

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

GABRIEL BIGLIA WASILEWSKI

INFLUÊNCIA DO RECOBRIMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA QUALIDADE DE ÁGUA
E ESGOTO

PONTA GROSSA

2019

GABRIEL BIGLIA WASILEWSKI

**INFLUÊNCIA DO RECOBRIMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA QUALIDADE DE ÁGUA
E ESGOTO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, ofertado por associação ampla entre Universidade Estadual de Ponta Grossa e Universidade Estadual do Centro Oeste.

Orientadora: Dr^a Maria Magdalena Ribas Döll

PONTA GROSSA

2019

W319 Wasilewski, Gabriel Biglia
Influência do recobrimento de agregado de resíduo de construção e
demolição (RCD) na qualidade de água e esgoto / Gabriel Biglia Wasilewski.
Ponta Grossa, 2019.
85 f.

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

Orientadora: Profa. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll.

1. RCD. 2. Liviação. 3. Tratamento de água. 4. Tratamento de esgoto. I.
Döll, Maria Magdalena Ribas. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Universidade Estadual do Centro Oeste. Saneamento Ambiental e Recursos
Hídricos. III.T.

CDD: 628.4



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



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Titulo da Dissertação: "INFLUÊNCIA DO RECOBRIMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO ESGOTO".

Nome: GABRIEL BIGLIA WASILEWSKI

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Maria Magdalena Ribas Doll.

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof.ª. Dr.ª. Maria Magdalena Ribas Doll
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Prof.ª Dr.ª Deyse Marcia Pacheco Gebert
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Prof.ª Dr.ª Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Ponta Grossa, 06 de setembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Guilherme, e à minha mãe, Aline, por sempre batalharem com todas as forças apostando em minha educação, formação acadêmica e formação pessoal.

À Rachel e à Margarida Wasilewski, por compartilharem a sabedoria que somente uma avó e uma bisavó podem transmitir.

Ao Abelardo, pela transmissão de valores e, que mesmo sem nenhum laço sanguíneo, por ser o melhor avô que um neto poderia ter.

Aos meus tios Pablo e Felipe por me apoiarem, sempre prontamente.

À minha irmã, Caroline, pela compreensão, respeito e parceria.

À minha amiga, companheira e namorada Ana Claudia, por me me encher de carinho, ressignificar meus sonhos e me permitir fortalecer a compreensão e a gratidão.

A todos os amigos. Os que encontrei durante o mestrado e os que já trouxe de outrora, por me ajudarem sempre quando precisei, por acreditarem no meu potencial e por fazer a vivência ser mais leve.

A todos os professores que tive ao longo do programa, por manterem em mim viva as chamas do aprender e do ensinar e por compartilharem de coração aberto o conhecimento.

À professora Maria Magdalena Ribas Döll por aceitar me orientar, tornando possível a realização do presente trabalho e por me inspirar nos âmbitos pessoal e profissional.

À professora Patrícia Kruger por disponibilizar prontamente as instalações do Laboratório de Materiais de Construção Civil e pelo suporte técnico-científico.

À professora Lilian Gouveia por disponibilizar prontamente as instalações do Laboratório de Pavimentação e pelo suporte técnico-científico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que viabilizou o presente trabalho por meio de uma bolsa de estudos.

Aos técnicos Cicero Guerellus, Paulo Ubirajara dos Santos e Elizir da Aparecida Chemin por e ajudarem na realização dos ensaios laboratoriais.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil pela excelente convivência diária e prontidão em cooperar.

À Sanepar, por disponibilizar a coleta de efluente para a realização dos ensaios.

À Cooperconcre, por ceder a quantidade necessária de agregado reciclado para a realização do estudo.

À Stratura Petrobras, pela doação da emulsão asfáltica utilizada na cobertura dos materiais.

A todos aqueles e aquelas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão do presente trabalho.

À inteligência maior que rege a vida, o universo e tudo o mais.

É preciso amar as pessoas
Como se não houvesse amanhã
Porque se você parar pra pensar
Na verdade não há

(Renato Manfredini Júnior)

RESUMO

O RCD figura atualmente como uma questão de interesse mundial, tendo em vista que em muitos países, inclusive no Brasil, consiste no resíduo mais volumoso produzido pelo ser humano. Usos como a aplicação em concretos e em pavimentação estão cada vez mais consolidados, mas outras possibilidades ainda se mostram pouco exploradas. O presente trabalho tem como foco a avaliação da utilização do agregado reciclado em sistemas de tratamento de água e de esgoto, em substituição aos agregados naturais, bem como a possibilidade do recobrimento, com parafina ou emulsão asfáltica, do agregado reciclado, visando diminuir os efeitos da lixiviação. Para a realização do estudo foram avaliados agregados reciclados misto (ARM), agregado reciclado de concreto (ARC) e agregados naturais (AN) submetidos ao contato com água tratada e esgoto secundário. Além da caracterização dos agregados reciclados quanto a sua composição e propriedades físicas, analisou-se, por meio de valores obtidos com parâmetros de qualidade de água, sendo eles: pH, alcalinidade, condutividade elétrica, cálcio, sulfato, sólidos totais, DQO, cor, turbidez, fósforo total e nitrogênio amoniacal, a fim de verificar o comportamento desse resíduo frente ao contato com água e esgoto. Foi constatado que a lixiviação de compostos presentes no RCD causa alterações relevantes na qualidade da água e do esgoto e que para alguns parâmetros a cobertura do agregado se mostra interessante, no entanto para outros essa cobertura não é pertinente. Também foram observadas diferenças entre o comportamento dos diferentes agregados frente aos diferentes materiais de cobertura.

Palavras-chave: RCD; lixiviação; tratamento de água; tratamento de esgoto.

ABSTRACT

The C&DW appears currently as a worldwide issue because this waste consists the voluminest residue produced by human. Uses like in concrete production and paving application are increasingly consolidated but other possibilities still less explored. The follow work focus on evaluation of recycled aggregates use in water and sewage treatment processes replacing natural aggregates, as well as the possibility of recycled aggregates cover with paraffin or asphaltic emulsion aiming a decrease of leaching effects. For the study achievement were evaluated mixed recycled aggregates (MRA), concrete recycled aggregates (CMA) and natural aggregate (NA) submitted to contact with potable water and secondary sewage. Further of characterization of recycled aggregates as their physical properties, was analyzed the behavior of these residue in view of their contact with water and sewage. This behavior was analyzed using water quality parameters being them: pH, alcalinity, conductivity, calcium, sulfate, total solids, COD, color, turbidity, total phosphor and amoniacal nitrogen. Was verified that the leaching of CD&W compounds results in interesting changes on water and sewage quality. For some parameters and materials, the aggregate cover is interesting and for others is not. Was observed too different aggregate behavior in face of different cover material and vice versa.

Keywords: C&DW; leaching; water treatment; sewage treatment,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de trabalho	27
Figura2 - Britagem de Agregado Reciclado de Concreto (ARC) no pátio da cooperativa	28
Figura 3 – Peneiras utilizadas na padronização dos agregados	29
Figura 4 – Frações componentes do agregado reciclado misto (ARM) produzido pela Cooperconcre	30
Figura 5 – Quarteamento de amostras de ARM	31
Figura 6 – Agregado reciclado de concreto coberto com emulsão asfáltica	32
Figura 7 – Realização da mistura de agregado reciclado e emulsão asfáltica	33
Figura 8 – Temperatura da mistura entre agregado reciclado misto e parafina.....	34
Figura 9 – Recipientes suporte contendo agregados.....	35
Figura 10 – Recipientes suportes posicionados na incubadora, preenchidos com agregados e água.....	36
Figura 11 – Agregados utilizados nos ensaios estatísticos, em quatro réplicas.....	39
Figura 12 – Fração obtida no ensaio de material pulverulento.....	42
Figura 13 – Frações obtidas na análise visual da composição do agregado reciclado misto.....	43
Figura 14 – diferença de cor nos diferentes tratamentos	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – pH, condutividade elétrica e alcalinidade no lixiviado de água	47
Gráfico 2 – DQO no lixiviado de água	48
Gráfico 3 – Sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais no lixiviado de água.....	49
Gráfico 4 – Sulfato, cálcio e fósforo total no lixiviado de água	51
Gráfico 5 – Cor e turbidez no lixiviado de água.....	53
Gráfico 6 – pH, alcalinidade e condutividade elétrica no lixiviado de esgoto	55
Gráfico 7 – DQO no lixiviado de esgoto	56
Gráfico 8 – Sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais no lixiviado de esgoto.....	58
Gráfico 9 – Sulfato e cálcio no lixiviado de esgoto	60
Gráfico 10 – Fósforo total e nitrogênio amoniacal no lixiviado de esgoto	62
Gráfico 11 – Cor e turbidez no lixiviado de esgoto.....	63
Gráfico 12 – Curvas: cor x tempo.....	66
Gráfico 13 – Curvas: turbidez x tempo.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas dos agregados reciclados e natural.....	40
Tabela 2 – Composição dos agregados reciclados segundo NBR 15116.....	43
Tabela 3 – Óxidos componentes do agregado reciclado de concreto	44
Tabela 4 – Óxidos componentes do agregado reciclado misto.....	44
Tabela 5 – Diferenças entre médias referentes ao lixiviado de água em que não houve interação entre fatores	68
Tabela 6 – Diferenças entre médias referentes ao lixiviado de esgoto em que não houve interação entre fatores	70
Tabela 7 – Diferença entre médias referentes ao lixiviado de água em que houve interação entre os fatores	71
Tabela 8 – Diferença entre médias referentes ao lixiviado de esgoto em que houve interação entre os fatores	76

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Agregado Natural
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
C-LABMU	Complexo de Laboratórios Multiusuários
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FRX	Fluorescência de Raios X [espectrometria]
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RALF	Reator Anaerobio de Leito Fluidizado
RCD	Resíduo de Construção e Demolição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	CONSTRUÇÃO CIVIL E POLUIÇÃO AMBIENTAL	17
3.2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	19
3.2.1	Redução, reutilização e reciclagem do RCD.....	22
4	METODOLOGIA	27
4.1	ORIGEM, PADRONIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	28
4.2	MATERIAIS PARA COBERTURA DOS AGREGADOS.....	31
4.2.1	Emulsão asfáltica.....	32
4.2.2	Parafina.....	33
4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
4.4	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	40
5.2	COMPONENTES ÓXIDOS DOS AGREGADOS POR FRX.....	44
5.3	ÁGUA	46
5.4	ESGOTO SECUNDÁRIO	54
5.5	INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS	67
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6	CONCLUSÕES	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O mundo em que vivemos está em constante mudança, sendo algumas benéficas e outras prejudiciais à vida. De acordo com a ótica apresentada por Brasileiro e Matos (2015), não há como haver crescimento e desenvolvimento sem que a indústria da construção civil acompanhe no mesmo ritmo e, decorrente disso, surgem os problemas de geração e disposição inadequada de resíduos.

A chave para que as mudanças deixem de ser tão prejudiciais está na geração e democratização do conhecimento acerca das questões ambientais latentes, como é o caso dos resíduos de construção e demolição. Por meio da educação é possível atingir a população como um todo, bem como seus representantes, desencadeando ações amparadas em responsabilidade social e ambiental capazes de aperfeiçoar toda a cadeia produtiva da construção civil (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

Conforme abordado por Gálvez-Martos *et al.* (2018), a bagagem cultural brasileira sustenta uma construção civil tecnologicamente atrasada que perpetua práticas inadequadas, acarretando em altos índices de desperdício e geração de resíduos. Para Amadei *et al.* (2011), a construção civil precisa urgentemente explorar boas práticas com objetivo de minimizar as perdas, pois não há como frear a expansão urbana para evitar a geração de resíduos, mas é possível realizá-la de maneira sustentável.

Os resíduos de construção e demolição são abordados levando em conta o problema caracterizado pelo seu expressivo volume. Conforme levantado por Ulubeyli; Kazaz e Arslan (2017), em vários países, inclusive no Brasil, o RCD consiste no resíduo mais volumoso produzido nas cidades, podendo chegar a representar 70% do volume de todo o resíduo sólido urbano em alguns países ao redor do globo.

Por se tratar de uma questão desprovida de limites geográficos, autores como Gálvez-Martos *et al.* (2018) e Ulubeyli; Kazaz e Arslan (2017) já buscaram entender o panorama mundial do gerenciamento do RCD, confluindo para a conclusão de que existem meios para se garantir a sustentabilidade da construção civil. Os autores revelam que já existe conhecimento técnico consolidado capaz de mitigar os problemas ambientais, desde a fase de produção de matéria prima, cabendo aos atores sociais a missão de buscar e aplicar as boas práticas já existentes.

Dentre as técnicas consolidadas no gerenciamento do RCD, figura a reciclagem de sua parcela mineral, por meio da produção de agregados. Brasileiro e Matos (2015) ressaltam que são várias as aplicações já praticadas para esse tipo de agregado, citando principalmente o uso em pavimentação e na fabricação de concretos e argamassas.

A reciclagem do RCD causa impactos positivos, segundo Amadei *et al.* (2011), nas esferas ambientais, sociais, econômicas e sanitárias. Já Galvín *et al.* (2014) enfatizam que a reciclagem na construção civil causa diminuição da necessidade da produção de matéria prima para o setor da construção.

Ainda que a reciclagem exista, mesmo que incipiente, e que alguns usos já tenham se mostrado pertinentes, a comunidade científica não para de buscar novas aplicações visando uma destinação cada vez mais adequada ao RCD.

Como exemplo de aplicações diversificadas do RCD, Schneider *et al.* (2011) relataram ser possível a reintegração do agregado reciclado de concreto na produção do cimento. Yang *et al.* (2012), por sua vez, comprovaram a eficiência do resíduo na remoção de fósforo e nitrogênio no tratamento de esgoto doméstico, além de ressaltar a dupla vantagem de se utilizar um resíduo, o sólido, na gestão de outro resíduo, os efluentes.

Os agregados naturais já são amplamente utilizados em diversos sistemas de tratamento de água e de esgoto ao redor do planeta, nos quais os agregados são aplicados em suas mais variadas formas para a exploração de suas propriedades como material granular, desde os formados por partículas pequenas, como as areias utilizadas em filtros de água, até os formados por partículas maiores, como os leitos de filtros biológicos usados em tratamento de efluentes.

Surge, dessa maneira, a possibilidade da substituição de materiais granulares naturais por materiais granulares reciclados também em sistemas de tratamento de água e efluentes, porém mesmo a parcela mineral do RCD, denominada inerte por alguns autores como Ulubeyli; Kazaz e Arslan (2017), está sujeita à lixiviação de substâncias que podem prejudicar o meio, conforme reportado por diversos pesquisadores, como Kosson *et al.* (2002) e Engelsen *et al.* (2012).

