas com agregado miúdo areia, RCD zero (sem a presença de material pulverulento) e RCD seis (com a presença de 6 % de material pulverulento) obtiveram-se os seguintes índices de consistência apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Consistência das argamassas de revestimento utilizadas.

Traço	Relação água/cimento	Tipo de agregado Miúdo	Índice de consistência da Argamassa (cm)
1:2:9	2,1	Areia	26,5 ± 1,0 (5)
1:2:9	2,1	RCD zero	20,0 ± 1,2 (5)
1:2:9	2,1	RCD seis	18,2 ± 1,1 (5)

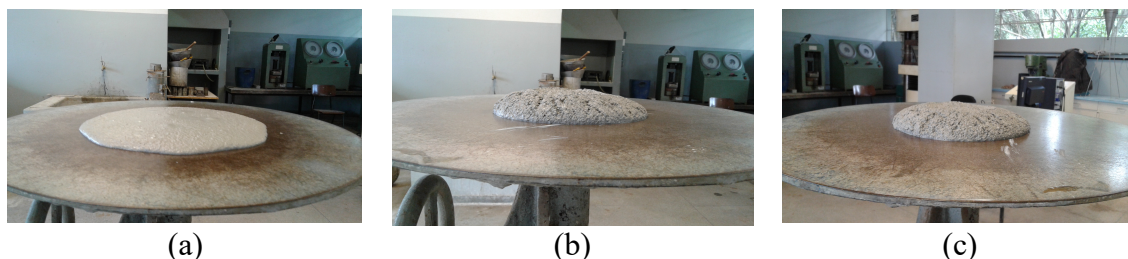
Fonte: Os autores (2015).

De acordo com o apresentado na Tabela 8 observa-se que com a confecção da argamassa utilizando como agregado miúdo a areia, o índice de consistência da mesma apresentou valor médio igual a 26,5 cm, cerca de 25 % maior que a argamassa com utilização de RCD zero, sem a presença de materiais pulverulentos, o qual foi igual a 20,0 cm; e cerca de 30 % maior que a argamassa com utilização de RCD seis, com a presença de 6 % em massa de material pulverulento.

De acordo com Carasek (2007) o índice de consistência padrão para a argamassa no estado fresco é de 26,0 ± 1,0 cm, desta forma a argamassa confeccionada com areia está em acordo, pois apresentou valor de 26,5 cm. Com a utilização dos RCD como agregado miúdo

as duas análises (sem e com a presença de material pulverulento) não estão em acordo com este padrão. A Figura 8 ilustra a consistência das respectivas argamassas.

Figura 8: Fotos da consistência obtida nas argamassas de revestimento: a) Argamassa com Areia; b) Argamassa com RCD zero; C) Argamassa com RCD seis.



Fonte: Os autores (2015).

Rudnitski et al. (2016) ao trabalharem a avaliação de RCD cinza e vermelho em argamassa de revestimento, estabeleceram, como índice de consistência padrão da argamassa, fixado em um valor compreendido entre $25,5 \pm 1,0$ cm para as duas diferentes origens de RCD (cinza e vermelho), utilizando argamassas mistas no traço 1:2:8 (cimento, cal, agregado miúdo), em composições de 10%, 25%, 50%, 75% e 100% por RCD cinza e vermelho.

Silva et al. (2005) trabalharam com argamassas com areia britada para verificar a influência dos finos e da forma das partículas. Ao utilizarem na argamassa o teor de finos igual a 6 % obtiveram índice de consistência médio igual a 27 cm, com traço 1:1:6 e relação a/c médio de 1,9. Este valor encontrado pelos autores é superior ao valor apresentado neste trabalho em razão do tipo de material agregado miúdo utilizado. Uma vez que o RCD apresenta características de absorção de água em sua composição.

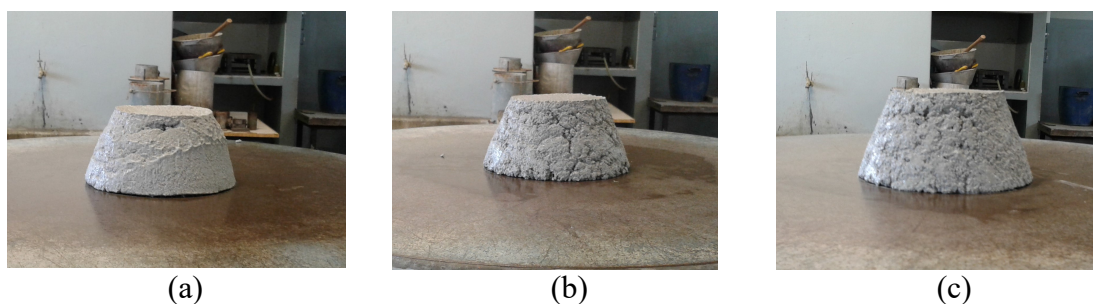
De acordo com o apresentado por Carasek (2007):

A trabalhabilidade é resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como: consistência; plasticidade; retenção de água e de consistência; coesão; exsudação; densidade de massa; adesão inicial. Ao analisar a consistência de uma argamassa verifica-se a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.

Desta forma observa-se neste trabalho que a argamassa de referência que utiliza areia como agregado miúdo está dentro dos padrões estabelecidos para a trabalhabilidade da argamassa, a qual apresentou índice de consistência em acordo com o referencial. Analisando visualmente a apresentação das argamassas na Figura 9 verifica-se que a mesma não apresentou muitos vazios em sua composição, o que não ocorreu com as argamassas

confeccionadas com RCD (zero e seis) como agregado miúdo. De acordo com Carasek (2007) a granulometria da areia determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta aglomerante e quanto mais elevado for esse volume, maior o teor de pasta necessário, elevando-se o potencial de retração da argamassa.

Figura 9: Fotos das argamassas de revestimento obtidas: a) Argamassa com Areia; b) Argamassa com RCD zero; C) Argamassa com RCD seis.



Fonte: Os autores (2015).

Silva et al. (2005) destacam que a trabalhabilidade é muito influenciada pelo teor de finos da mistura seca (cimento, cal e areia). Desta forma destaca-se que os materiais agregados de RCD cinza utilizados apresentam finos em sua composição, em razão de sua origem ser de resíduos de construção e demolição provenientes de concretos e argamassas.

Observa-se ainda que não houve muita alteração visual entre as argamassas com material RCD zero e RCD seis.

Em relação ao índice de consistência observa-se, na Tabela 7, que a diferença entre os respectivos índices médios é em torno de 9 %.

Para Rudnitski et al. (2016) o teor de finos $< 75 \mu\text{m}$ causa grande influência em diversas propriedades das argamassas, como a trabalhabilidade, desta forma justifica-se que os valores encontrados para os índices de consistência sejam mais baixos que os valores encontrados com a areia como agregado miúdo.

Para Kruger et al. (2013) é possível melhorar a trabalhabilidade de argamassas e concretos utilizando agregado miúdo de RCD, sem alterar a relação água/cimento, modificando apenas a relação água/materiais secos, uma característica também observada neste trabalho, em razão dos valores obtidos para os índices de consistência para o RCD zero e o RCD seis.

Para o ensaio de densidade relativa destes materiais obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Densidade relativa das argamassas e resistência à compressão axial (MPa).

Agregado miúdo	Densidade	Resistência à compressão axial (MPa)
Areia	1,00	$0,54 \pm 0,019$ (5)
RCD zero	1,01	$0,75 \pm 0,034$ (5)
RCD seis	1,02	$0,76 \pm 0,035$ (5)

Fonte: Os autores (2015).

De acordo com o apresentado na Tabela 9 observa-se uma possível tendência de aumento sutil da densidade das argamassas com a utilização do RCD aumentando-se a quantidade de materiais pulverulentos.