A lixiviação do RCD pode afetar negativamente os processos de tratamento de água e esgoto por meio da perturbação de parâmetros de qualidade essenciais ao sucesso dessas atividades. Sendo assim, foram analisadas duas possibilidades de cobertura dos agregados

reciclados, procurando minimizar os efeitos da lixiviação e alcançar um material que apresentasse características que o tornassem passíveis de sua aplicação em sistemas de tratamento de água e de esgoto. Atualmente as empresas que executam as obras de unidades operacionais, tais como filtros biológicos aeróbios, reatores com biomassa imobilizada e alagados construídos, usam a brita comercial em diversas granulometrias.

Porém, como enfatizado por diversos autores, o RCD pode liberar ao meio líquido componentes mais tóxicos ou poluidores do que aqueles que estão presentes nas águas residuárias. Assim, caso a superfície destes agregados de RCD possa ser impermeabilizada, os parâmetros de qualidade da água serão menos afetados (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2014; ENGELSEN *et al.*, 2012; GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018; KOSSON *et al.*, 2002; MIKAMI, 2016).

Para o isolamento da superfície de contato dos agregados reciclados, os mesmos foram misturados com dois derivados do petróleo: a parafina e a emulsão asfáltica, que consistem em materiais com propriedades impermeabilizantes e capazes de formar película sobre superfícies irregulares.

Autores como Akhtar e Sarmah (2018) apontam a grande variabilidade e conseqüente insuficiência de normatização do RCD como um dos principais impeditivos da ampla reciclagem das mais de 70 milhões de toneladas anuais do resíduo geradas no Brasil, de acordo com os mesmos autores, sendo que essa variação se origina em diversos fatores, como a origem do resíduo, posição geográfica e tipo de obra.

Essa variabilidade é uma dificuldade que assola todo tipo de aplicação e estudo envolvendo os resíduos de construção e demolição, inclusive os casos relatados no presente trabalho, onde os RCD foram submetidos ao contato com água e esgoto, com ou sem película cobertura, revelando grandes variações de resultados.

As dificuldades técnicas reportadas na literatura bem como as descritas neste estudo evidenciam a necessidade de pesquisa e desenvolvimento em larga escala para que o RCD possa ser gerenciado visando seu aproveitamento para outros fins de maneira cada vez mais adequada e eficiente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicação de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição, cobertos com parafina e emulsão asfáltica, em sistemas de tratamento de água e esgoto por meio de parâmetros de qualidade da água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o agregado reciclado quanto às suas características físicas;
- Avaliar a resposta, quanto a parâmetros de qualidade de água, do agregado reciclado, utilizando como materiais de revestimento a parafina e a emulsão asfáltica;
- Ponderar acerca do uso de parafina e emulsão asfáltica como materiais de revestimento do RCD visando sua aplicação em sistemas de tratamento de água e sistemas de tratamento de efluentes.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E POLUIÇÃO AMBIENTAL

Com a Revolução Industrial criou-se uma necessidade crescente por recursos extraídos da natureza para sustentar o consumismo, um fenômeno até então desconhecido pela humanidade, o qual impulsiona o extrativismo. Conforme definição adotada por Gomes (2018), o extrativismo consiste em uma maneira de produzir bens na qual os recursos são retirados diretamente da sua área de ocorrência natural, sendo a coleta de produtos vegetais, de produtos minerais e a pesca três exemplos clássicos de atividades extrativistas.

O uso de materiais de origem mineral está enraizado em todos os aspectos da vida cotidiana do ser humano e o uso desses materiais se dá em grandes escalas. Lusty e Gunn (2014) mostram a crescente demanda por recursos minerais no mundo, seja em quantidade, que se justifica com o crescimento populacional, seja em variedade, causada pelo avanço tecnológico. Os mesmos autores, apesar de indicar a crescente e desordenada demanda por recursos minerais na Terra, se mostram otimistas, desde que os esforços sejam amplamente destinados à pesquisa e inovação relativas à exploração sustentável.

Um dos grandes propulsores do extrativismo consiste na construção civil, pois é um setor da economia mundial que demanda uma grande quantidade de materiais naturais. A produção do cimento se dá por meio da exploração de jazidas de calcário e, conforme exposto por Benhelal *et al.* (2013) bem como por Maury e Blumenschein (2012), por exemplo, é responsável por cerca de 5% da emissão de CO₂ no mundo. Akhtar e Sarmah (2018) atribuem ao processo produtivo dessa *commodity* o patamar de maior poluidor da atmosfera do mundo.

O Brasil ocupa posição de destaque global em reservas e produção mineral, colocando-se entre os seis principais mercados. O setor da mineração vem crescendo nas últimas décadas e sempre foi responsável por uma parcela representativa do Produto Interno Bruto nacional, gerando empregos, exportações e movimentando a economia nacional. Apesar de a extração mineral ser tão importante no desenvolvimento nacional, ainda existem muitos desafios a serem vencidos, principalmente no tocante ao fazer com que esse setor progrida em direção ao desenvolvimento sustentável (BARRETO, 2001).

Yang (2018) cita que a exploração mineral figura como controversa, pois ao mesmo tempo em que representa um desenvolvimento econômico promovido pelo beneficiamento e

comércio, também causa uma degradação ambiental e social tão grande que pode tornar a região explorada desprovida de interesse econômico. Tendo em vista os efeitos negativos da exploração mineral, o autor cita que devem ser tomadas medidas no que tange a racionalização do uso desse recurso para que as necessidades sejam supridas sem a completa destruição das fontes.

A produção de cimento, atividade extrativa protagonista na economia brasileira, gera diversos tipos de impactos ambientais, podendo citar-se a poluição do ar, causada pela grande emissão de gases estufa à atmosfera, a poluição e degradação do solo, devido às atividades de mineração intrínsecas à produção do cimento, e também a geração de resíduos sólidos, tendo em vista que milhões de toneladas do produto são comercializadas em sacos de papel (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2012).

Grande parte das perturbações do meio ambiente está atrelada ao âmbito urbano, situação que acarreta em cenários de diversos tipos de poluição acontecendo simultaneamente, ou seja, no contexto das cidades torna-se indissociável a presença dos diferentes tipos de poluição e, conforme ressaltam Amadei *et al.* (2011), não há como frear o desenvolvimento urbano, porém deve-se promovê-lo de forma sustentável.

Neto; Rabelo e Freire (2015) salientam a problemática questão da poluição hídrica gerada em áreas urbanas. De acordo com os autores, esse tipo de contaminação da água é bastante prejudicial e complexo, devido à heterogeneidade das fontes poluidoras, que vão desde a disposição inadequada de resíduos no perímetro urbano até despejos irregulares de efluentes residenciais e industriais.

Além da poluição atmosférica e da poluição hídrica, é de extrema importância ressaltar a poluição proveniente de resíduos sólidos, que pode agir na contaminação tanto atmosférica, hídrica como também do solo. Conforme ressaltado por Guerrero; Maas e Hogland (2013), o gerenciamento de resíduos sólidos também deve ser um foco da atuação de atores sociais ao redor do mundo, principalmente em países em desenvolvimento, onde o crescimento populacional ainda é grande e significa um conseqüente crescimento da geração de resíduos.

3.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A resolução 307 do Conama (BRASIL, 2002), que dispõe estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil e a NBR 15116 (ABNT, 2004), que dispõe sobre agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e sua utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, trazem a seguinte definição para o RCD:

Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002 e ABNT, 2004).

John e Agopyan (2000) reportaram que a quantidade de RCD gerado nos centros urbanos podem atingir valores até 670kg/hab por ano. Tomando por base esse índice de geração, Ponta Grossa apresentaria uma geração anual de aproximadamente 250.000 toneladas.

A geração de RCD está intrínseca à construção civil, portanto, como ressaltado por Amadei *et al.* (2011), o foco deve ser direcionado às boas práticas associadas à diminuição do desperdício de materiais em todas as etapas da obra, bem como à demolição sistematizada, visando o reaproveitamento do máximo possível de material.

De acordo com Akhtar e Sarmah (2018), os grandes índices de geração de RCD, que ultrapassam 70 milhões de toneladas anuais, são atribuídos à mão-de-obra desqualificada que é predominante na indústria da construção civil, fato que acarreta evidentes desperdícios de materiais bem como sua disposição inadequada.

A geração de RCD está relacionada à cultura enraizada em cada país, conforme levantado por Ulubeyli; Kazaz e Arslan (2017), que apontam uma enorme discrepância na parcela de resíduos sólidos urbanos representada pelo RCD. Os mesmos autores apontam valores que vão desde 16% de todo o resíduo no Japão até 70% registrado na Espanha.

No Brasil o montante de RCD consiste na parcela mais expressiva dos resíduos sólidos urbanos produzidos no país, representando mais de 60% da massa de tudo o que é gerado (BRASIL, 2010).

Apesar dos dados alarmantes acerca da geração de RCD, os métodos de quantificação ainda não se mostram tão precisos. Tal fato é discutido por Angulo *et al.* (2011), que apontam que o problema maior da identificação se deve ao volume de RCD gerado em situação informal, ou seja, em pequenas reformas. Apesar da dificuldade de precisão, os autores propõem métodos de quantificação que podem ser adotados por atores sociais interessados em promover uma melhoria na problemática que envolve o RCD.

Mesmo com grandes discrepâncias nas estimativas de quantidade de RCD, autores como Butera; Christensen e Astrup (2015) são categóricos em afirmar que esse resíduo deve ser tratado como uma prioridade nas ações de gestão de resíduos sólidos urbanos.

Ainda que difícil a estimativa precisa acerca da geração de RCD em um município, Geus (2016) realizou esse levantamento, apontando para uma geração diária de 714,3 toneladas diárias de resíduo de construção e demolição em Ponta Grossa, no ano de 2015. Tomando por base esse valor, Ponta Grossa apresentou uma geração de aproximadamente 46.000 toneladas em um ano, valor que difere substancialmente daquele calculado utilizando o índice de geração apresentado por John e Agopyan (2000). Essa discrepância reforça a heterogeneidade das questões inerentes ao gerenciamento do RCD, reafirmando a necessidade de técnicas e estudos precisos e localizados, evitando assim generalizações imperitas.

Tendo em vista a diversidade das fontes de matérias primas destinadas à construção civil, a imensa variedade de materiais e técnicas aplicados em edificações e a grande gama de processos e profissionais envolvidos no setor, o resultado é a geração de um tipo de resíduo extremamente variável. O RCD proveniente da construção de um prédio residencial é diferente daquele gerado em uma obra de pavimentação, que por sua vez é diferente daquele advindo de uma demolição. Ressalta-se ainda a influência da localização geográfica, pois uma obra locada na Ásia resultará em resíduos diferentes de uma obra semelhante locada na América do Sul (AMADEI *et al.*, 2011; ANGULO *et al.*, 2013; BRASILEIRO; MATOS, 2015; GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018).

Conforme explicitado por Ulubeyli; Kazaz e Arslan (2017), o RCD é composto por uma fração inerte, que consiste basicamente nos fragmentos de concreto, alvenaria e plástico, e uma fração não inerte, na qual se encontra diversos tipos de materiais, como madeira, ferro, gesso, tintas e etc.

A resolução nº 307 do Conama (BRASIL, 2002), por outro lado, propõe uma divisão mais minuciosa do RCD, que consiste em quatro classes baseadas em sua destinação. A classe A consiste na parcela passível de ser transformada em agregado. Materiais que possuem outro meio de reciclagem ou reutilização, tais como madeiras e plásticos, compõem a classe B. Resíduos que não possuem reciclagem consolidada são classificados como classe C. Por fim, os resíduos perigosos, como tintas e solventes, enquadram-se na Classe D.

De acordo com Akhtar e Sarmah (2018), a variabilidade que se manifesta nos RCD é o maior empecilho para sua ampla reciclagem e reaproveitamento, tendo em vista que esse fator dificulta a criação de normas específicas e consequentemente a garantia da qualidade, o que acaba afastando o consumidor. Brasileiro e Matos (2015), no entanto, ressaltam que já existem tecnologias que podem ser aplicadas na redução dessa variabilidade, citando o uso de dosadores para produção de agregados reciclados com uma parcela controlada de agregado natural, a britagem selecionada que resulta em agregados reciclados mais homogêneos (método utilizado pela maioria das empresas para produzir distintamente o agregado reciclado misto e o agregado reciclado de concreto) e o classificador espiral, que é capaz de remover frações indesejadas do agregado reciclado.

A variabilidade intrínseca ao RCD age como um agravante aos desafios referentes a uma adequada gestão do crescimento urbano. Geus (2016) comenta os grandes impactos causados pela construção civil no planeta, destacando, além da ocupação do solo e da extração de matéria-prima, a grande geração de resíduos em toda a escala produtiva.

Segundo Akhtar e Sarmah (2018) o problema maior de poluição referente aos resíduos de construção e demolição se concentra nos países em desenvolvimento, pois esses apresentam índices expressivos de geração de RCD e gerenciamento ineficiente.

Tendo em vista que a maior parte dos RCD é formada por resíduos considerados inertes, conforme a divisão proposta por Ulubeyli; Kazas e Arslan (2017), o fator mais preocupante envolvendo esse tipo de resíduo consiste no grande volume que ele representa, o que pode desencadear a diminuição da vida útil de aterros, assoreamento e contaminação de corpos hídricos e fundos de vale (GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018).

3.2.1 Redução, reutilização e reciclagem do RCD

O RCD é produzido em obras de construção, reforma e em demolições. Para que a gestão desse resíduo alcance índices satisfatórios, o controle e o conhecimento do RCD devem acontecer já em sua geração, ou seja, os construtores devem conhecer a fundo os resíduos gerados em suas obras, reaproveitá-los onde for possível e promover a disposição adequada da parcela que não for reaproveitada (AMADEI *et al.*, 2011; BRASILEIRO; MATOS, 2015).

De acordo com Schneider *et al.* (2011) a gestão do RCD tem seu foco em medidas corretivas e/ou emergenciais, sendo que a abordagem adequada deve acontecer utilizando-se de medidas técnicas e prévias à geração, melhorando a qualidade e diminuindo a quantidade do resíduo gerado.

A reciclagem do RCD, a partir da transformação de sua parcela inerte em agregado, vem se consolidando mundialmente como a maneira mais adequada de gerenciar esse resíduo. São várias as vantagens da reciclagem, tendo em vista que ela consiste em uma atividade capaz de tratar de três grandes questões: a emissão de CO₂, a proteção de jazidas e a disposição final de um dos resíduos que se apresenta em maior volume no planeta (BRASILEIRO E MATOS, 2015; GALVÍN *et al.*, 2014; ULUBEYLI; KAZAZ; ARSLAN, 2017).

Ao mesmo tempo em que as usinas de reciclagem do RCD exercem um papel fundamental na viabilização do uso desse material, Akhtar e Sarmah (2018) ressaltam que o gasto de energia envolvido nesse processo é extremamente grande, apresentando-se como um dos fatores limitantes da reciclagem do mesmo, tendo em vista que são necessárias etapas de coleta, transporte, separação e britagem.

Tratando-se das questões intrínsecas à reciclagem do RCD por meio de usinas, Ulubeyli; Kazaz e Arslan (2017) esclarecem que existem formas de realizar a reciclagem para que ela seja capaz de atender os mais diversos tipos de demanda. Os autores ressaltam que a chave para o sucesso na implantação e no funcionamento de uma usina de reciclagem, seja ela de qualquer tipo ou tamanho, está no bom diálogo com o Poder Público, uma vez que é o Estado que dispõe das ferramentas necessárias para promover a geração de demanda bem como a rentabilidade desse tipo de empreendimento.

Akhtar e Sarmah (2018) constataram que o uso mais consolidado, com viabilidade técnico-científica comprovada, consiste na substituição de agregados naturais por RCD na fabricação de concreto, sendo que essa substituição varia entre 30% e 50% da quantidade total de agregado.

O uso em obras de pavimentação também aparece como uma destinação comum do RCD, conforme ressaltado por Gálvez-Martos *et al.* (2018). No entanto essa aplicação em obras de pavimentação não pode ser considerada uma alternativa totalmente eficaz, pois os riscos de contaminação do solo e corpos hídricos subterrâneos são eminentes. Dessa forma, Galvín *et al.* (2013) ressaltam que antes desse tipo de aplicação devem ser feitos estudos concisos com relação à lixiviação.

Conforme levantado por Brasileiro e Matos (2015), o RCD serve de matéria-prima para excelentes agregados, os quais podem ser empregados numa grande variedade de processos construtivos, como confecção de tijolos, blocos de concreto, meio-fio, calçadas, argamassas não estruturais, camadas de pavimentação e outros.

Angulo *et al.* (2013) constatam ainda que é possível a utilização do agregado reciclado para fins estruturais, desde que haja um controle de qualidade do agregado, tendo em vista que para aplicações estruturais as partículas de cerâmica vermelha devem ser removidas.

Brasileiro e Matos (2015) afirmam que a reciclagem e reutilização do RCD promove um ganho ambiental na cadeia da construção civil, uma vez que, além de promover um destino adequado para um resíduo volumoso, acarreta na diminuição de processos produtivos ambientalmente agressivos, como a mineração e a produção de cimento.

Os mesmos autores ressaltam que, além de outros materiais secundários, a areia de RCD pode substituir uma parcela dos minerais primários utilizados na fabricação do clínquer, o que reduz as emissões de CO₂, aumenta a vida útil das jazidas de calcário e ainda consiste em uma destinação adequada para um resíduo que seria encaminhado para a disposição final.

Akhtar e Sarmah (2018) advertem que o gerenciamento adequado do RCD deve partir de um esforço nacional, pois a partir da exploração desse resíduo os países podem conseguir benefícios econômicos, além dos benefícios socioambientais, porém isso se torna extremamente complexo devido à enorme quantidade de atores sociais envolvidos em uma política de gerenciamento de resíduos, em especial os de construção e demolição.

As barreiras para um total reaproveitamento e destinação adequada, conforme apontam Gálvez-Martos *et al.* (2018), não são técnicas, mas sim comerciais e culturais, tendo em vista que as técnicas construtivas são consolidadas de maneira em que o RCD é negligenciado. Os autores citam como exemplo o mercado da produção mineral, que é altamente rentável e totalmente estabelecido ao redor das economias mundiais, tornando complicada a sua substituição por um mercado de agregados reciclados.

De acordo com Geus (2016) as questões culturais levam a divergências nas técnicas adotadas para o gerenciamento do RCD, sendo assim, e tendo em vista que o problema é mundial, cabe aos países atuarem na criação de instrumentos que viabilizem o manejo do RCD em larga escala, valendo-se de instrumentos suficientes para que sejam implantadas técnicas de gestão e fiscalização eficientes.

Ainda que em alguns países já sejam alcançadas taxas de reciclagem de RCD altíssimas, Butera; Christensen e Astrup (2014) afirmam que em grande parte o resíduo reciclado é destinado de maneira inadequada, por falta de capacitação técnica de gestores públicos em questões como a composição, propriedades e potencial contaminante desse material.

Além dos usos mais comuns para o RCD, como a produção de concreto e sua aplicação em obras de pavimentação, as pesquisas vêm apresentando cada vez mais alternativas para a destinação e o reaproveitamento desse resíduo.

Schneider *et al.* (2011) declaram ser possível a utilização de areia reciclada no processo produtivo do cimento, desde que sejam tomados criteriosos cuidados em relação à qualidade e a composição do material reciclado, sendo que algumas propriedades desse material podem ser deletérias, como por exemplo a friabilidade, conforme abordado por Leite *et al.* (2011).

Kumara *et al.* (2018) apontam para o potencial adsorvente do RCD, característica que torna possível a aplicação do resíduo em sistemas de remoção de metais pesados, de efluentes industriais, por exemplo. A adsorção é um processo que apresenta baixo custo e pode ser aplicado com o uso de materiais residuais, conforme exposto por Ali e Gupta (2007).

A utilização do RCD para o tratamento de efluentes mais complexos também foi elucidada por Colombo *et al.* (2010), que mostraram o potencial desse resíduo na constituição de filtros biológicos para o tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário.

Além da aplicação no tratamento de efluentes industriais, o uso do RCD também se mostra possível em processos de tratamento de esgoto residencial. Yang *et al.* (2012) reforçam essa ideia ao comprovarem a eficiência da utilização de agregado reciclado na remoção de fósforo e nitrogênio de efluentes.

Outra possibilidade de aplicação do RCD consiste em obras geotécnicas, conforme abordado por Cardoso *et al.* (2016), tendo por exemplo a execução de bases e sub-bases para a pavimentação e a execução de gabiões.

Mesmo a parcela do RCD considerada inerte por alguns autores ou pertencente à Classe A, segundo o Conama, está sujeita à ação química e física, o que acarreta na liberação de componentes que podem ser agressivos ao ambiente em que se encontram.

Engelsen *et al.* (2012) ressaltam que para que a contaminação causada pelo resíduo de construção e demolição possa ser estimada devem ser analisadas em conjunto as características hidrológicas, edáficas e geológicas dos locais em que acontece a disposição. Os mesmos autores discorrem sobre o específico potencial contaminante desse resíduo, que por ter uma composição variada devem ser tratados e estudados de maneira direcionada.

Em síntese, o RCD consiste em um resíduo química e biologicamente menos preocupantes que os resíduos sólidos em geral, mas, devido ao grande volume que o RCD representa, o potencial poluidor torna-se grande, revelando inclusive preocupações latentes em relação à solubilização e lixiviação de compostos presentes nesse resíduo.

Conforme abordado por Butera; Crhistensen e Astrup (2015) a lixiviação de compostos provenientes do RCD pode causar a contaminação de reservatórios subterrâneos. Abordam ainda que o potencial contaminante desse tipo de resíduo está diretamente ligado à sua composição bem como à idade do mesmo, uma vez que o período de exposição às intempéries significa alterações relevantes na composição e na reatividade do RCD.

Os testes de lixiviação, de acordo com Kosson *et al.* (2002), são uma importante ferramenta para a avaliação do potencial contaminante dos resíduos, em todos os ciclos, incluindo a reciclagem, o reuso e a destinação final. De acordo com os autores os dados obtidos em testes de lixiviação devem ser utilizados para a tomada de decisão no que se refere ao gerenciamento de resíduos, tendo em vista a proteção da saúde humana e do meio ambiente.

Apesar de a lixiviação de resíduos em geral serem uma preocupação latente no meio técnico-científico, Butera; Crhistensen e Astrup (2015) alegam que as informações referentes ao RCD e à sua lixiviação ainda se mostram incompletas, o que acarreta em uma base de dados insegura para a avaliação precisa e tomada de decisão em relação ao uso e à disposição final desse material. De acordo com os autores é difícil a inferência precisa sobre a lixiviação do RCD devido à grande variabilidade desse material, o que demanda a análise de grandes amostras para que se obtenha resultados significativos.

Outra questão referente à avaliação da liberação de compostos do RCD para o meio líquido, conforme abordado por Mikami (2016) consiste na incompatibilidade entre as metodologias apresentadas ao redor do planeta, uma vez utilizando-se de metodologias diferentes para a avaliação dos mesmos parâmetros fica difícil a comparação entre resultados obtidos por pesquisadores de diferentes nacionalidades.

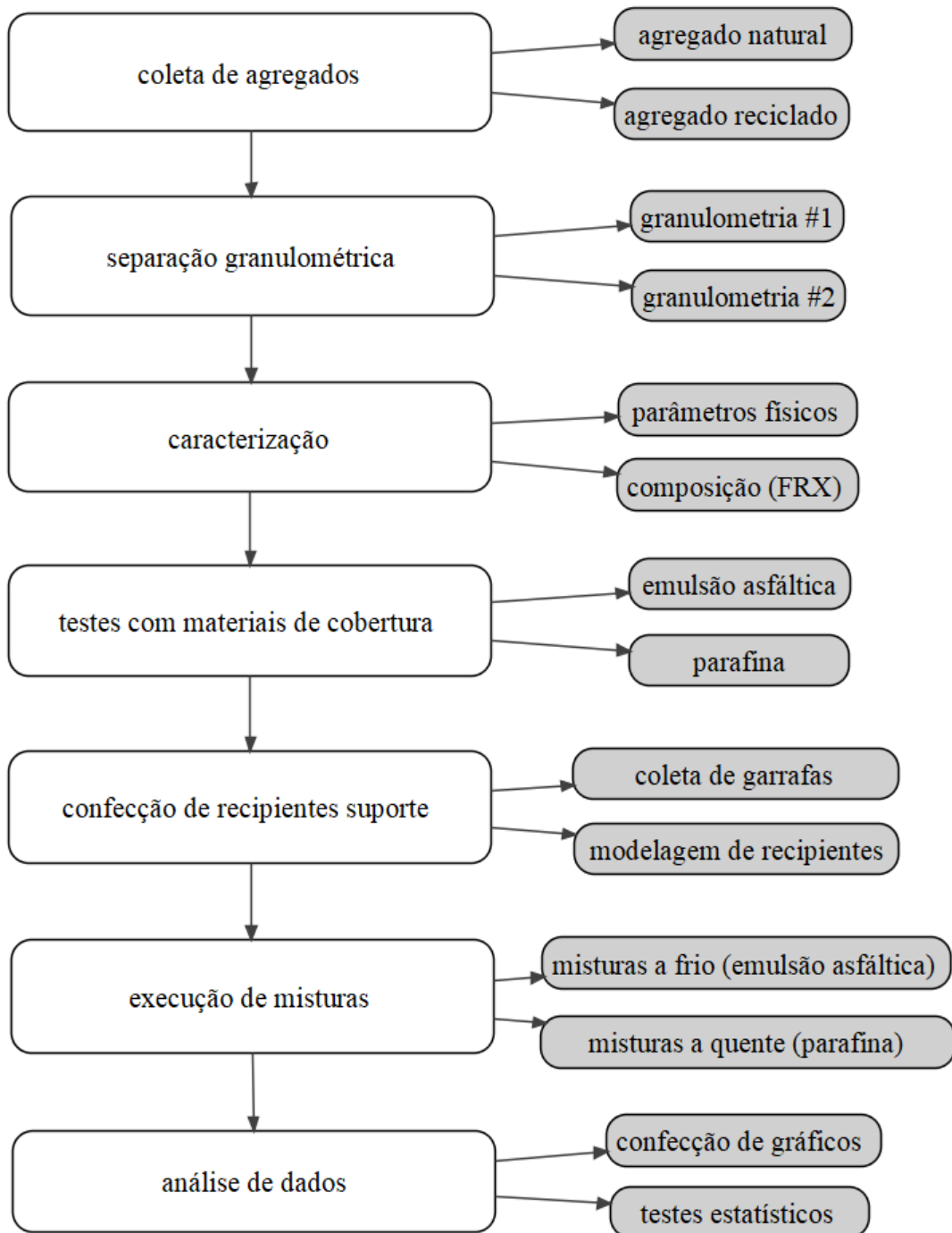
Colombo *et al.* (2010) levantam a inaplicabilidade de alguns resultados obtidos pelos métodos científicos, pois as metodologias muitas vezes propõem procedimentos que diferem substancialmente das condições reais em que a lixiviação acontece.

Apesar das dificuldades pertinentes entre o estudo da contaminação causada pelo RCD quando em contato com meios líquidos e a real aplicação de alternativas que visem a mitigação desse problema, é consenso entre os autores pesquisados que a lixiviação de compostos presentes nesse resíduo é uma questão latente.

4 METOLOGIA

Para a realização do presente trabalho as atividades foram desenvolvidas conforme as etapas explicitadas na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de trabalho



Fonte: O autor

4.1 ORIGEM, PADRONIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

O agregado reciclado utilizado foi coletado na Cooperconcre, cooperativa de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil, terraplanagem e demolição dos Campos Gerais. A cooperativa produz dois tipos de materiais, sendo eles o agregado de concreto e o agregado misto.

Os dois materiais produzidos são britados e não passam por nenhum tipo de segregação, o que acarreta em um material do tipo bica-corrída, ou seja, apresenta grãos de diversos tamanhos em sua composição, conforme pode ser observado na Figura 2. Para a utilização desse material foi realizada a padronização da granulometria através de peneiras normatizadas.

Figura 2 – Britagem de Agregado Reciclado de Concreto (ARC) no pátio da cooperativa



Fonte: O autor

Depois de padronizada a granulometria dos materiais foi feita uma caracterização física para a obtenção de parâmetros como a densidade e absorção de água, além da composição, a qual foi verificada a partir da separação visual e também por ensaio

espectrométrico com raios x, para que dessa maneira fosse possível discutir melhor os resultados obtidos por meio dos parâmetros de qualidade da água.

As amostras de agregado reciclado de RCD foram coletadas segundo os procedimentos descritos nas normas NBR NM 26 (2000). Após a coleta foi realizada a padronização da granulometria, utilizando três peneiras, sendo elas de abertura nominal igual a 12,5mm, 19mm e 25mm, conforme a NBR 7211 (2005). Foi realizado o peneiramento manual no ato da coleta do material, utilizando-se das peneiras mostradas na Figura 3 a) e o peneiramento mecânico após o material ser coletado, utilizando as peneiras e o agitador mecânico mostrados na Figura 3 b)

Figura 3 – Peneiras utilizadas na padronização dos agregados



Fonte: O autor

Realizado o peneiramento foram obtidas duas granulometrias distintas e uniformes para o agregado reciclado misto (ARM) e para o agregado reciclado de concreto (ARC). Uma granulometria composta por material mais grosseiro, que consiste no material retido na peneira de 19mm e passante na de 25mm, e outra composta pelo material retido na peneira de 12,5mm e passante na de 19mm. Observando-se a Figura 4 é possível visualizar as granulometrias que foram utilizadas na realização do presente trabalho (circuladas) bem como todas as outras granulometrias que compõem o agregado reciclado produzido na cooperativa.