A resistência à compressão aos sete dias apresentou os resultados observados no Gráfico 3. Observa-se que com a utilização do agregado miúdo areia a resistência à compressão axial apresentou valor médio igual a 0,54 MPa, já com a utilização do RCD cinza lavado sem a presença do material pulverulento (RCD zero) o valor médio obtido foi de 0,75 MPa e para o material RCD seis o valor médio da resistência foi de 0,76 MPa. Destaca-se que houve um aumento na resistência à compressão utilizando o RCD na composição da argamassa, e o aumento também foi observado utilizando material pulverulento na composição.

Para Silva e Arnosti Jr. (2005) a resistência da argamassa diminui ao se utilizar o RCD como agregado em mistura com cimento.

Rudniski et al (2016) encontrou nos resultados do ensaio de resistência à compressão valores para as argamassas com RCD cinza e vermelho valores superiores à mistura de referência – com areia - exceto na porcentagem de 100% de RCD vermelho. Analisando o RCD cinza, o melhor resultado encontrado seguiu com a porcentagem de 75% de resíduo, atingindo 3,43 MPa de resistência. E da mesma maneira, para o RCD vermelho, o melhor resultado ficou com a porcentagem de substituição de 25%, atingindo uma resistência de 3,22 MPa.

Desta forma comparando-se os resultados encontrados com o material RCD cinza lavado sem a presença de material pulverulento (RCD zero) e com a quantidade definida de 6 % de material pulverulento (RCD seis) são valores menores que os referenciais, porém são constantes em relação à utilização de RCD em substituição à areia como agregado miúdo, além de apresentarem crescimento na resistência à compressão com a utilização de material pulverulento em sua composição.

Para Leite (2001) todos os materiais utilizados na confecção de concretos e argamassas afetam diretamente na sua resistência e no seu desempenho final. Assim, os agregados, incluídos os reciclados, são extremamente importantes para análise criteriosa de suas propriedades, qualquer variação dos materiais componentes merecem um estudo sistemático.

5.6 Tratamento do efluente por remoção física e biológica com tanque de sedimentação

A Tabela 10 apresenta os resultados do sistema de tratamento do efluente em tanque de sedimentação.

Tabela 10: Parâmetros de caracterização do efluente das lavagens do RCD com tempo de detenção hidráulica de 15 e 30 dias em tanque de sedimentação.

Parâmetro	Efluente Bruto	Tempo de sedimentação	
		15 dias	30 dias
pH	8,55 ± 0,09 (3)	7,52 ± 0,08 (3)	7,48 ± 0,07 (3)
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	164,93 ± 4,92 (3)	166,20 ± 14,70 (3)	213,97 ± 20,74 (3)
DQO ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	638,50 ± 74,00 (3)	49,70 ± 28,30 (3)	17,30 ± 3,80 (3)
Acidez a $\text{CO}_2.\text{L}^{-1}$ ($\text{mg de CO}_2.\text{L}^{-1}$)	0,00 ± 0,00 (3)	4,10 ± 0,92 (3)	5,87 ± 0,97 (3)
Acidez a $\text{CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ ($\text{mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	0,00 ± 0,00 (3)	4,67 ± 1,04 (3)	6,67 ± 0,76 (3)
Alcalinidade ($\text{mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	430,67 ± 88,12 (3)	59,00 ± 6,56 (3)	78,67 ± 5,51 (3)
Sólidos sedimentáveis ($\text{mL}.\text{L}^{-1}$)	15,00 (1)	18,50 (1)	18,50 (1)
Turbidez (NTU)	1906,00 ± 28,00 (3)	2,82 ± 0,77 (3)	1,29 ± 0,32 (3)
Sólidos totais ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	2,60 ± 2,30 (3)	0,05 ± 0,05 (3)	0,13 ± 0,19 (3)
Sólidos fixos ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	2,28 ± 1,98 (3)	0,05 ± 0,05 (3)	0,10 ± 0,13 (3)
Sólidos voláteis ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	0,32 ± 0,36 (3)	0,00 ± 0,00 (3)	0,03 ± 0,06 (3)

Fonte: Os autores (2015).

Com base nos resultados obtidos após 15 dias e após 30 dias da lavagem do RCD observa-se que o pH permaneceu próximo ao valor de pH obtido após a lavagem e na caracterização, reduzindo em torno de 12 % o seu pH.

Desta forma, de acordo com Macedo (2005) quando pH está acima de 8,3 não existe mais gás carbônico, sendo este é o responsável pela acidez das águas naturais, e a acidez apresenta como inconveniente a corrosividade.

De acordo com as resoluções CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005) e 430 (BRASIL, 2011) o pH do efluente deve estar entre 6 a 9, desta forma o pH após a aplicação do sistema está em acordo com a resolução, e verificando o pH dos rios de água doce para todas as classes de qualidade (pH de 6 a 9) o valor obtido se enquadra nas mesmas.

Os valores de acidez aumentaram durante o período que ficaram armazenados em um recipiente 15 e 30 dias após a lavagem do RCD de zero para 5,87 mg de $\text{CO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ e 6,67 mg de mg de $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. Para Macedo (2005) a acidez total representa o teor de dióxido carbono livre, de ácidos minerais, de ácidos orgânicos e sais fortes, os quais na hidrólise produzem íons de hidrogênio para a solução.

O valor da alcalinidade reduziu-se no período de 15 e 30 dias após a lavagem do RCD de 430,67 para 59,00 mg de $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ após 15 dias sedimentando, sendo reduzido 86,30 % da alcalinidade e reduzindo 81,73 % após 30 dias sedimentando. Macedo (2005) cita que a alcalinidade da água é representada pela presença de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato. Sua importância permite a definição de dosagens de agentes floculantes, fornece informações sobre as características ou incrustantes da água analisada.

O valor da condutividade elétrica para a análise após 15 dias de sedimentação manteve-se próxima ao valor de condutividade apresentado na caracterização, sendo de 166,20 e 164,93 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, respectivamente. Quanto maior a condutividade elétrica mais íons presentes na água. Este valor de condutividade indica a alta presença de íons na água. Observou-se ainda este alto valor de condutividade elétrica após 30 dias de sedimentação, encontrando-se o valor de 213,97 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, aumentando 30 % com relação à condutividade obtida na caracterização do efluente da lavagem do RCD cinza.

E, os valores de sólidos sedimentáveis aumentaram durante o período de sedimentação, em torno de 23 %. Já os sólidos totais, fixos e voláteis reduziram-se durante a sedimentação, aproximando-se de zero.

As resoluções CONAMA nº 357 (2005) e 430 (2011) estabelecem que os materiais sedimentáveis devem apresentar valor máximo de 1,0 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ em teste de 1 hora em cone Imhoff, desta forma os sólidos sedimentáveis obtidos não se enquadram na resolução, e verificando ainda que para os rios de água doce para todas as classes de qualidade os materiais sedimentáveis devem estar visualmente ausentes.

Para Macedo (2005) a determinação da turbidez é característica para o controle de poluição da água, onde se compara a intensidade de luz espalhada pela amostra analisada. O valor da turbidez encontrado neste trabalho reduziu 99 % a turbidez do efluente.

A Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) complementada pela CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011) apresenta como padrões para a água doce com classe de qualidade I, II e III, iguais a $< 40 \text{ NTU}$, $< 100 \text{ NTU}$ e $< 100 \text{ NTU}$, respectivamente, e apresenta como aspecto relevante que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançadas, direta ou indiretamente, nos corpos de água desde que obedeçam as condições e padrões previstos.

Desta forma observa-se que para água tratada por sedimentação enquadrar-se na disposição de todas as classes de qualidade para água doce especificadas na resolução federal.

O valor da DQO reduziu de 638,5 para 49,7 e 17,3 mg.L⁻¹ que correspondeu a uma eficiência deste processo de tratamento de DQO em 92 % e 97 % com tempo de sedimentação iguais a 15 e 30 dias, respectivamente.