Figura 4 – Frações componentes do agregado reciclado misto (ARM) produzido pela Cooperconcre



Fonte: O autor

Para os quatro materiais obtidos, ARC e ARM de ambas as granulometrias, foram realizados os ensaios de caracterização conforme o Quadro 1, sendo que para cada análise foram realizadas três repetições. Além dos materiais reciclados, também foi peneirado e caracterizado, seguindo os mesmos procedimentos, o agregado natural (AN), coletado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEPG.

Quadro 1 - Parâmetros e normas utilizadas na caracterização dos agregados

Parâmetro	Metodologia
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2003)
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2003)
Composição	NBR 15116 (ABNT, 2004)
Material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: O autor

Todos os ensaios de caracterização dos agregados foram feitos com amostras padronizadas segundo a NBR NM 27 (2001), que dispõe sobre a redução de amostras de campo para a realização de ensaios de laboratório. As amostras foram obtidas pela metodologia do quarteamento, conforme Figura 5.

Figura 5 – Quarteamento de amostras de ARM



Fonte: O autor

Durante o procedimento de quarteamento das amostras de agregado reciclado foi coletado o material fino, o qual foi passado pela peneira de abertura 0,075mm, e realizada a caracterização por meio de espectrometria de Raios X, no Complexo de Laboratórios Multi-Usuários (C-labmu/UEPG), em um equipamento da marca Rigaku, Modelo ZSX Primus II.

4.2 MATERIAIS PARA COBERTURA DOS AGREGADOS

Com base em dados da literatura a pesquisa já se partiu do pressuposto que os agregados provenientes de RCD apresentam alguns tipos de interações com o meio líquido que não são interessantes do ponto de vista da manutenção da qualidade da água (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2014; ENGELSEN *et al.*, 2012; GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018; KOSSON *et al.*, 2002; MIKAMI, 2016;).

Foram utilizados dois materiais de cobertura para os agregados reciclados, sendo eles a parafina e a emulsão asfáltica, ambos com o intuito de evitar o contato direto dos líquidos com o material granular.

Com todos os materiais definidos e alocados em recipientes individuais, as amostras foram submetidas a um contato com o meio líquido, seja água ou esgoto, por 24 horas para posteriores análises da solução resultante dessa interação.

4.2.1 Emulsão asfáltica

Inicialmente buscou-se um referencial normativo para que a mistura entre os materiais de cobertura e os agregados reciclados seguissem um procedimento padrão. Foram consultadas então algumas normas referentes à pavimentação para se obter embasamento para a utilização de emulsão asfáltica, sendo a principal delas a NBR 6300 (2009), que trata da adesividade de emulsão asfáltica em agregados graúdos. Infortunadamente as normas existentes não levam em conta as particularidades intrínsecas aos agregados reciclados, o que impossibilitou a determinação de algumas propriedades de misturas asfálticas.

Com a inviabilidade de aplicação de normas técnicas consolidadas, foram realizados ensaios preliminares por tentativa e erro a fim de determinar a quantidade de emulsão asfáltica necessária para o cobrimento dos agregados.

No laboratório de Pavimentação foram realizadas misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica, partindo de 5%, em massa, variando 1% até o teor final de 12% tanto para o agregado reciclado misto quanto para o agregado reciclado de concreto, conforme retratado na Figura 6 a) e Figura 6 b), onde aparecem as misturas com 9 e 12% de emulsão asfáltica, respectivamente.

Figura 6 – Agregado reciclado de concreto coberto com emulsão asfáltica



Fonte: O autor

Devido à alta porosidade observada nos agregados reciclados foi adotada à mistura uma quantidade prévia de água, denominada água de molhagem, a qual teve como objetivo preencher previamente os poros do material. A água de molhagem foi adicionada aos agregados antes da adição do material de cobertura, diminuindo assim o consumo de emulsão

asfáltica e desacelerando seu rompimento, fatores que possibilitaram o manuseio adequado para que fosse feita a mistura. O volume adotado para a molhagem foi de 70% do volume de vazios determinado em laboratório. A mistura dos agregados foi feita em temperatura ambiente, utilizando um recipiente de cerâmica, uma espátula e uma balança de massa para o controle das quantidades dos materiais aplicados, conforme representado na Figura 7. Imediatamente depois de concluído o processo de mistura foi realizado o acondicionamento dessas em seus respectivos recipientes suporte, como aparece na Figura 9.

Figura 7 – Realização da mistura de agregado reciclado e emulsão asfáltica



Fonte: O autor

A partir das tentativas realizadas foi definida a proporção de 9%, em massa, de emulsão asfáltica e água de molhagem equivalente a 70% do volume de vazios encontrado para cada material.

A emulsão asfáltica utilizada foi do tipo RM-1C, disponibilizada pela Stratura Petrobras e a mistura aconteceu em temperatura ambiente. Já com a mistura realizada e acondicionada, foi feita em cada mistura uma lavagem sistematizada utilizando-se três enxágues com 1L de água cada, as quais se procederam em um intervalo de 24h cada.

4.2.2 Parafina

Já se tratando da parafina não existe nenhum tipo de referencial normativo para a mistura com material granular, pois esse tipo de combinação não caracteriza um uso comum em nenhum tipo de atividade técnica.

Para a mistura de agregado de RCD com parafina foi preciso adotar um procedimento de mistura a quente, que consistiu no aquecimento do agregado a 70° C e posterior adição da parafina em lentilhas, com o cuidado de despejar a parafina aos poucos e mexendo sempre a mistura, conforme ilustrado na Figura 8, promovendo o derretimento e adesão da parafina na superfície do agregado.

Como nos testes preliminares notou-se que a quantidade de parafina necessária para o recobrimento dos agregados é menor, a proporção adotada para a emulsão asfáltica foi repetida para a parafina.

Figura 8 – Temperatura da mistura entre agregado reciclado misto e parafina



Fonte: O autor

Os mesmos 9%, em massa, de parafina foram utilizados para cobrir a superfície dos agregados. Ressalta-se que para essa mistura não foi utilizada água de molhagem, pois a mistura foi feita a quente e a parafina não é um material hidrossolúvel como a emulsão asfáltica.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

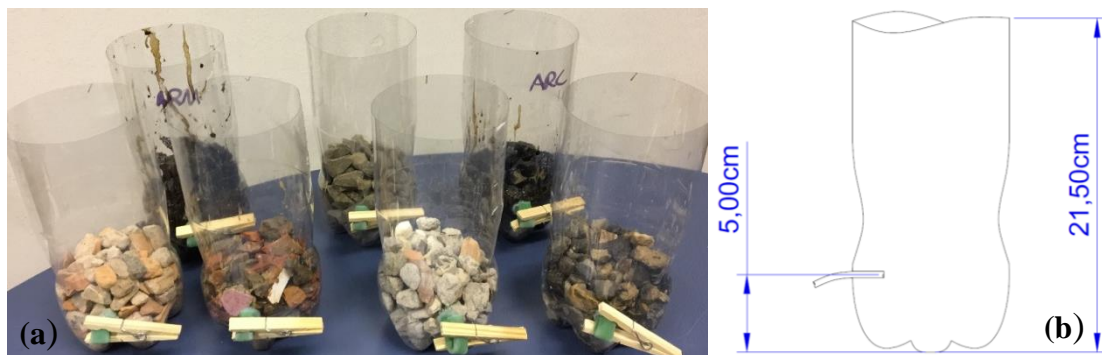
Como o foco consiste no estudo da influência do RCD em água de abastecimento e esgoto, foi idealizado um recipiente que possibilitou a interação e coleta de material para posteriores análises em laboratório.

Devido à ausência dos equipamentos descritos na NBR 10005 (2004), que trata da obtenção de líquido lixiviado de resíduos sólidos, e à utilização de materiais de cobertura sobre os agregados, o recipiente foi adaptado da metodologia aplicada por Mikami (2016), que, com base em uma normatização italiana, submeteu seu material de estudo ao contato

com o meio líquido, na proporção de um volume de agregado para cinco volumes de água, em vários intervalos de tempo.

Dessa forma foram utilizados recipientes plásticos de politereftalato de etileno, conforme Figura 9 (a), com capacidade de 2L, que após a adaptação ficaram com uma capacidade de aproximadamente 1,6L. Para facilitar o manuseio do líquido e possibilitar a inserção do material granular a parte superior de todos os recipientes eram abertos e foi posicionado um dreno a 5 cm do fundo, conforme apresentado na Figura 9 b).

Figura 9 – Recipientes suporte contendo agregados



Fonte: O autor

Para cada tratamento ensaiado foi confeccionado um recipiente suporte, evitando assim que um material exercesse influência sobre outro, os recipientes não foram reaproveitados.

Foi misturado um volume de agregado, com cobertura ou não, em cinco volumes de água tratada (sempre coletada da mesma torneira) ou efluente secundário. Apesar da proporção se dar em volume, a aferição das quantidades foi feita utilizando-se balança de massa, adotando para tal os valores de peso específico encontrados para cada tipo de material, descobertos a partir da metodologia descrita pela NBR NM 53.

Imediatamente após a adição do meio líquido aos agregados, os recipientes foram levados à incubadora, onde permaneceram por 24h sob temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. A incubadora consiste em um equipamento destinado a conservar a temperatura em seu interior, promovendo o aquecimento no caso de a temperatura ambiente apresentar-se menor do que a desejada ou o esfriamento quando a temperatura ambiente for superior à temperatura esperada. O interior do equipamento pode ser visualizado na Figura 10, bem como as amostras de agregados submersas em meio líquido.

Figura 10 – Recipientes suportes posicionados na incubadora, preenchidos com agregados e água



Fonte: O autor

Depois de decorrido o tempo de incubação a amostra líquida foi retirada dos recipientes para a realização dos ensaios de qualidade da água no Laboratório de Saneamento e Instalações Hidráulicas da UEPG, conforme metodologias descritas no Quadro 2. Ressalta-se que para cada análise foram realizadas quatro repetições.

Quadro 2 - Parâmetros e metodologias aplicadas na caracterização do líquido lixiviado

Parâmetro	Metodologia
Demanda Química de Oxigênio (DOO)	5220 D (APHA, 1998)
Nitrogênio amoniacal	4500-NH ₃ C (APHA, 1998)
Fósforo total	4500-P E (APHA, 1998)
Sulfato	4500-SO ₄ ⁺ (APHA, 1998)
pH	4500-H ⁺ (APHA, 1998)
Alcalinidade	2320 B (APHA, 1998)
Condutividade elétrica	2510 B (APHA, 1998)
Cálcio	3500-Ca B (APHA 1998)
Sólidos totais	2540 F (APHA, 1998)
Turbidez	2130 B (APHA, 1998)
Cor	2120 B (APHA, 1998)

Fonte: O autor

4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise da interação dos materiais de cobertura com os diferentes materiais estudados, foi desenhado um delineamento fatorial, ou seja, foram analisadas simultaneamente as particularidades ocasionadas em virtude da origem do agregado, podendo ele ser de concreto ou misto, bem como do material de cobertura, tendo sido ensaiadas amostras cobertas com parafina, emulsão asfáltica e também sem nenhuma cobertura, para duas granulometrias diferentes.

Como o foco da pesquisa concentra-se nos materiais de cobertura (parafina e emulsão asfáltica) e na composição do agregado reciclado (misto ou de concreto) os dados obtidos a partir de granulometrias de um mesmo tipo de agregado não foram considerados como fatores estatísticos, optando-se assim pela realização de análises separadas para ambas as granulometrias.

Tendo em vista a ideia central do trabalho que levanta a possibilidade de substituição do agregado natural em sistemas de tratamento de efluentes, como em estações de tratamento de esgoto residencial, foi ensaiado também um tratamento utilizando o agregado natural, também em duas granulometrias, e sem cobertura para fins de comparação direta, o qual foi aderido ao delineamento e analisado como um tratamento adicional.

A água utilizada para a realização dos ensaios foi coletada sempre da mesma torneira, localizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEPG e o esgoto secundário utilizado para a realização dos ensaios foi coletado na saída de um Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado (RALF), localizado na ETE Verde.

Para denominar os tratamentos realizados foi utilizada uma nomenclatura composta por três letras e um algarismo. A primeira letra representa o meio aquoso em que a mistura foi realizada, podendo ser “A”, que representa água ou “E”, que representa esgoto secundário. A segunda letra faz referência à composição do agregado, onde aparecem “M” para o agregado reciclado misto, “C” para o agregado reciclado de concreto e “N” para o agregado natural.

A terceira letra da composição da sigla trata do material de cobertura, podendo ser “A”, para a emulsão asfáltica, “P” para a parafina e “S”, que representa os casos em que os materiais granulares foram submetidos ao meio aquoso sem nenhum tipo de cobertura.

Por fim, o algarismo faz referência à granulometria dos agregados, sendo “1” a granulometria composta por grãos retidos na peneira de abertura igual a 12,5 mm e passantes na peneira com abertura de 19 mm, já o “2” remete à granulometria composta por grãos retidos na peneira com abertura de 19 mm e passantes na de 25 mm.

Os Quadros 3 e 4 apresentam de maneira condensada as nomenclaturas adotadas em cada tratamento ensaiado.

Quadro 3 - Nomenclaturas adotadas para os tratamentos estatísticos em que foi utilizado água

ÁGUA	agregado reciclado	agregado reciclado	agregado
cobertura com emulsão asfáltica	AMA1	ACA1	-
	AMA2	ACA2	-
cobertura com parafina	AMP1	ACP1	-
	AMP2	ACP2	-
sem cobertura	AMS1	ACS1	ANS1
	AMS2	ACS2	ANS2

Fonte: O autor

Quadro 4 - Nomenclaturas adotadas para os tratamentos estatísticos em que foi utilizado esgoto secundário

ESGOTO	agregado reciclado	agregado reciclado de	agregado
cobertura com emulsão asfáltica	EMA1	ECA1	-
	EMA2	ECA2	-
cobertura com parafina	EMP1	ECP1	-
	EMP2	ECP2	-
sem cobertura	EMS1	ECS1	ENS1
	EMS2	ECS2	ENS2

Fonte: O autor

Todos os agregados, cobertos ou não, bem como suas respectivas repetições foram alocados em recipientes individuais para serem posteriormente submetidos ao contato com o meio aquoso, conforme pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Agregados utilizados nos ensaios estatísticos, em quatro réplicas.