5.7 Tratamento do efluente por remoção física e química com tanque de sedimentação combinado em série com filtro descendente de areia

Com a aplicação do sistema de tratamento do efluente por remoção física e química com tanque de sedimentação combinado em série com filtro de areia apresentaram os resultados da Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros do efluente obtido após o processo por remoção físico químico com tanque de sedimentação combinado em série com filtro de areia.

Parâmetro	Efluente Bruto	Processo de tratamento	
		Sedimentação por 15 dias	Filtração
pH	8,55 ± 0,09 (3)	9,01 (3)	7,63 (3)
Condutividade elétrica (μS.cm ⁻¹)	164,93 ± 4,92 (3)	192,90 (3)	197,90 (3)
DQO (mg.L ⁻¹)	638,50 ± 74,00 (3)	423,80 (3)	12,80 (3)
Acidez a CO ₂ .L ⁻¹ (mg de CO ₂ .L ⁻¹)	0,00 ± 0,00 (3)	0,00 (3)	6,00 (3)
Acidez a CaCO ₃ .L ⁻¹ (mg de CaCO ₃ .L ⁻¹)	0,00 ± 0,00 (3)	0,00 (3)	7,00 (3)
Alcalinidade (mg de CaCO ₃ .L ⁻¹)	430,67 ± 88,12 (3)	125,00 (3)	41,00 (3)
Sólidos sedimentáveis (mL.L ⁻¹)	15,00	5,00	0,00
Turbidez (NTU)	1906,00 ± 28,00 (3)	2285,00 (3)	1,10 (3)
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	2,60 ± 2,23 (3)	3,70 (3)	0,50 (3)
Sólidos fixos (mg.L ⁻¹)	2,28 ± 1,98 (3)	2,95 (3)	0,35 (3)
Sólidos voláteis (mg.L ⁻¹)	0,32 ± 0,36 (3)	0,75 (3)	0,15 (3)

Fonte: Os autores (2015).

Observando-se os resultados obtidos após o tratamento, analisando-se após a fase de sedimentação e após a fase de filtração destaca-se que o pH aumentou após a sedimentação e reduziu após a filtração, em torno de 10 %. Este valor de pH obtido após o tratamento combinado, 7,63, valor abaixo de 8,3, o que Macedo (2005) relata que indica que não existe mais gás carbônico, reduzindo sua agressividade, sendo que o gás carbônico é o responsável pela acidez das águas naturais, e a acidez apresenta como inconveniente a corrosividade. Desta forma este sistema é eficiente para a análise do parâmetro pH.

Conforme as resoluções CONAMA n° 357 (2005) e 430 (2011) o pH do efluente deve estar entre 6 a 9, desta forma o pH após a aplicação do sistema está em acordo com a

resolução, e verificando o pH dos rios de água doce para todas as classes de qualidade (pH de 6 a 9) o valor obtido se enquadra nas mesmas.

Os valores de acidez mantiveram-se nulos após a fase de sedimentação, porém aumentaram após a fase de filtração, apresentando valores iguais a 6,0 mg de $\text{CO}_2\text{.L}^{-1}$ e 7,0 mg de $\text{CaCO}_3\text{.L}^{-1}$. Para Macedo (2005) a acidez total representa o teor de dióxido carbono livre, de ácidos minerais, de ácidos orgânicos e sais fortes, os quais na hidrólise produzem íons de hidrogênio para a solução.

O valor da alcalinidade reduziu-se no de 430,67 para 125 mg de $\text{CaCO}_3\text{.L}^{-1}$ após a fase de sedimentação, sendo reduzido 70,98 % da alcalinidade e reduzindo 90,48 % após a fase de filtração. Para Macedo (2005) a alcalinidade da água é representada pela presença de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato. Sua importância permite a definição de dosagens de agentes flocculantes, fornece informações sobre as características ou incrustantes da água analisada.

Observando-se os valores de condutividade elétrica após a fase de sedimentação e após a fase de filtração observa-se que os valores mantiveram-se próximos, 192,9 e 197,9 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, porém aumentaram 20 % em relação ao efluente proveniente da lavagem do RCD cinza (164,93 $\mu\text{S.cm}^{-1}$). Este valor de condutividade indica a presença de íons na água, pois quanto maior a condutividade elétrica mais íons presentes na água.

Após a aplicação do tratamento combinado houve redução dos sólidos sedimentáveis, chegando a zero. Porém os sólidos totais, fixos e voláteis aumentaram cerca de 40 %. Possivelmente sólidos dissolvidos no meio líquido que corroboram com o aumento de íons e conseqüentemente de condutividade elétrica.

Os valores de sólidos sedimentáveis encontrados após a aplicação do tratamento enquadram-se nos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005) e 430 (BRASIL, 2011), sendo menores que 1 mL.L^{-1} em teste de 1 hora em cone Imhoff.

As resoluções CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005) e 430 (BRASIL, 2011) apresentam como padrões de turbidez para a água doce com classe de qualidade I, II e III, iguais a < 40 NTU, < 100 NTU e < 100 NTU, respectivamente, e deste forma a turbidez obtida após a aplicação deste tratamento se enquadra nestas resoluções, conforme observa-se na Tabela 11 já apresentada, com redução de turbidez em 99,9 %.

O valor da DQO reduziu de 638, 5 para 423,8 (após a fase de sedimentação) e 12,8 mg.L^{-1} (após a fase de filtração), observando-se eficiência deste processo de tratamento para remoção da DQO em 98 %.

5.8 Tratamento do efluente por remoção físico química com as etapas de coagulação, floculação e sedimentação

O terceiro processo de tratamento proposto foi o processo de coagulação, floculação e sedimentação. Os resultados obtidos no tratamento do efluente com diferentes dosagens do coagulante PAC estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados do tratamento de coagulação – floculação – sedimentação com coagulante PAC do efluente proveniente da lavagem de RCD.

Parâmetro	Efluente Bruto	Efluentes tratados nas dosagens de PAC (mg/L)			
		50	100	200	400
pH	8,55 ± 0,09 (3)	8,89 ± 0,02 (3)	6,66 ± 0,01 (3)	8,30 ± 0,03 (3)	7,61 ± 0,05 (3)
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	164,93 ± 4,92 (3)	205,50 ± 5,53 (3)	528,70 ± 10,11 (3)	376,40 ± 6,67 (3)	638,30 ± 11,23 (3)
DQO (mg.L ⁻¹)	638,50 ± 74,00 (3)	32,30 ± 3,10 (3)	15,70 ± 0,70 (3)	8,90 ± 0,50 (3)	6,20 ± 0,40 (3)
Acidez (mg de CO ₂ .L ⁻¹)	0,00 ± 0,00 (3)	0,33 ± 0,01 (3)	5,57 ± 0,24 (3)	2,35 ± 0,16 (3)	10,85 ± 0,65 (3)
Acidez (mg de CaCO ₃ .L ⁻¹)	0,00 ± 0,00 (3)	0,38 ± 0,01 (3)	6,33 ± 0,27 (3)	2,67 ± 0,17 (3)	12,33 ± 0,67 (3)
Alcalinidade (mg de CaCO ₃ .L ⁻¹)	430,67 ± 88,12 (3)	37,83 ± 2,33 (3)	101,30 ± 9,87 (3)	58,67 ± 5,44 (3)	116,33 ± 9,89 (3)
Sólidos sedimentáveis (mL.L ⁻¹)	15,00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Turbidez (NTU)	1906,00 ± 28,00 (3)	2,35 ± 0,15 (3)	6,66 ± 0,87 (3)	2,03 ± 0,27 (3)	3,53 ± 0,34 (3)
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	2,60 ± 2,23 (3)	0,65 ± 0,05 (3)	0,52 ± 0,09 (3)	0,50 ± 0,02 (3)	0,47 ± 0,10 (3)
Sólidos fixos (mg.L ⁻¹)	2,28 ± 1,98 (3)	0,22 ± 0,11 (3)	0,08 ± 0,01 (3)	0,10 ± 0,09 (3)	0,14 ± 0,03 (3)
Sólidos voláteis (mg.L ⁻¹)	0,32 ± 0,36 (3)	0,43 ± 0,12 (3)	0,43 ± 0,14 (3)	0,40 ± 0,10 (3)	0,33 ± 0,05 (3)

Fonte: Os autores (2015).

Com base nos resultados obtidos observa-se que o pH aumentou com a concentração de 50 mg.L⁻¹ e reduziu com as concentrações de 100, 200 e 400 mg.L⁻¹, obtendo maior eficiência com a concentração de 100 mg.L⁻¹.

Desta forma, de acordo com Macedo (2005) quando pH está acima de 8,3 não existe mais gás carbônico, reduzindo sua agressividade, sendo que o gás carbônico é o responsável pela acidez das águas naturais, e a acidez apresenta como inconveniente a corrosividade. Com base neste contexto ressalta-se que para o parâmetro pH o sistema de tratamento apresentou resultado satisfatório.

Conforme as resoluções CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005) e 430 (BRASIL, 2011) o pH do efluente deve estar entre 6 a 9, desta forma o pH após a aplicação do sistema está em

acordo com a resolução, e verificando o pH dos rios de água doce para todas as classes de qualidade (pH de 6 a 9) o valor obtido se enquadra nas mesmas.

Os valores de acidez aumentaram de acordo com o aumento das concentrações. Para Macedo (2005) a acidez total representa o teor de dióxido carbono livre, de ácidos minerais, de ácidos orgânicos e sais fortes, os quais na hidrólise produzem íons de hidrogênio para a solução.

O valor da alcalinidade reduziu-se 90 % da alcalinidade com a concentração de 50 mg.L⁻¹. Para Macedo (2005) a alcalinidade da água é representada pela presença de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato. Sua importância permite a definição de dosagens de agentes flocculantes, fornece informações sobre as características ou incrustantes da água analisada.

O valor da condutividade elétrica aumentou com a utilização dos dois coagulantes, sendo observado este aumento em acordo com o aumento das concentrações dos coagulantes. Quanto maior a condutividade elétrica mais íons presentes na água. Este valor de condutividade indica a alta presença de íons na água.

Para os sólidos totais, fixos e voláteis observou-se redução destes valores comparando-os ao efluente bruto.

A turbidez da água após o tratamento reduziu em média 99 % com relação à turbidez do efluente bruto para todas as dosagens de PAC.

Os valores da DQO reduziram-se após a aplicação do tratamento, observando-se eficiência deste processo de tratamento para remoção da DQO em 99 % com a utilização da concentração de 400 mg.L⁻¹.

Para Guida et al. (2014) a melhor remoção de DQO obtida foi em torno de 80%, ao estudarem a otimização do processo de tratamento de coagulação/floculação para DQO e SST na remoção de cinco amostras de águas residuais municipais na Itália.

Ainda neste trabalho, foram realizados os ensaios com outro coagulante amplamente usado no Brasil, o sulfato de alumínio. Os resultados obtidos no tratamento do efluente com diferentes dosagens do coagulante sulfato de alumínio estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros do efluente obtido após o processo de tratamento de coagulação – floculação – sedimentação com coagulante sulfato de Alumínio.

Parâmetro	Efluente Bruto	Efluentes tratados nas dosagens de PAC (mg/L)			
		50	100	200	400
pH	8,55 ± 0,09 (3)	9,25 ± 0,11 (3)	7,81 ± 0,07 (3)	9,20 ± 0,10 (3)	9,22 ± 0,11 (3)

Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	$164,93 \pm 4,92$ (3)	$170,27 \pm 5,33$ (3)	$177,05 \pm 5,45$ (3)	$175,14 \pm 5,41$ (3)	$177,40 \pm 5,48$ (3)
DQO (mg.L^{-1})	$638,50 \pm 74,00$ (3)	$74,30 \pm 4,40$ (3)	$16,90 \pm 1,30$ (3)	$180,80 \pm 8,90$ (3)	$98,10 \pm 6,32$ (3)
Acidez ($\text{mg de CO}_2.\text{L}^{-1}$)	$0,00 \pm 0,00$ (3)	$0,00 \pm 0,00$ (3)	$1,76 \pm 0,06$ (3)	$0,00 \pm 0,00$ (3)	$0,00 \pm 0,00$ (3)
Acidez ($\text{mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	$0,00 \pm 0,00$ (3)	$0,00 \pm 0,00$ (3)	$2,00 \pm 0,10$ (3)	$0,00 \pm 0,00$ (3)	$0,00 \pm 0,00$ (3)
Alcalinidade ($\text{mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	$430,67 \pm 88,12$ (3)	$113,33 \pm 10,15$ (3)	$106,80 \pm 9,78$ (3)	$99,67 \pm 7,76$ (3)	$150,00 \pm 11,15$ (3)
Sólidos sedimentáveis (mL.L^{-1})	15,00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Turbidez (NTU)	$1906,00 \pm 28,00$ (3)	$684,33 \pm 13,98$ (3)	$647,67 \pm 13,05$ (3)	$939,67 \pm 17,10$ (3)	$1756,00 \pm 25,25$ (3)
Sólidos totais (mg.L^{-1})	$2,60 \pm 2,23$ (3)	$1,50 \pm 0,76$ (3)	$0,52 \pm 0,20$ (3)	$1,85 \pm 0,97$ (3)	$2,00 \pm 0,85$ (3)
Sólidos fixos (mg.L^{-1})	$2,28 \pm 1,98$ (3)	$0,95 \pm 0,46$ (3)	$0,27 \pm 0,10$ (3)	$1,10 \pm 0,76$ (3)	$1,50 \pm 0,65$ (3)
Sólidos voláteis (mg.L^{-1})	$0,32 \pm 0,36$ (3)	$0,55 \pm 0,19$ (3)	$0,25 \pm 0,12$ (3)	$0,75 \pm 0,46$ (3)	$0,50 \pm 0,15$ (3)

Fonte: Os autores (2015).

Com base no teor nulo de gás carbônico de amostras de efluentes acima de 8,3 que Macedo (2005) cita, ressalta-se que para o parâmetro pH o sistema de tratamento apresentou resultado satisfatório, exceto para a dosagem de 100 mg.L^{-1} já que o valor de pH médio era de 7,81.

Com a utilização do coagulante sulfato de alumínio o pH aumentou com a utilização de concentrações de 50, 200 e 400 mg.L^{-1} .

Conforme as resoluções CONAMA nº 357 (2005) e 430 (2011) o pH do efluente deve estar entre 6 a 9, desta forma o pH de apenas com a concentração de 100 mg.L^{-1} , está em conformidade com a legislação e enquadra-se ao pH dos rios de água doce para todas as classes de qualidade (pH de 6 a 9).

Para a utilização do coagulante sulfato de alumínio houve redução da acidez zerando-a com a utilização das concentrações 50, 200 e 400 mg.L^{-1} . Para Di Bernardo et al (2011) a acidez exerce influência considerável na eficiência da coagulação e, conseqüentemente, na floculação e sedimentação solução.

O valor da alcalinidade reduziu-se cerca de 77 % com a utilização do coagulante sulfato de alumínio na concentração de 200 mg.L^{-1} .

O valor da condutividade elétrica aumentou, sendo observado este aumento em acordo com o aumento das concentrações dos coagulantes. Este valor de condutividade indica a alta presença de íons na água.

Para os sólidos totais, fixos e voláteis observou-se redução destes valores comparando-os ao efluente bruto.

A turbidez da água após o tratamento reduziu em média 64 % para a concentração de 50 mg.L⁻¹, maior valor encontrado, porém com o aumento da concentração a turbidez também aumentou e reduziu apenas 8 % com a concentração de 400 mg.L⁻¹.