Fonte: O autor

Da esquerda para a direita e de cima para baixo, na Figura 11, aparecem os seguintes materiais, conforme nomenclatura adotada: _CS1, _NS1, _MS1, _NS2, _CA2, _CA1, _CS2, _CP1, _MS2, _MP1, _MA2, _MP2, _CP2 e _MA1.

Além de todos os tratamentos ensaiados foram ainda submetidos ao mesmo procedimento experimental recipientes contendo somente água e somente esgoto. Essas amostras foram ensaiadas para efeitos de comparação visual e numérica dos resultados.

Para cada parâmetro elencado no Quadro 2 e para cada tratamento representado nos Quadros 3 e 4 foi realizada uma análise estatística, ou seja, foram analisados separadamente 42 conjuntos de dados. Ficaram de fora as análises estatísticas e os resultados obtidos para nitrogênio amoniacal referentes aos tratamentos que levaram água como meio líquido, pois não foi detectado nitrogênio nessas amostras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em um primeiro momento são expostos e discutidos os resultados referentes à caracterização dos agregados aplicados na pesquisa. Esses resultados serviram de subsídio para questões práticas e operacionais do experimento, como a utilização do peso específico para a realização das dosagens, por exemplo.

Além das questões práticas, a caracterização dos agregados também serve para complementar a discussão dos resultados obtidos com as análises dos líquidos lixiviados, já que são esses agregados, além dos materiais de cobertura, os responsáveis pelas alterações nas características do lixiviado.

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Avaliando os ensaios realizados com o material granular foi possível observar nitidamente a diferença das propriedades entre os agregados reciclados misto, de concreto e o agregado natural, conforme dados explicitados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos agregados reciclados e natural

AGREGADO	Massa Unitária (kg/dm ³)	Volume de Vazios (%)	Absorção (%)	Massa Esp. Aparente (kg/m ³)	Material Pulverulento (%)
N1	1,48	49,64	0,50	3,04	0,47
N2	1,51	48,73	0,22	3,02	0,46
M1	0,98	49,75	11,44	2,56	1,79
M2	0,93	48,18	13,42	2,43	1,79
C1	1,20	48,13	6,14	2,75	2,43
C2	1,08	51,67	5,94	2,27	1,74

Fonte: O autor

Nota: Foi adotada a mesma nomenclatura referente aos tratamentos para descrever os agregados, no entanto, como não há nem cobertura e nem meio líquido, a sigla ficou composta por somente uma letra e um algarismo.

O agregado natural apresenta maior massa unitária e maior massa específica aparente com relação aos agregados reciclados. Se tratando de absorção e material pulverulento, os agregados reciclados apresentam valores bastante superiores, conforme explicitado por Galvín *et al.* (2014). Já para volume de vazios o resultado obtido foi semelhante para todos os agregados, o que era esperado, tendo em vista que todos os agregados tiveram sua granulometria uniformizada após o peneiramento.

Os expressivos valores de absorção observados no agregado reciclado misto revelam a grande porosidade existente na cerâmica vermelha, situação que vai de acordo com o que foi explicitado por Angulo (2013), que destaca essa porosidade como sendo uma das principais características deletérias na utilização do agregado reciclado na fabricação de concretos.

Outro fator que foi evidenciado após a caracterização dos agregados consiste nas maiores massas específica e unitária constatadas no agregado reciclado de concreto, comparando as 2 granulometrias. O agregado de menor tamanho apresentou os maiores valores. Tal propriedade é atribuída à maior proporção de fragmentos de agregado natural presentes no agregado que se mostrou mais denso.

Um fator particular de suma importância consiste no fato de que a maioria das normas para caracterização de agregados foi elaborada tendo em vista a utilização de agregados provenientes de rochas naturais. Tal fato acarreta em alguns fatores de imprecisão quando essas normas são aplicadas na caracterização de agregados reciclados. Um caso em que foi evidenciada essa incompatibilidade se deu com a análise de material pulverulento dos agregados reciclados, cuja metodologia propõe uma agitação vigorosa das amostras objetivando a remoção das partículas de pó.

No entanto, os agregados reciclados apresentam grande friabilidade, portanto com a agitação vigorosa das amostras o atrito entre os fragmentos do material gera mais material pulverulento, criando uma situação em que foi preciso adotar um critério diferente para o término do ensaio. Enquanto a NBR NM 46 (2003) sugere que o ensaio seja finalizado quando a água de lavagem do agregado não apresente diferença visual em relação a água limpa, a metodologia adotada foi em função do número de lavagens, onde foi adotada a execução de 15 lavagens para então proceder com a sequência da análise para a aferição do material pulverulento.

A friabilidade do material pode ser confirmada pela observação da Figura 12, na qual se pode verificar, além da grande quantidade de material fino, a presença de grãos maiores, cuja origem é atribuída ao atrito do material durante a agitação, tendo em vista que essa parcela já havia sido removida através do peneiramento.

À esquerda, na Figura 12, observa-se a parcela resultante do ensaio de material pulverulento realizado com o agregado reciclado de concreto. À direita observa-se a parcela resultante do ensaio de material pulverulento realizado com o agregado reciclado misto.

A friabilidade observada nos agregados reciclados consiste em uma propriedade relevante a ser considerada antes da aplicação desse tipo de material, uma vez que pode representar uma vida útil curta em caso de usos que promovam altos níveis de agitação, como seria o caso de um filtro ascendente em sistemas de tratamento de água, por exemplo.

Cita-se ainda que o agregado reciclado de concreto de menor granulometria apresentou a maior porcentagem de material pulverulento, o que pode ser explicado pela composição desse material, a qual apresenta predominância de fragmentos compostos por pasta de cimento.

Figura 12 – Fração obtida no ensaio de material pulverulento



Fonte: O autor

Por meio da Tabela 2, organizada a partir dos preceitos descritos na NBR 15116 (2004), é possível melhorar a compreensão acerca da constituição dos agregados utilizados na pesquisa. A NBR 15116 divide os grãos dos agregados reciclados em quatro grupos. O grupo 1 consiste em fragmentos compostos por pasta de cimento representando 50% ou mais de seu volume. O grupo 2 representa os fragmentos compostos de rocha em mais da metade de seu volume. O grupo 3 é formado por fragmentos cuja composição apresenta-se em 50% ou mais de seu volume representado por cerâmica vermelha. O grupo 4 consiste no que a norma chama de impurezas, onde se enquadra todo tipo de material que não é abrangido por nenhum dos três grupos anteriores.

Tabela 2 – Composição dos agregados reciclados segundo NBR 15116

AGREGADO	grupo 1 (%)	grupo 2 (%)	grupo 3 (%)	grupo 4 (%)
MISTO 1	42,79	18,70	35,72	2,78
MISTO 2	46,66	12,61	37,96	2,77
CONCRETO 1	56,10	40,41	2,43	1,06
CONCRETO 2	79,35	17,04	2,63	0,99

Fonte: O autor

As porcentagens descritas na Tabela 2 podem ser visualmente contextualizadas na Figura 13, que mostra os quatro grupos descritos pela NBR 15116 (2004) referentes a uma amostra de agregado reciclado misto.

Figura 13 – Frações obtidas na análise visual da composição do agregado reciclado misto



Fonte: O autor

Ao analisar os dados referentes ao grupo 4, que representa as impurezas encontradas no agregado reciclado, foi constatada uma maior quantidade de materiais indesejados no ARM. Dentre esses materiais foram encontrados fragmentos de vidro, fibrocimento, gesso, madeira, cerâmica vitrificada, torrões de terra, plástico e outros contaminantes. Percebe-se, portanto, que o controle de qualidade aplicado na fabricação do agregado reciclado misto é menos rigoroso em relação ao agregado reciclado de concreto.

Observou-se que o ARC fabricado e disponibilizado pela Cooperconcre atende às exigências normativas, tendo em vista que o material apresentou porcentual relativo à soma dos grãos do grupo 1 e do grupo 2 maior que 90%.

Ainda sobre o ARC, observou-se que o agregado peneirado na granulometria menor apresentou uma proporção maior de grãos pertencentes ao grupo 2, ou seja, fragmentos compostos em sua maior parte por rocha natural.

O ARC de granulometria maior é composto por mais fragmentos onde predomina a pasta de cimento. Essa situação é decorrente das propriedades do concreto, pois a pasta de cimento apresenta menor resistência mecânica em relação à rocha natural. Ressalta-se também a fragilidade formada na interface entre o agregado e a pasta de cimento, portanto no momento da britagem os fragmentos de rocha tendem a se separar da pasta de cimento e manter seu tamanho semelhante ao que possuía quando foi aplicado previamente ao concreto.

5.2 COMPONENTES ÓXIDOS DOS AGREGADOS POR FRX

A partir da análise de FRX obtiveram-se os elementos químicos componentes dos agregados reciclados utilizados, representados na forma de óxidos e suas respectivas porcentagens, conforme Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Óxidos componentes do agregado reciclado de concreto

ARC									
SiO ₂	CO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃	ZnO
89,70	7,52	0,81	0,71	0,65	0,24	0,17	0,10	0,06	0,02

Fonte: O autor

Tabela 4 – Óxidos componentes do agregado reciclado misto

ARM							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CO ₂	Na ₂ O	MgO	TiO ₂
45,60	16,90	12,30	9,45	5,76	3,35	3,00	1,84
K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	ZnO	SrO	CuO	ZrO ₂
0,96	0,35	0,20	0,15	0,06	0,04	0,03	0,02

Fonte: O autor

Observando-se os óxidos presentes nos dois agregados reciclados analisados constata-se a predominância do óxido de silício (SiO₂), característico dos grãos de areia e argilas, que compõem os fragmentos de alvenaria. A composição encontrada condiz com a caracterização realizada por Lasso *et al.* (2014).

O agregado reciclado de concreto possui no máximo 10%, em massa, conforme estabelece a NBR 15116 (2004), de grãos de cerâmica vermelha. Essa presença da cerâmica

vermelha reflete na proporção dos óxidos de alumínio (Al_2O_3), férrico (Fe_2O_3), de manganês (MgO) e de sódio (Na_2O), sendo que todos eles são característicos de argilas vermelhas. Para o ARM encontram-se maiores proporções desses óxidos secundários em relação ao ARC.

Já os óxidos acusados somente na caracterização do ARM são atribuídos à impurezas associadas à alta variabilidade desse material, tendo em vista que seu controle de qualidade é mais simples que o controle aplicado na fabricação do ARC, acarretando na presença de materiais diversos oriundos de todo tipo de construção e demolição.

Os resultados obtidos por meio do ensaio de FRX para o agregado reciclado de cimento assemelham-se a resultados encontrados na literatura, como os obtidos por Lasso *et al.* (2014) e por Silva (2014), porém em ambos os trabalhos referenciados foram relatadas menores proporções de sílica e conseqüente maior proporção dos óxidos secundários. A diferença verificada pode ser atribuída à granulometria do agregado analisado, uma vez que as dimensões dos grânulos favorecem a predominância de fragmentos de rocha. Ainda se cita a intemperização do agregado, uma vez que o tempo em que o material esteve disponível no pátio da Cooperconcre é indeterminado.

A composição do agregado reciclado misto assemelha-se à composição apresentada por Mikami (2016), contudo, mais uma vez, a porcentagem obtida de CaO mostrou-se menor que a encontrada na literatura, o que aponta para uma degradação das pastas de cal e cimento, responsáveis pela presença de cálcio nos agregados.

Outro fator que se constata em virtude da análise dos resultados obtidos pela espectrometria por fluorescência de raios-x consiste na presença de matéria orgânica, caracterizada pelo óxido de carbono (CO_2) e pelo óxido sulfúrico (SO_3), presentes em ambos os agregados reciclados. Tal presença de matéria orgânica pode ser decorrente de fragmentos de madeira presentes no RCD ou da contaminação externa durante o transporte, para o qual foram utilizados sacos de grãos.

5.3 ÁGUA

Conhecendo os agregados e suas propriedades, parte-se para a análise dos resultados obtidos por meio dos ensaios realizados com os líquidos lixiviados.

Primeiramente são apresentados e discutidos os resultados obtidos de maneira numérica e gráfica para estabelecer uma visualização ampla dos dados obtidos, sem entrar no mérito estatístico, que é abordado na sequência.

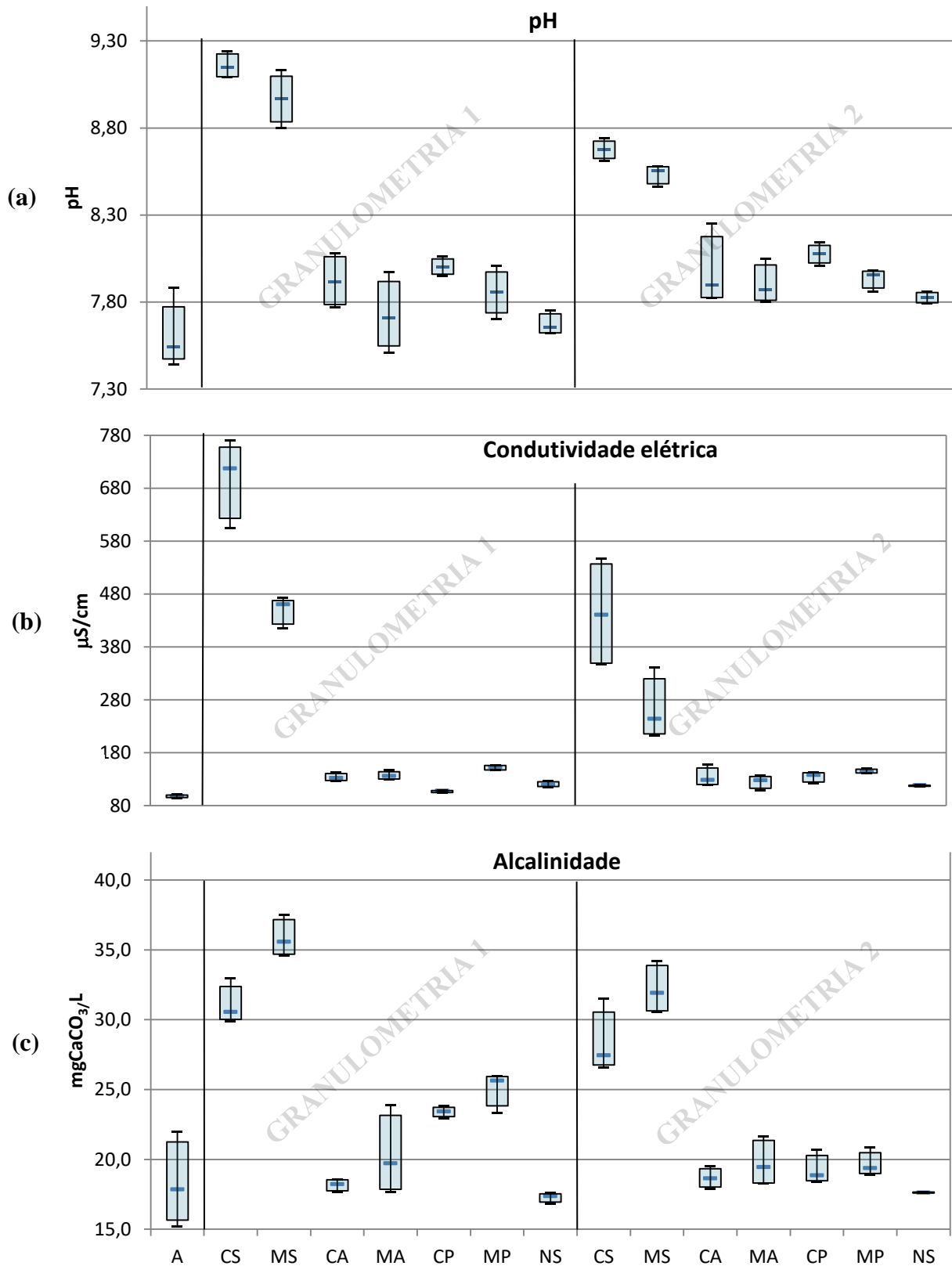
Os resultados apresentados no Gráfico 1 (a) referentes aos resultados de pH do lixiviado com água mostram que tanto o agregado reciclado misto quanto o agregado reciclado de concreto apresentaram um aumento expressivo em seu valor no período de 24 horas, indicando a liberação de íons hidroxila, para ambas as granulometrias, o que vai de acordo com os resultados reportados por Butera; Christensen e Astrup (2014), os quais revelam um grande aumento no pH em lixiviados de RCD. Observa-se também que o agregado natural não acarreta em aumento tão significativo do pH e que a parafina e a emulsão asfáltica, usadas como material de cobertura, são eficientes em conter a liberação de íons na água.