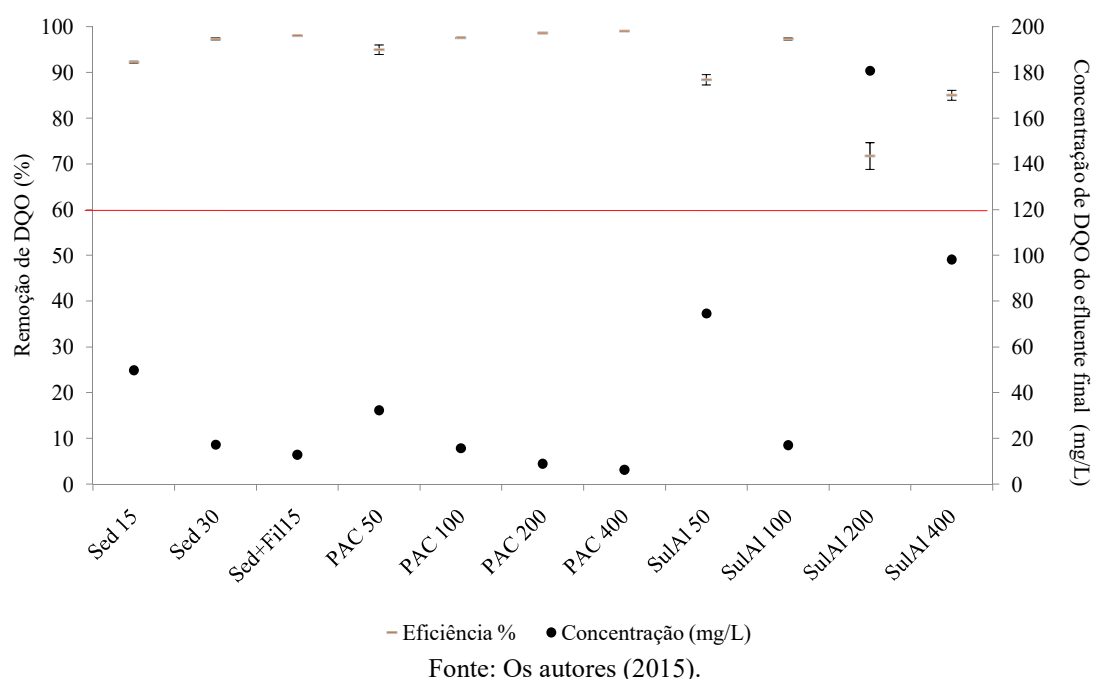
Comparando a turbidez com os padrões estabelecidos na resolução CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005) complementada pela CONAMA n° 430 (BRASIL, 2011), conclui-se que para água tratada com a utilização do coagulante sulfato de alumínio não se enquadraria na disposição de todas as classes de qualidade para água doce especificadas na resolução federal.

Os valores da DQO reduziram-se após a aplicação do tratamento, observando-se eficiência deste processo de tratamento para remoção da DQO em 97 % com a utilização do coagulante sulfato de alumínio em concentração de 100 mg.L⁻¹. Para Guida et al. (2014) a melhor remoção de DQO obtida foi em torno de 80%, ao estudarem a otimização do processo de tratamento de coagulação/floculação para DQO e SST na remoção de cinco águas residuais municipais na Itália.

5.9 Resumo das eficiências de remoção encontradas após os tratamentos

Os três sistemas apresentaram eficiência de remoção, cada um em alguns parâmetros, devendo observar-se as características do efluente e a finalidade que se busca para a água tratada. Desta forma o Gráfico 3 apresenta a eficiência de remoção encontradas após a aplicação dos tratamentos com relação ao parâmetro DQO.

Gráfico 3 – Eficiência de remoção de DQO.

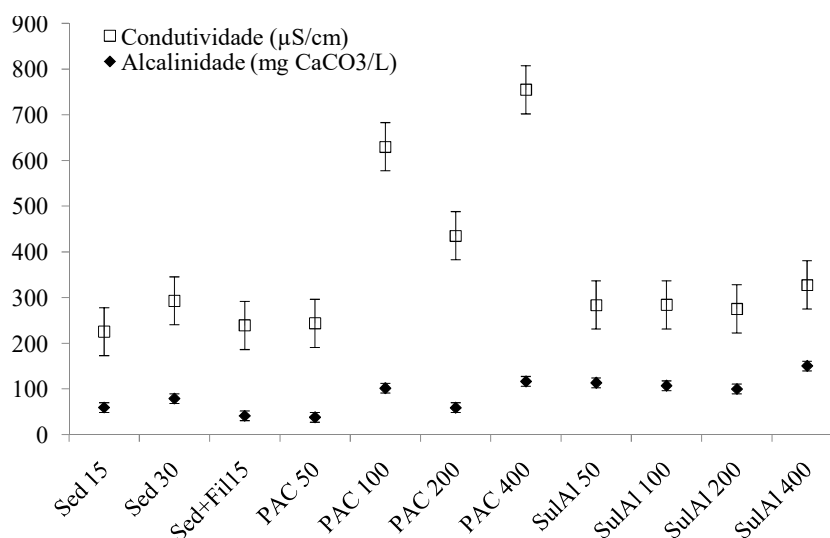


Destaca-se que os valores de eficiência de remoção de DQO após a aplicação do tratamento com tanque de sedimentação após 15 dias foi de 92 % e após 30 dias foi de 98 %. Os maiores valores de eficiência de remoção ocorreram após a aplicação do tratamento de coagulação – floculação – sedimentação com a utilização do coagulante PAC em concentração de 400 mg.L⁻¹, sendo observado o valor de 99 % e o menor valor de eficiência encontrado com no mesmo sistema de tratamento, porém com a utilização do coagulante sulfato de alumínio na concentração de 200 mg.L⁻¹ com valor de 71 %.

O Gráfico 4 apresenta a eficiência de remoção encontrada após a aplicação dos tratamentos com relação aos parâmetros condutividade e alcalinidade. Destaca grande variação de condutividade, sendo que as menores de condutividade encontram-se com a aplicação do tratamento de coagulação, floculação e sedimentação com a utilização de do coagulante sulfato de alumínio em todas as concentrações aplicadas (50, 100, 200 e 400 mg.L⁻¹) e os maiores valores com a aplicação do mesmo sistema de tratamento, porém com a utilização do coagulante PAC nas concentrações 100, 200 e 400 mg.L⁻¹, o que indica a sobra de íons, provavelmente pelos coagulantes utilizados. Para a alcalinidade observa-se que com a aplicação dos tratamentos com tanque de sedimentação, tanque de sedimentação combinado em série com filtro de areia e coagulação, floculação e sedimentação com utilização do coagulante PAC nas concentrações 50 e 100 mg.L⁻¹ os valores de alcalinidade são menores do que 100 mg CaCO₃.L⁻¹, já para as demais concentrações do com o coagulante PAC e com o

coagulante Sulfato de Alumínio os valores encontrados foram maiores do que 100 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ e correspondem aos sais remanescentes usados nos coagulantes.

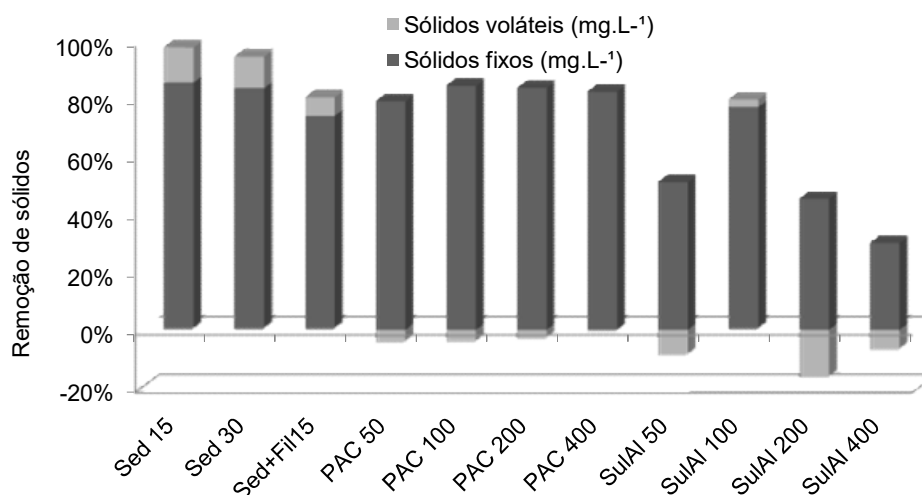
Gráfico 4 – Eficiência de remoção de condutividade e alcalinidade.



Fonte: Os autores (2015).

O Gráfico 5 apresenta a eficiência de remoção de sólidos totais, fixos e voláteis encontrada após a aplicação dos tratamentos. Destacam-se os maiores valores de eficiência de remoção ocorreram após a aplicação do tratamento de sedimentação, sendo observado o valor de 95 % de eficiência após 30 dias em sedimentação, e os menores valor de eficiência foram encontrados no sistema de tratamento de coagulação, floculação e sedimentação com a utilização do coagulante sulfato de alumínio, chegando a 23 % na concentração de 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Gráfico 5 – Eficiência de remoção de sólidos totais, fixos e voláteis



Fonte: Os autores (2015).

A Tabela 14 apresenta os resultados das amostras de efluentes tratados pelos processos avaliados e valores limites padrão pela Resolução CONAMA 430 (BRASIL, 2011). Observa-se que os valores de turbidez obtidos atendem os critérios da Resolução CONAMA com a aplicação dos tratamentos analisados, com exceção apenas na aplicação do tratamento coagulação, floculação e sedimentação com a utilização do coagulante Sulfato de Alumínio, em todas as concentrações analisadas. O mesmo ocorre para o pH, o qual atende aos padrões limites da resolução com exceção do mesmo sistema de tratamento. Já para os sólidos sedimentáveis, os mesmos foram analisados apenas na aplicação do sistema de tratamento com tanque de sedimentação e não atendem aos padrões da referida resolução.

Tabela 14 - Resultados das amostras de efluentes tratados pelos processos avaliados e valores limites padrão pela Resolução CONAMA 430, média $\pm$ desvio padrão.

Tratamento	Turbidez (NTU)	pH	Sólidos Sedimentáveis (mL.L ⁻¹)
Sed 15	2,82 $\pm$ 0,77	7,52 $\pm$ 0,08	18,5 $\pm$ 0,09
Sed 30	1,29 $\pm$ 0,32	7,48 $\pm$ 0,07	18,1 $\pm$ 0,10
Sed+Fil ₁₅	1,10 $\pm$ 0,33	7,63 $\pm$ 0,10	n.a
PAC 50	2,35 $\pm$ 0,15	8,89 $\pm$ 0,02	n.a
PAC 100	6,66 $\pm$ 0,87	6,66 $\pm$ 0,01	n.a
PAC 200	2,03 $\pm$ 0,27	8,30 $\pm$ 0,03	n.a
PAC 400	3,53 $\pm$ 0,34	7,61 $\pm$ 0,05	n.a
SulAl 50	643,33 $\pm$ 13,05	9,25 $\pm$ 0,11	n.a
SulAl 100	647,67 $\pm$ 13,05	7,81 $\pm$ 0,07	n.a
SulAl 200	939,67 $\pm$ 17,10	9,20 $\pm$ 0,10	n.a
SulAl 400	1756,00 $\pm$ 25,25	9,22 $\pm$ 0,11	n.a
CONAMA	< 100,00	6,00 - 9,00	1,00

Fonte: Os autores (2015).

6 CONCLUSÕES

O RCD foi caracterizado seguindo os procedimentos apresentados na NBR 7211 (ABNT, 2004d), através de sua análise granulométrica e comparando-se com os valores limites apresentados pela referida norma, onde o mesmo classificou-se como agregado miúdo, em virtude de seu DMC ser igual a 4,8 mm.

O teor de partículas finas observado no RCD utilizado no trabalho ficou próximo a 6,0 % da massa, comparando-o com o material pulverulento – passante nas peneiras menores que 150 μm . A norma NBR 7219 (ABNT, 1987b) estabelece para o agregado miúdo um teor máximo de 3,0% para concreto sujeito ao desgaste superficial, e 5,0% para outros concretos. Desta forma a quantidade de material pulverulento presente no agregado de RCD cinza é superior aos limites da norma.

Para a utilização deste RCD na confecção de argamassas, o mesmo precisa ser separado do material pulverulento, ficando evidenciado seu efeito ruim pelas análises da argamassa, reduzindo a consistência destas, parâmetro este que é relevante para a trabalhabilidade da argamassa, uma vez que argamassas que apresentem índices de consistência baixos não têm boa trabalhabilidade. Com relação à densidade relativa das argamassas observa-se que as mesmas tendem a aumentar e se distanciar do padrão (1,00) a medida que aumenta-se a quantidade de material pulverulento nas mesmas, e à resistência à compressão aumentou a medida que utilizou-se RCD em substituição à areia no agregado miúdo e aumentou ainda mais com a presença de materiais pulverulentos em massa nesta composição.

Neste trabalho optou-se por separar os materiais pulverulentos pela lavagem do RCD e adotou-se os procedimentos da NBR NM 46 (ABNT, 2003) usada para determinar sua quantidade no RCD. Porém como a quantidade de água a ser adicionada ao RCD é subjetiva, foi realizada a otimização desta quantidade chegando-se a uma taxa massa de RCD por volume de água de abastecimento ótima igual a 1,67:1,00.

Para as argamassas confeccionadas com agregados de RCD cinza lavados observou-se que a quantidade de material pulverulento influenciou nos resultados destas argamassas.

Após a aplicação do sistema de tratamento com tanque de sedimentação observou-se que o parâmetro pH foi reduzido. Os parâmetros que apresentaram eficiência foram a alcalinidade, a qual reduziu-se no período de 15 e 30 dias após a lavagem do RCD em torno de 86,30 % e 81,73 %, respectivamente, a turbidez reduziu em torno de 99 %, a DQO reduziu

de 638, 5 para 49,7 e 17,3 mg.L⁻¹, observando-se eficiência deste processo de tratamento para remoção da DQO em 92 % e 97 % com tempo de sedimentação iguais a 15 e 30 dias, respectivamente. Em contrapartida os valores de acidez aumentaram durante o período que ficaram armazenados em um recipiente 15 e 30 dias após a lavagem do RCD e a condutividade elétrica aumentou cerca de 30 %.

Analisando-se o sistema de tratamento com a utilização de tanque de sedimentação combinado em série com filtro de areia, observou-se o pH aumentou após a sedimentação e reduziu após a filtração, em torno de 10 %, deixando o pH final como valor de 7,63, demonstrando a eficiência do processo. A alcalinidade foi reduzida apresentando eficiência de 90,48 %, eficiência observada também para os sólidos sedimentáveis, os quais foram próximos a 100 %, além da eficiência de 99 % da remoção da turbidez e 98 % para a DQO. Porém alguns parâmetros não foram eficientes, como a condutividade elétrica que aumentou em torno de 20 %, valores estes que indicam a alta presença de íons na água, pois quanto maior a condutividade elétrica mais íons presentes na água. Os sólidos totais, fixos e voláteis também aumentaram, cerca de 40 %.