Engelsen *et al.* (2012) também retratam valores altos de pH em um momento inicial, porém com uma análise ao longo do tempo constataram que o pH tende a baixar e estabilizar com o passar dos anos, fato atribuído à hidrólise dos compostos presentes nos agregados, causando a liberação de íons hidroxila e íons metálicos.

A condutividade elétrica sofreu um aumento enorme em decorrência do contato da água com os agregados reciclados sem nenhuma cobertura, de acordo com o Gráfico 1 (b).

Tratando-se do parâmetro alcalinidade, foi possível observar um aumento nos valores nos ensaios realizados com os agregados desprovidos de material de cobertura e também nos agregados de granulometria menor que foram cobertos com parafina, conforme Gráfico 1 (c). Foi possível notar também um maior acréscimo nas amostras sem cobertura, tanto misto como concreto, referentes à granulometria mais fina.

Gráfico 1 – pH, condutividade elétrica e alcalinidade no lixiviado de água

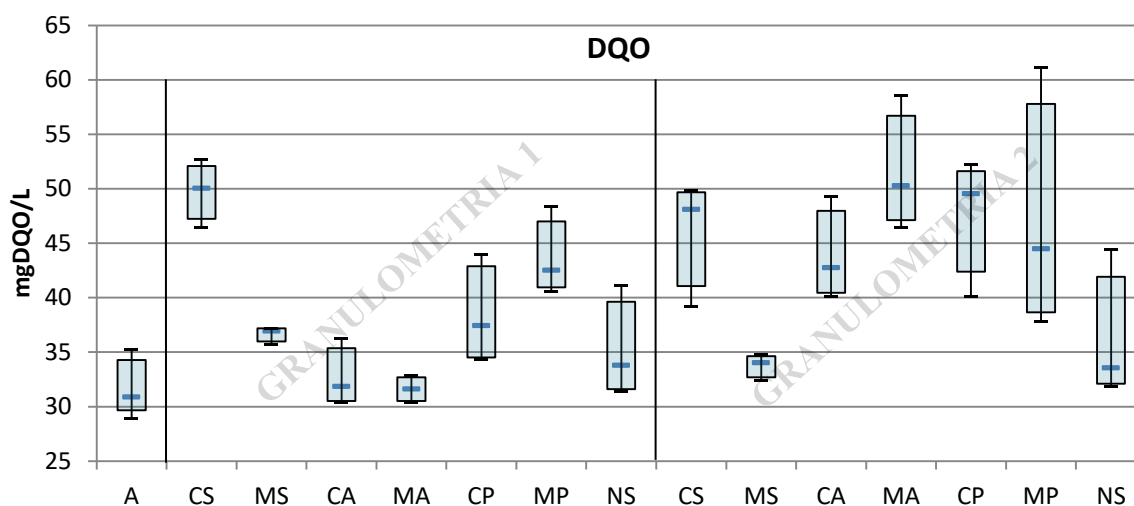


Fonte: O autor

Notas: A: água potável; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Os resultados referentes à DQO do lixiviado proveniente da água em contato com os materiais testados se mostraram pouco conclusivos. No entanto, pôde-se observar, a partir do Gráfico 2, que o agregado reciclado de concreto apresentou uma demanda química de oxigênio maior, em relação ao agregado reciclado misto quando desprovidos de cobertura.

Gráfico 2 – DQO no lixiviado de água



Fonte: O autor

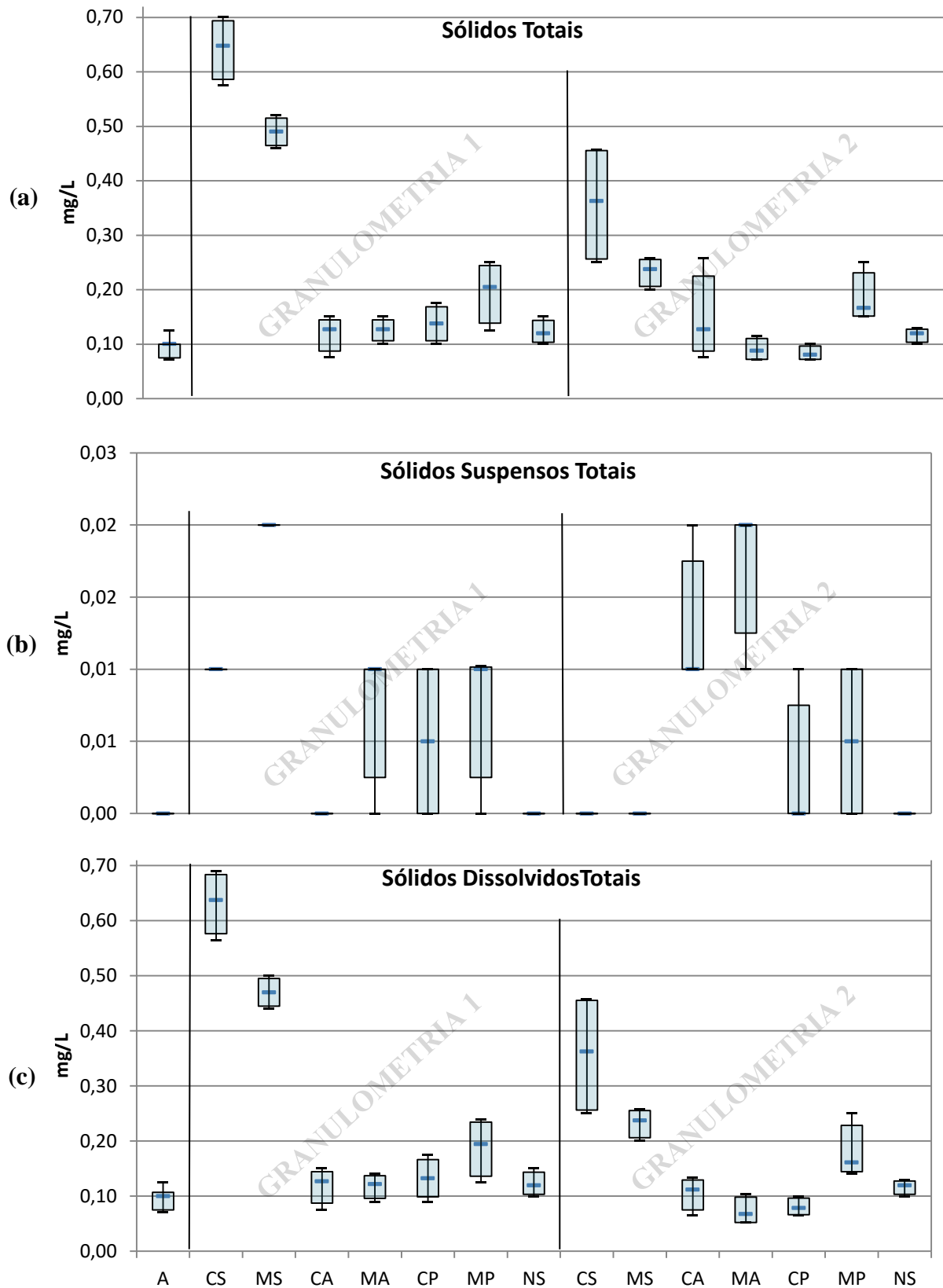
Notas: A: água potável; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Com relação aos tratamentos em que foi usada a parafina como material de cobertura houve uma grande variabilidade nos resultados das repetições, dentro dos mesmos tratamentos.

Quando se observa o Gráfico 3 (a), os valores obtidos com relação aos sólidos totais, novamente os tratamentos em que foram utilizados os agregados reciclados sem nenhum material de cobertura apresentaram o maior acréscimo e, dentro desses, o tratamento que apresentou a maior concentração de sólidos totais foi o agregado reciclado de concreto. O aumento da concentração de sólidos totais está ligado com a grande quantidade de material pulverulento presente nos dois tipos de agregado reciclado, predominantemente na granulometria mais fina.

Se tratando de sólidos suspensos totais os valores obtidos, mostrados no Gráfico 3 (b), foram inconclusivos, devido à acurácia do método que revela concentrações extremamente baixas em todos os tratamentos, impossibilitando, inclusive, a aplicação da mesma estratégia de análise estatística utilizada para as outras variáveis.

Gráfico 3 – Sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais no lixiviado de água



Fonte: O autor

Notas: A: água potável; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Como a concentração de sólidos dissolvidos consiste na concentração de sólidos totais subtraída da concentração de sólidos suspensos, os valores obtidos assemelham-se em todos os sentidos aos valores de sólidos totais, conforme explicitado no Gráfico 3 (c).

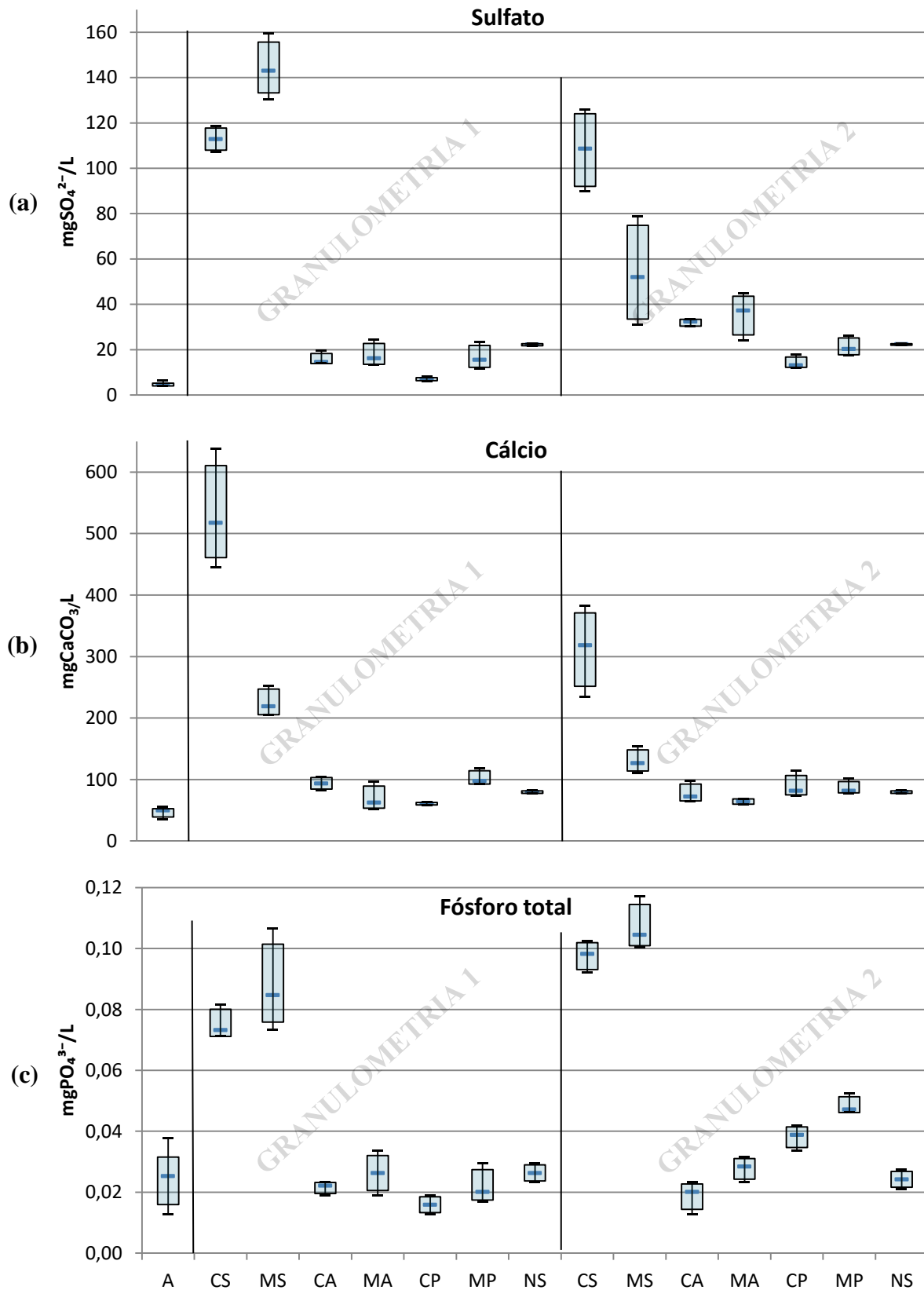
Ao analisar a concentração do íon sulfato presente no lixiviado foi possível constatar um aumento de concentração em todos os tratamentos, sendo esse aumento mais expressivo no lixiviado proveniente dos agregados reciclados, o que pode ser visualizado com auxílio do Gráfico 4 (a). Para os tratamentos nos quais se utilizaram materiais de cobertura nos agregados reciclados, o aumento na concentração de sulfato foi contido.