Ressalta-se que com a utilização do coagulante PAC o pH aumentou com a concentração de 50 mg.L⁻¹ e reduziu com as concentrações de 100, 200 e 400 mg.L⁻¹, obtendo maior eficiência com a concentração de 100 mg.L⁻¹, além de que com a utilização do coagulante sulfato de alumínio o pH aumentou com a utilização de concentrações de 50, 200 e 400 mg.L⁻¹, e reduziu apenas com a concentração de 100 mg.L⁻¹, sendo eficiente somente com esta concentração. Destaca-se ainda os valores de acidez aumentaram de acordo com o aumento das concentrações com a utilização do coagulante PAC e com a utilização do coagulante sulfato de alumínio houve redução da acidez. A alcalinidade reduziu-se tanto na utilização do coagulante PAC quanto na utilização do coagulante sulfato de alumínio, sendo reduzido 90 % da alcalinidade com a concentração de 50 mg.L⁻¹ com o coagulante PAC e reduzindo 77 % com a utilização do coagulante sulfato de alumínio na concentração de 200 mg.L⁻¹. A turbidez da água após o tratamento reduziu em média 99 % com relação à turbidez do efluente bruto com a utilização do coagulante PAC, porém com a utilização do coagulante sulfato de alumínio este valor de redução foi de 64 % para a concentração de 50 mg.L⁻¹, maior valor encontrado, porém com o aumento da concentração a turbidez também aumentou e reduziu apenas 8 % com a concentração de 400 mg.L⁻¹. Os valores da DQO reduziram-se após a aplicação do tratamento, observando-se eficiência deste processo de tratamento para remoção da DQO em 99 % com a utilização do coagulante PAC em concentração de 400 mg.L⁻¹ e 97 % com a utilização do coagulante sulfato de alumínio em concentração de 100

mg.L⁻¹. Já a condutividade elétrica aumentou com a utilização dos dois coagulantes, sendo observado este aumento em acordo com o aumento das concentrações dos coagulantes.

Após a análise dos três sistemas de tratamento observa-se que todos apresentaram eficiência em alguns parâmetros analisados, destacando-se que a turbidez foi removida nos três processos em 99 % em média, apenas com pouca eficiência para o processo de coagulação, floculação e sedimentação (47 % em média) com a utilização do coagulante sulfato de alumínio nas concentrações 50, 100, 200 e 400 mg.L⁻¹. Destaca-se ainda que a DQO foi removida nos três processos em média 93%.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de elucidar algumas questões que não foram possíveis de serem executadas neste trabalho, sugere-se aprofundamento de estudo e pesquisa quanto aos seguintes aspectos:

- Avaliar a água de chuva para a separação do material pulverulento dos agregados miúdos de RCD;
- Avaliar o reuso da água de lavagem gerada no processo de separação comparando-se com a qualidade da argamassa para verificar possíveis efeitos;
- Realizar ensaios mais detalhados das argamassas modificando-se a composição do agregados miúdo com diferentes porcentagens de material pulverulento, bem como outros usos para este tipo de material reciclado;
- Por fim, sugere-se outros tipos de separação de material pulverulento que não utilizem a água, tais como peneiramento, remoção por ar comprimido, etc.

8 REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987a.

_____. NBR 7219 Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro: ABNT, 1987b.

_____. NBR 11804 Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 13278 Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 1995a.

_____. NBR 6502 Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995b.

_____. NBR 7215 Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

_____. NBR 7200 Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. NBR NM 46 Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

_____. NBR 10004 Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

_____. NBR 10005 Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

_____. NBR 7211 Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.

_____. NBR 13529 Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ÂNGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos, 2005. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr; ULSEN, Carina; KAHN, Henrique; MUELLER, Anette. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 61-

73, abr./jun. 2013. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

ANTOCHEVES, Rogério; PIEREZAN, Jerônimo. **Reaproveitamento do Entulho da Construção Civil**. Disciplina de Construção Civil II. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2012.

APHA; AWWA; WEF.(2005) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th Baltimore , Maryland: United Book Press, Inc.

BOTELHO, Honório Pereira. **Tratamento de esgotos sanitários e de efluentes industriais orgânicos**. Faculdade de Engenharia de Minas Gerais. Livre Docente (Doutor) em Engenharia Sanitária e Ambiental. Minas Gerais, 2010.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Projeto internacional de cooperação técnica para a melhoria da gestão ambiental urbana no Brasil BRA/OEA/08/001. Manual para implantação de sistema de gestão de resíduos de construção civil em consórcios públicos. Novembro de 2010.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 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, nº 136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

_____. 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. Publicada no DOU nº 158, de 17 de agosto de 2004.

_____. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011, 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. Publicada no DOU nº 53, de 18 de março de 2005.

_____. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Complementa e altera a Resolução nº 357/2005, Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, Publicada no DOU nº 92, de 16 de maio de 2011.

_____. Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso. Publicada no DOU nº 99, de 25 de maio de 2011.

_____. 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. Publicada no DOU Nº 14, de 19 de janeiro de 2012.

BRUNETTI, Franco. Mecânica dos Fluidos. 2ª edição revisada. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

BUTERA, Stefania; CHRISTENSEN, Thomas H.; ASTRUP, Thomas F. **Composition**

and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds. Journal of Hazardous Materials 276 (2014) 302–311.

CARASEK, Helena. **Argamassas.** Instituto Brasileiro de Concreto. Capítulo 26, Livro Materiais de Construção Civil. 2007.

CAVALLINI, Grasielle Soares. **Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio utilizando dupla filtração para fins de reúso.** Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, PR, 2015.

DIAS, T. **Membranas: Meio Filtrante de Tecnologia Avançada.** Revista e Portal Meio Filtrante, Ano V, Edição n. 23, 2006.

ETCHEPARE, Ramiro Gonçalves. **Integração de processos no tratamento de efluentes de lavagem de veículos para reciclagem de água.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2012.

FAGUNDES, J. M. **Saúde de trabalhadores em estações de tratamento de água: riscos químicos. Estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FERREIRA, Matheus De Conto; THOMÉ, Antônio. **Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.18, p.1-12, Novembro, 2011. Passo Fundo, RS.

FIGUEIREDO, Gabriella Stávale; PIMENTEL, Lia Lorena. **Caracterização dos agregados reciclados de construção civil.** Anais do XX Encontro de Iniciação Científica – ISSN 1982-0178, Anais do V Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – ISSN 2237-0420. 22e 23 de setembro de 2015. Campinas, SP.

FRANÇA, Edson Antonio; QUEIROZ, Everton Gomes; RABUSKE, Fernanda Batista; SOUZA, Luiz Vicente Ledur de; COSTA, Juzelia Santos. **Blocos de concreto produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição – rcd: processo de produção.** Cuiabá, 2013.

GALVÍN, Adela P.; AYUSO, Jesús; JIMÉNEZ, Jose Ramón; AGRELA, Francisco. **Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes.** Waste Management 32 (2012) 88–95.

GALVÍN, Adela P.; AYUSO, Jesús; GARCÍA, Isabel García; JIMÉNES, José Ramón; GUIÉRREZ, Francisco. **The effect of compaction on the leaching and pollutant emission time of recycled aggregates from construction and demolition waste.** Journal of Cleaner Production 83 (2014) 294-304.

GARCIA, X.; PARGAMENT, D. **Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making.** Resources, Conservation and Recycling 101 (2015) 154–166.

GEUS, Ana C. L. **Análise do cenário do gerenciamento de resíduos na construção civil**. 2009. 47 f. Monografia (Especialização Gestão da Indústria: Produção e Manutenção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2009.

GEUS, Lúcio Marcos de; GARCIA, Carlos Mello; **Gestão de resíduos de construção em edificações de grande porte na cidade de Ponta Grossa**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v.6, n.2, p. 124-129, ago. 2014.

GUIDA, Marco, MATTEI, Marialuisa. ROCCA, Claudio Della, MELLUSO, Giovanni, MERIÇ, SUREYYA; **Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater**. Journal Desalination 211 (2007), p. 113–127.

JACOB, Jefferson de Santana; ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik; SCHAEFER, Cecília Ogliari. **Análise da lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados**. V Encontro Nacional, III Encontro Latino-Americano sobre edificações e comunidades sustentáveis. Recife, 2009.

JOCHM, Lidiane Fernanda; ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de rcd: características físicas e propriedades da microestrutura**. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - 29 a 31 Outubro 2012 - Juiz de Fora.

KRUGER, Patrícia; SOUZA, Annelise Breus; KONOFAL, William Uczak. **Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD**. 8º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa, 2013.

KULAKOWSKI, M. P.; BREHM, F. A.; KAZMIERCZAK, C. DE S.; LUNKES, M. **Contribuição à avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos: proposta de método para obtenção de extrato lixiviado**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 69-81, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de construção e demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Porto Alegre, 2001.

LIMA, A.C.A. **Gerenciamento e Controle de Poluição**. Curso de Especialização em Gestão Ambiental, CEUCLAR, 2005.

MACEDO, Jorge Antônio Barros de. **Métodos Laboratoriais de Análises Físico-Químicas & Microbiológicas**. 3ª Ed. Minas Gerais. 2005.

MÁLIA, Miguel; BRITO, Jorge de; BRAVO, Miguel; Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. **Ambiente Construído**, v.11, n.3, jul/set 2011. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212011000300009&script=sci_arttext. Acesso em out. 2014.

MANCUSO, P. C. S; DOS SANTOS, H.F. **Reúso de águas**. Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental 1. Ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003.

METCALF 7 EDDY. **Wasterwater Engineering – Treatmente, Disposal and Reuse**. Singapura: McGraw-Hill, 2003.

NUNES, J. F. **Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões flocculentas**. (Mestrado em Química). Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2008.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias de; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE, Brasil**. Engenharia Civil – UM. Número 41, 2011.

PAVANELLI, Gerson. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou elevada turbidez elevada**. 2001, 233 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PEREIRA, Lauro C.; TOCCHETTO, Marta R. L. **Resíduos: “É preciso inverter a pirâmide – reduzir a geração”!** Disponível em: < http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/artigos/residuos%3A_%E2%80%9Ce_preciso_inverter_a_piramide_%E2%80%93_reduzir_a_geracao%E2%80%93D!.html> Acesso em out. 2014.

PNUMA. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável e a Erradicação da Pobreza – Síntese para Tomadores de Decisão**. Disponível em: <http://www.unep.org.br/admin/publicacoes/texto/1101-GREENECONOMY-synthesis_PT__online_version.pdf>. Acesso em set. 2011.

RUDNITSKI Jonas C.; NAKANISHI Elizabete Y.B.; MOHAMAD Gihad. **Avaliação de Resíduo de Construção e Demolição de Cor Cinza e Vermelho em Argamassa de Revestimento**. 2016.

RUIZ-ROSA, Inés; GARCÍA-RODRIGUES, Francisco J.; MENDOZA-JIMÉNES, Javier. **Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes**. Journal of Cleaner Production 113 (2016) 299-310.

SANI, D; MORICONI, G. FAVA; CORINALDESI, V. **Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates**. Waste Management 25 (2005) 177–182.

SANTOS, Joel Martins dos; SANTOS, Eliane Jorge dos; RIBEIRO, Thiago Henrique; OLIVEIRA, Ivanir Luiz de; BANIK, Marcio Chem; Estudo para o aproveitamento econômico do resíduo de construção e demolição. **Congresso Internacional de Administração**, set. 2015. Disponível em < file:///C:/Users/helenton85/Downloads/ 01434941454.pdf>. Acesso em dez. 2015.

SCHAEFER, Cecília Ogliari; ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. **Análise da lixiviação de metais pesados em argamassas produzidas com agregados reciclados**. XII Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Fortaleza, CE, 2008.

SCHNEIDER, Arceli Maria; RADMANN, Maiara; SILVA, Taisa Pires da; OLIVEIRA, Tarcisio Dorn de. **Geração de resíduos sólidos da construção civil**. Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão vol. 3 nº1. 2015.

SILVA, R.W.C; ARNOSTI Jr. **Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado**. HOLOS Environment, v.5 n.2, 2005. ISSN: 1519-8634.

SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAMPITELI, Vicente C. **Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas I International Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, 2005.

SILVA, José; GOMES, Antonia; DINIZ, Luciene; CATÃO, Maria. **Reduzir, Reutilizar e Reciclar - Proposta de Educação Ambiental para o Brejo Paraibano**. Congresso Brasileiro de Extensão Universitária, Belo Horizonte, 2004.

SILVA FILHO, A. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso – um estudo de caso**. 2009, 100 f. Dissertação (Mestrado em química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, Vinícius Arcanjo da, FERNANDES, André Luís Teixeira. **Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG**. Revista Sociedade & Natureza. Vol.24, N.2, Uberlândia: Mai/Ago 2012.

SPOSTO, Rosa M. Os resíduos da construção: problema ou solução? **Revista Espaço Acadêmico**, n. 61, jun. 2006. Disponível em: <<http://www.espacoacademico.com.br/061/61sposto.htm>>. Acesso em out. 2015.

TAVEIRA, Alberto Fábio da Silva. **Avaliação da utilização do agregado de concreto reciclado (acr) em substituição ao agregado miúdo na fabricação de argamassas e peças de concreto para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Manaus, 2010.

TELLES, D. A; COSTA, R. H. P. G. **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas**. 1ª edição. São Paulo: Blucher, 2007.

TOWSEND, T. JANG, Y-CH; TOLAYMAT, T. **Leaching Tests for Evaluting Risk in Solid Wast Management Decision Making**. Florida Center for Solid and Hazardous Wast Management Report No 03-01. Gainesville, FL, USA. 2003.

ULSEN, Carina; KAHN, Henrique; ÂNGULO, Sérgio C.; JONH, Vanderley M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, jun. 2010.

VARELA, James José. **Desenvolvimento de um novo conceito de plantas de lavagem e classificação para reciclagem de material contaminado**. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(3): 591-596, jul. set. 2010, p 591-596.

VEGAS, Iñigo; BROOS, Kris; NIELSEN, Peter; LAMBERTZ, Oliver; LISBONA, Amaia. **Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition**

waste by using near-infrared sorting technology. Construction and building materials 75 (2015) 121-128. 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3.ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005. 452 p. Disponível em <http://books.google.com.br/books?id=1pxhLVxVFHoC&pg=PA325&lpg=PA325&dq=remo%C3%A7%C3%A3o+de+s%C3%B3lidos+and+von+sperling&source=bl&ots=ChxsI83H4t&sig=tCMu3ugiT3EskQPK_ECuxby011I&hl=ptBR&sa=X&ei=LXQU9SQKfLPsATCvIGICw&ved=0CEgQ6AEwBA#v=onepage&q=remo%C3%A7%C3%A3o%20de%20s%C3%B3lidos%20and%20von%20sperling&f=false>. Acesso em jun 2014

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄAS, I.A. **Sustentabilidade na Construção Civil.** São Paulo, maio 2011.

APÊNDICE A - Caracterização do RCD cinza bruto em triplicata – Granulometria

Caracterização do RCD cinza bruto em triplicata – Granulometria.

Peneira (mm)	Massas (g)			Porcentagens Retidas					
				Individuais			Acumuladas		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
12,5	5,5	0,0	0,0	0,55%	0,00%	0,00%	0,55%	0,00%	0,00%
9,5	2,9	0,0	0,0	0,29%	0,00%	0,00%	0,84%	0,00%	0,00%
4,8	3,9	7,2	7,0	0,39%	0,73%	0,70%	1,24%	0,73%	0,70%
2,4	123,0	128,9	148,9	12,37%	12,99%	14,96%	13,61%	13,72%	15,67%
1,2	185,0	200,4	207,5	18,61%	20,20%	20,85%	32,22%	33,91%	36,52%
0,6	201,6	203,4	206,7	20,28%	20,50%	20,77%	52,49%	54,41%	57,28%
0,3	251,9	230,7	230,8	25,34%	23,25%	23,19%	77,83%	77,66%	80,48%
0,15	161,0	159,4	131,4	16,19%	16,06%	13,20%	94,03%	93,72%	93,68%
0,075	41,1	46,2	40,0	4,13%	4,66%	4,02%	98,16%	98,38%	97,70%
Fundo	18,3	16,1	22,9	1,84%	1,62%	2,30%	100,00%	100,00%	100,00%
Σ	994,2	992,3	995,2	100%	100,00%	100,00%	-	-	-

Fonte: Os autores (2015).