Quanto aos tratamentos de mesmo material e granulometrias diferentes, constatou-se que o agregado reciclado misto de granulometria mais fina apresentou concentração muito superior de sulfato, o que pode ter sido ocasionado pela maior presença de fragmentos de gesso, que geralmente se manifestam em granulometrias menores, o que vai de acordo com os resultados obtidos por Barbudo *et al.* (2012), que atribuem a lixiviação do sulfato à presença de material cerâmico e gesso nos agregados reciclados.

Já nos casos em que se usou a emulsão asfáltica como material de cobertura foram constatadas maiores concentrações de sulfato nos tratamentos referentes à granulometria mais grossa, levando ao raciocínio de que o processo de cura da emulsão asfáltica em contato com o agregado reciclado é afetado pela granulometria do mesmo, sendo os materiais de granulometria mais fina mais apropriados para essa mistura.

Os resultados obtidos referentes aos teores de cálcio revelaram que os materiais de cobertura são eficientes para o bloqueio da liberação desse elemento, tendo em vista que os valores obtidos nos tratamentos em que o agregado reciclado recebeu algum tipo de cobertura se assemelham aos valores obtidos no lixiviado proveniente do agregado natural, que por sua vez aproxima-se dos valores encontrados na água tratada proveniente da rede de distribuição municipal. Foi constatado um aumento representativo nas concentrações de cálcio nos lixiviados provenientes do agregado reciclado de concreto, principalmente o de granulometria mais fina, conforme exposto no Gráfico 4 (b).

Gráfico 4 – Sulfato, cálcio e fósforo total no lixiviado de água



Fonte: O autor

Notas: A: água potável; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

O agregado reciclado misto também apresentou uma grande liberação de cálcio, também predominantemente no tratamento referente à granulometria mais fina, contudo o acréscimo foi consideravelmente menos expressivo em relação ao agregado reciclado de concreto.

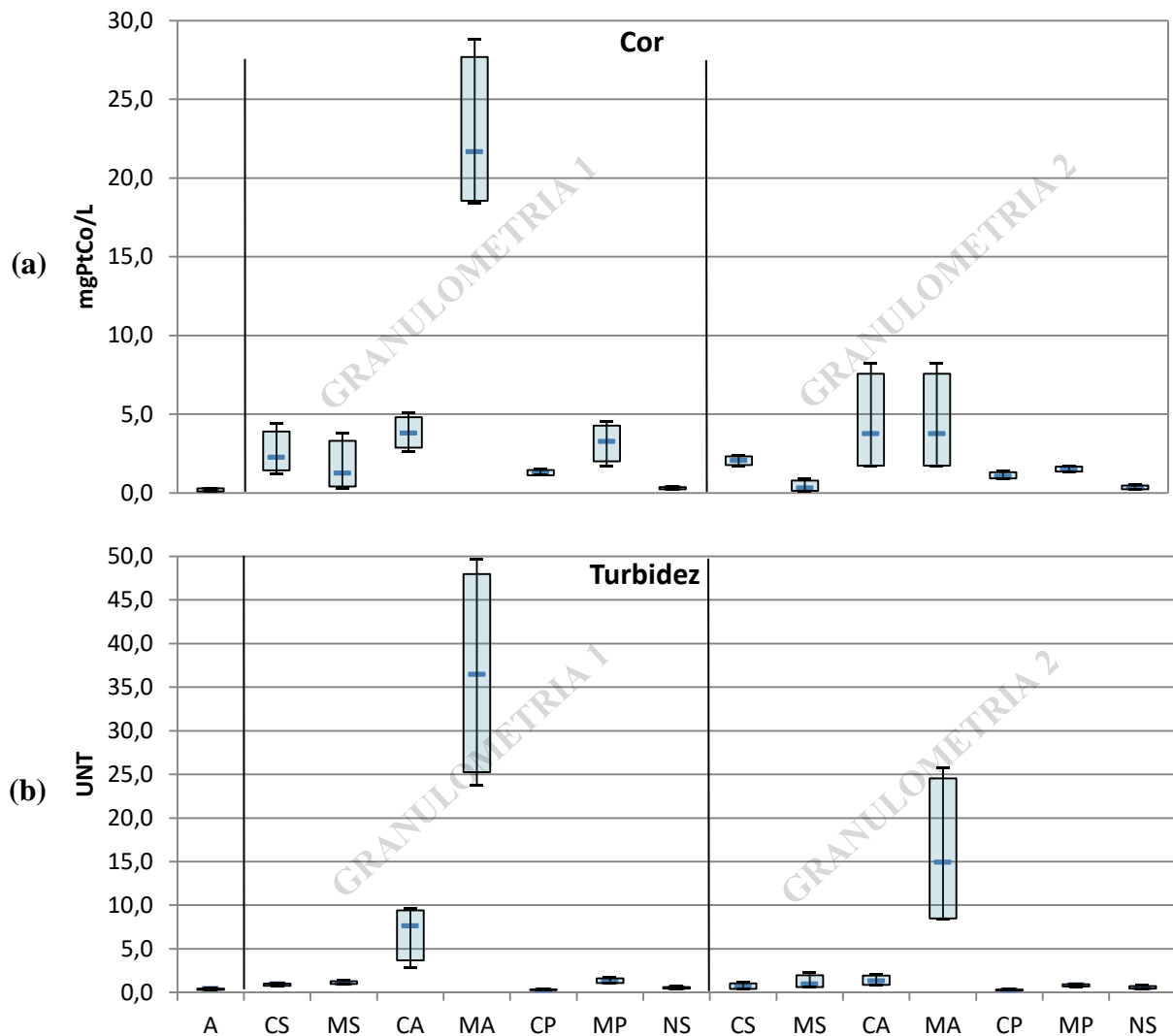
Os resultados referentes à quantidade de fósforo total no lixiviado revelam a boa capacidade dos materiais de cobertura aplicados na contenção de contaminação para esse íon. Apesar disso, a combinação dos agregados reciclados, misto e de concreto, de granulometria mais grossa, com a parafina mostrou uma fragilidade, pois revelou um acréscimo nos teores de fósforo total, de acordo com o explicitado por meio do Gráfico 4 (c). Mesmo com uma contaminação mais expressiva ao observar os valores retratados para os agregados reciclados sem nenhuma cobertura, a concentração de fósforo se mostrou baixa, revelando um parâmetro em que a cobertura é eficiente.

Ao analisar o comportamento dos materiais testados em relação à cor constatou-se um aumento incompatível, no valor do agregado reciclado misto, de granulometria mais fina, coberto com emulsão asfáltica, que pode ser visualizado no Gráfico 5 (a). A análise desse resultado aponta para uma deficiência na metodologia adotada com relação à mistura da emulsão asfáltica com o agregado, o que por sua vez remete a um cuidado redobrado com o material asfáltico e a maiores estudos sobre a sua relação com agregados de granulometria uniforme.

Os agregados que formam os outros tratamentos também apresentaram um aumento de cor, exceto os agregados naturais e o agregado reciclado misto de granulometria mais grossa. Esse resultado aponta para uma variabilidade grande da composição do RCD, tendo em vista que o mesmo material em granulometrias diferentes pode apresentar comportamentos distintos.

Outra peculiaridade relacionada à cor do lixiviado apresentou-se no caso do agregado reciclado misto de granulometria mais fina coberto com parafina, cujos valores encontrados superaram os valores indicados para o mesmo material sem nenhuma cobertura, resultado que leva a crer que houve um desprendimento de parafina no lixiviado, alterando as leituras realizadas com o colorímetro.

Gráfico 5 — Cor e turbidez no lixiviado de água



Fonte: O autor

Notas: A: água potável; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Analisando-se a turbidez dos lixiviados remete-se, novamente, à necessidade de maiores estudos em relação à mistura de agregado reciclado com emulsão asfáltica. Os resultados obtidos para os agregados reciclados mistos cobertos com emulsão asfáltica destoam dos demais resultados obtidos para o restante dos tratamentos, indicando uma cura mais lenta, conforme se vê no Gráfico 5 (b). Por sua vez, o agregado reciclado de concreto coberto com emulsão asfáltica, mostrou resultados semelhantes a outros tratamentos em que o asfalto faz-se ausente, isso para a granulometria mais grossa. Já com uma granulometria mais fina os valores de turbidez apresentaram bastante acima da média, levantando mais uma vez a questão da variabilidade dos agregados reciclados e o cuidado em relação à sua mistura com emulsão asfáltica.

A cobertura com parafina, ao contrário da cobertura asfáltica, revelou valores baixos de turbidez, especialmente quando aplicada sobre o agregado reciclado de concreto, tratamento que revelou valores de menores que os demais. Já o agregado reciclado misto coberto com parafina apresentou valores semelhantes aos ensaios realizados com o lixiviado dos materiais sem nenhuma cobertura, o que aponta para uma melhor integração da parafina com o concreto.

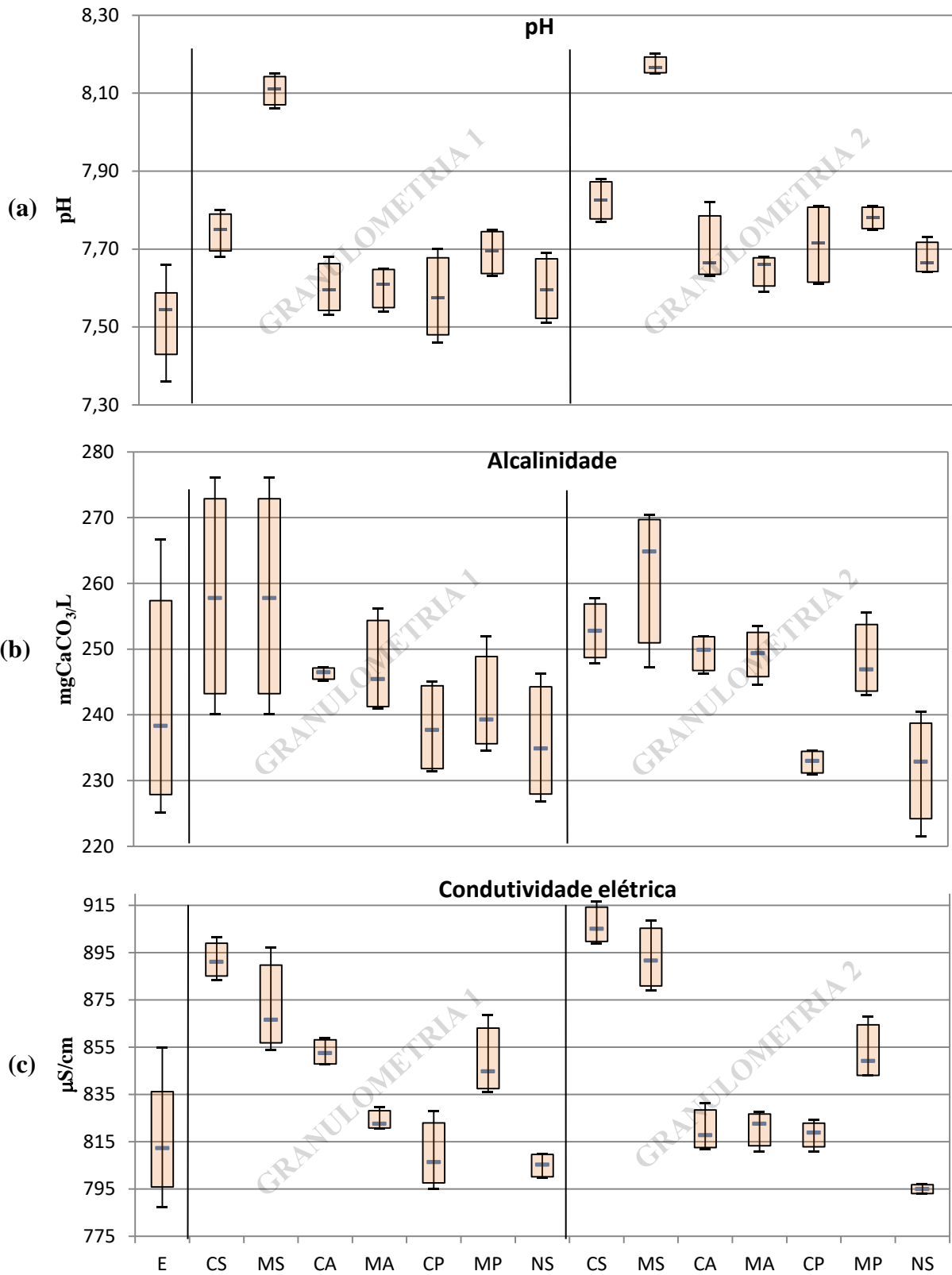
5.4 ESGOTO SECUNDÁRIO

Ao observar-se os dados obtidos em relação ao pH do efluente de RALF e o pH dos lixiviados é possível constatar que os materiais de recobrimento se mostraram capazes de conter o aumento do pH decorrente do contato com os agregados reciclados, conforme apresentado no Gráfico 6 (a). Os materiais recobertos com parafina, no entanto, apresentaram menor capacidade de manter o pH estável. Os tratamentos executados com os agregados reciclados sem nenhum tipo de cobertura apresentaram o aumento mais expressivo no valor de pH, especialmente o agregado reciclado misto, aumento esse relacionado à grande quantidade de cerâmica presente no material.

Avaliando as análises de alcalinidade, das amostras de lixiviado proveniente de efluente pós RALF, percebeu-se que as amostras que mais sofreram um aumento foram as amostras submetidas ao contato com agregado reciclado sem nenhum tipo de recobrimento, de acordo com os dados mostrados no Gráfico 6 (b). Apesar dos valores de alcalinidade dos tratamentos em que os agregados foram recobertos serem mais baixos, a emulsão asfáltica aparenta ser ligeiramente menos eficiente em evitar esse aumento no lixiviado.

Além das observações decorrentes da análise das médias, pôde-se observar, ao avaliar a alcalinidade, um enorme desvio padrão entre as repetições de amostras dentro de um mesmo tratamento, uma vez que a amplitude das barras representadas nos gráficos corresponde à variação entre os valores obtidos nos ensaios. Esse efeito pode ser atribuído à grande variabilidade encontrada na composição dos RCD, tendo em vista toda a gama de fragmentos que compõem o agregado reciclado.

Gráfico 6 – pH, alcalinidade e condutividade elétrica no lixiviado de esgoto



Fonte: O autor

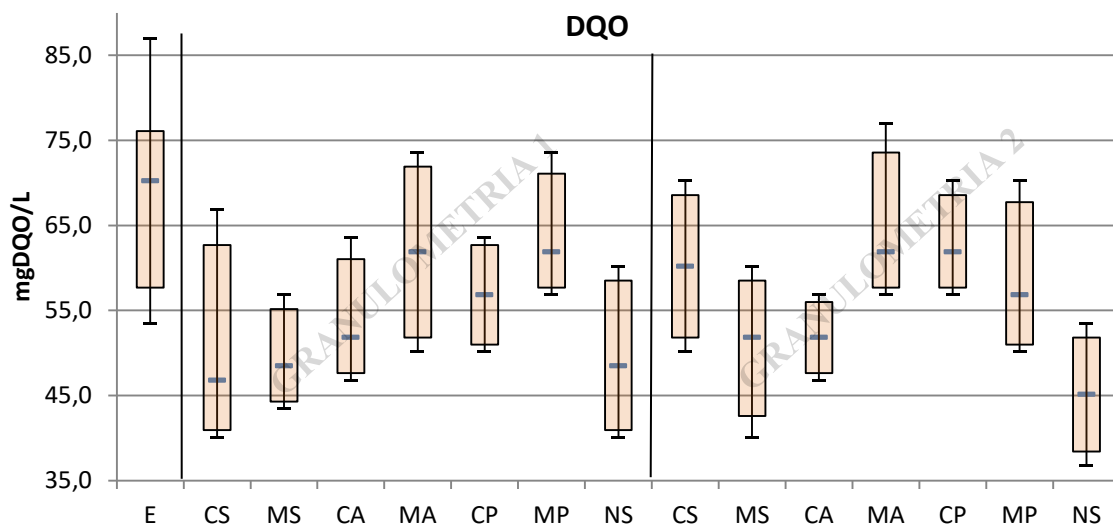
Notas: E: esgoto secundário; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Quando se trata da condutividade elétrica do lixiviado proveniente do efluente, de acordo com o Gráfico 6 (c), os resultados revelam o efeito ionizante dos agregados reciclados. Conforme explicitado no Gráfico 6 observa-se que a emulsão asfáltica e a parafina, utilizadas como materiais de cobertura mostram-se um grande potencial em conter a liberação de íons no meio líquido. A afirmação de que os materiais de cobertura aplicados são eficientes em evitar o aumento de condutividade elétrica não pode ser feita devido aos resultados observados em três tratamentos, sendo eles os que combinam agregado reciclado misto com parafina e o que combina agregado reciclado de concreto de menor granulometria com emulsão asfáltica.

Essa discrepância pode ser atribuída a problemas com o preparo das misturas, tendo em vista que o uso da emulsão demanda de um processo de umidificação e cura adequadas, já a mistura da parafina exige o aquecimento do material em uma faixa adequada de temperatura, que pode sofrer prejuízos em caso de temperatura ambiente baixa.

A avaliação dos resultados obtidos a partir da análise de DQO revela um efeito importante dos materiais granulares, que é a capacidade de redução dos agentes consumidores de oxigênio presentes nos efluentes. Para todos os tratamentos houve redução nos valores de DQO, o que pode ser constatado pelo Gráfico 7.

Gráfico 7 – DQO no lixiviado de esgoto



Fonte: O autor

Notas: E: esgoto secundário; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

A diminuição dos valores de DQO pode ser atribuída à adsorção, fenômeno estudado por Ali e Gupta (2007), que citam a possibilidade de aplicação de materiais alternativos para a promoção da adsorção, como cinza volante e bauxita.

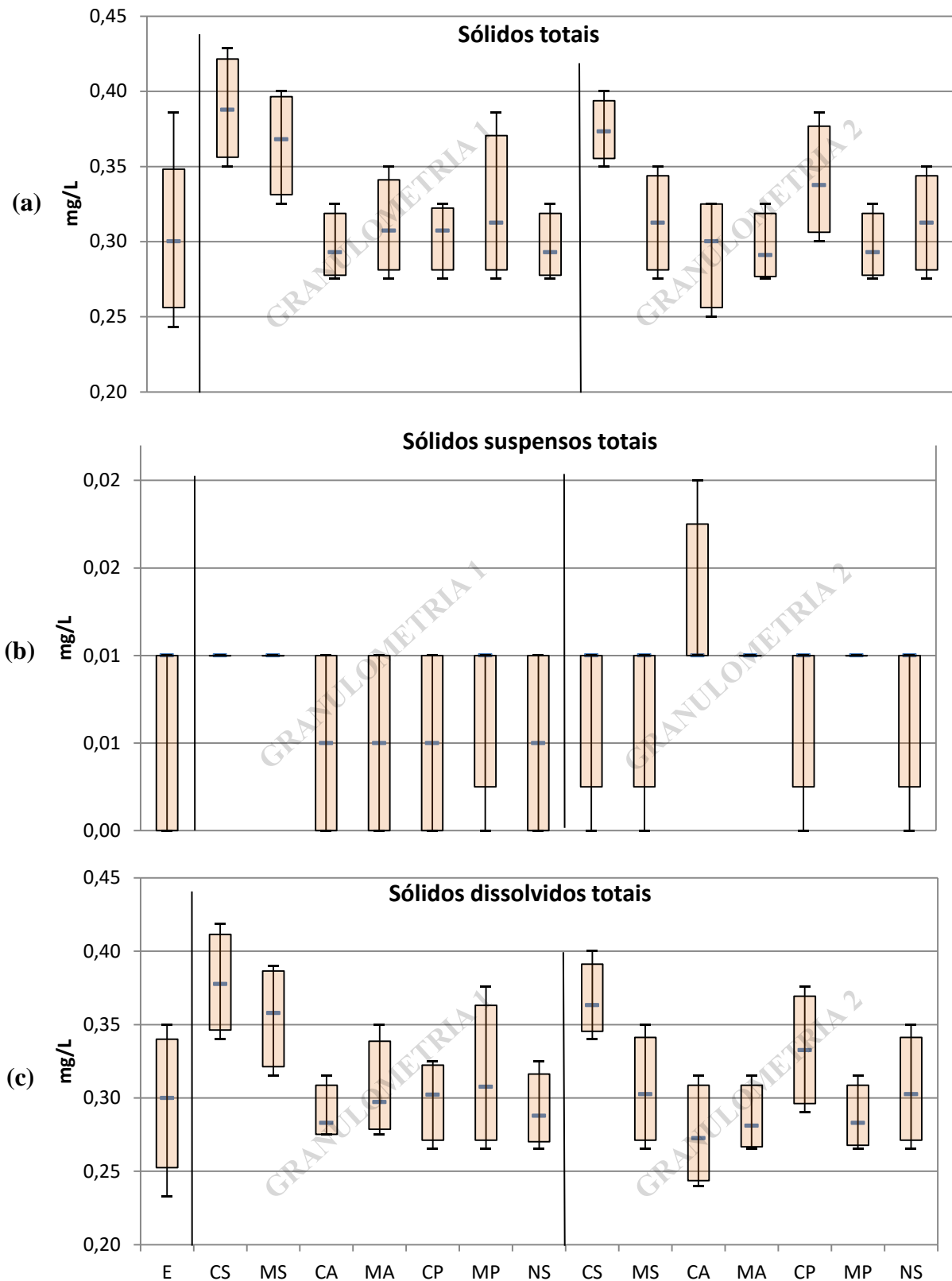
Apesar de todos os tratamentos terem resultado em uma diminuição de DQO, o maior decréscimo foi observado quando houve utilização do agregado natural, o que pode ser atribuído à menor reatividade do material rochoso.

Partindo da análise da concentração de sólidos totais presente nas amostras foi possível identificar pequeno aumento nos tratamentos referentes aos agregados reciclados sem nenhuma cobertura, exceto o agregado reciclado misto, o que pode ser visto no Gráfico 8 (a). O aumento na concentração de sólidos totais é explicado pela grande quantidade de material pulverulento dos agregados. Esse pó é proveniente do próprio agregado, pois tanto a cerâmica quanto a pasta de cimento são materiais muito friáveis, desencadeando, com o atrito do manuseio, uma grande produção de partículas finas que são incorporadas no meio líquido.

Se tratando de sólidos suspensos totais os valores obtidos foram inconclusivos, devido à acurácia do método que revela concentrações extremamente baixas em todos os tratamentos. Conforme mostra o Gráfico 8 (b).

Como a concentração de sólidos dissolvidos consiste na concentração de sólidos totais subtraída da concentração de sólidos suspensos, os valores obtidos assemelham-se em todos os sentidos aos valores de sólidos totais, o que pode ser visualizado por meio do Gráfico 8 (c).

Gráfico 8 – Sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais no lixiviado de esgoto



Fonte: O autor

Notas: E: esgoto secundário; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

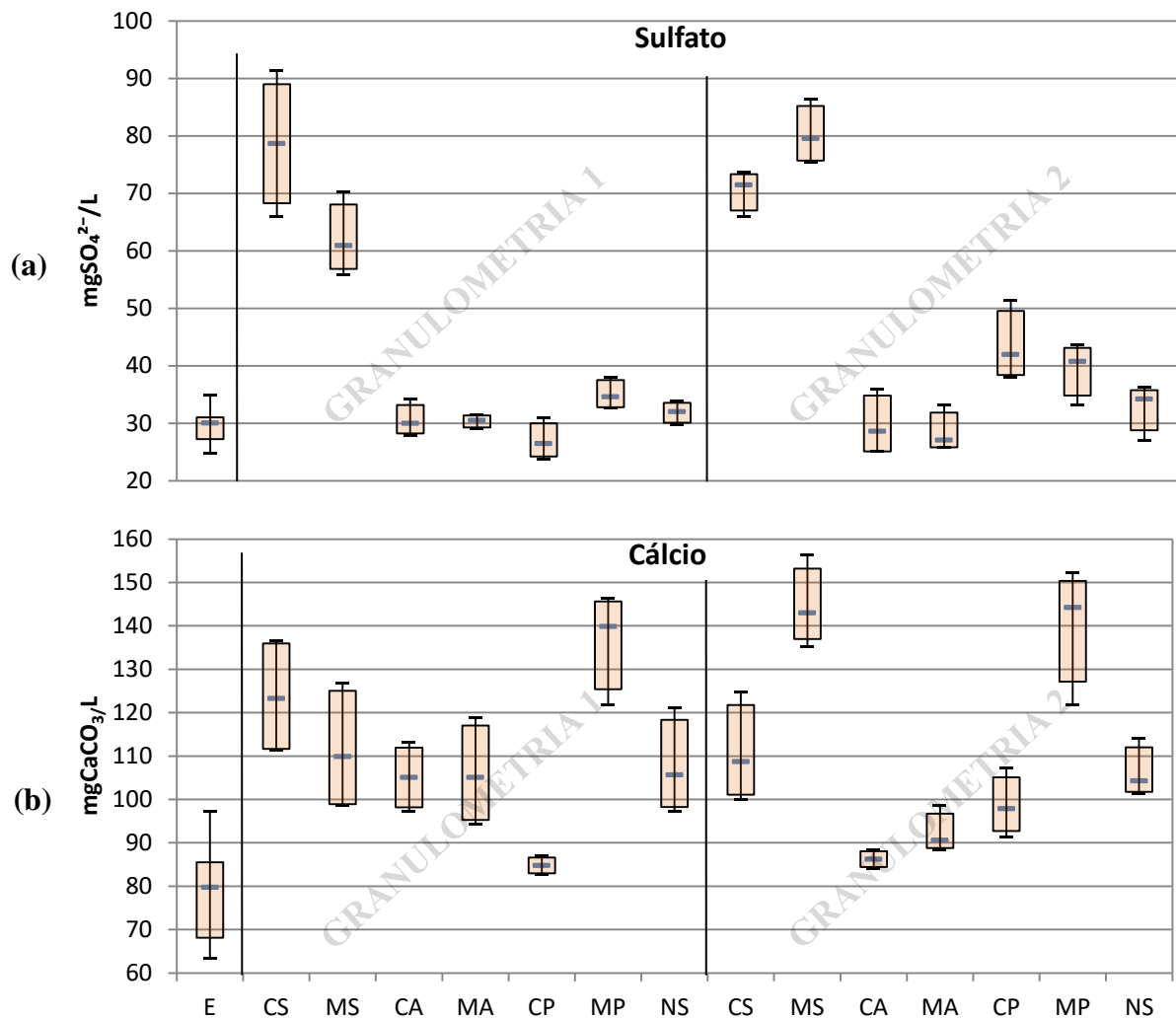
Ao avaliar os dados obtidos com as análises da concentração de sulfato nas amostras ensaiadas fica evidente a contaminação que os agregados reciclados causam ao meio líquido, o que fica explícito no Gráfico 9 (a). Os agregados reciclados de concreto sem cobertura apresentaram interferências similares, independente da granulometria, diferentemente do agregado reciclado misto, em que uma granulometria mais grossa culminou também em uma maior concentração de sulfato.

A presença de sulfato na solução lixiviada está ligada à presença de gesso no agregado reciclado, conforme explicitado por Barbudo *et al.* (2012), fato que leva à percepção de que a separação na usina de reciclagem não é feita de maneira totalmente adequada, tendo em vista que o gesso não deve ser misturado aos materiais granulares.

Especificamente para a questão do sulfato, os materiais de cobertura mostraram-se eficientes em conter a liberação para do líquido lixiviado, especialmente a emulsão asfáltica, que apresentou comportamento similar ao agregado natural, que manteve a média muito próxima dos valores de sulfato obtidos para o efluente que não teve contato com nenhum material granular.

Os teores de cálcio presentes nas amostras ensaiadas com o efluente à jusante do RALF indicam que os agregados reciclados têm o potencial de contaminação em meios líquidos, como é apresentado no Gráfico 9 (b), inclusive o agregado natural. Contudo os resultados mostram-se difíceis de serem avaliados, pois foram encontradas concentrações discrepantes entre os tratamentos executados. Ao mesmo tempo em que a cobertura com parafina se mostrou capaz de reduzir a contaminação quando combinada com o agregado reciclado de concreto, o mesmo não aconteceu para o agregado reciclado misto, onde as concentrações se mostraram maiores que as encontradas para o agregado sem cobertura nenhuma. A emulsão asfáltica, quando combinada com os agregados reciclados, aparentou uma concentração menor de cálcio, porém somente para os tratamentos em que foi aplicada a granulometria mais fina.

Gráfico 9 – Sulfato e cálcio no lixiviado de esgoto



Fonte: O autor

Notas: E: esgoto secundário; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

A discrepância observada na análise das concentrações de cálcio pode ser atribuída à grande gama de fatores intervenientes no processo de lixiviação. Conforme descrito por Kosson *et al.* (2002), o desprendimento de cálcio depende de diversas características, tanto do meio fluido quanto do resíduo em questão, e, dentre elas, pode-se citar o pH, a superfície de contato do agregado, a idade do mesmo, a sua composição, o tempo de exposição às intempéries e até mesmo a localização geográfica da produção desse resíduo.

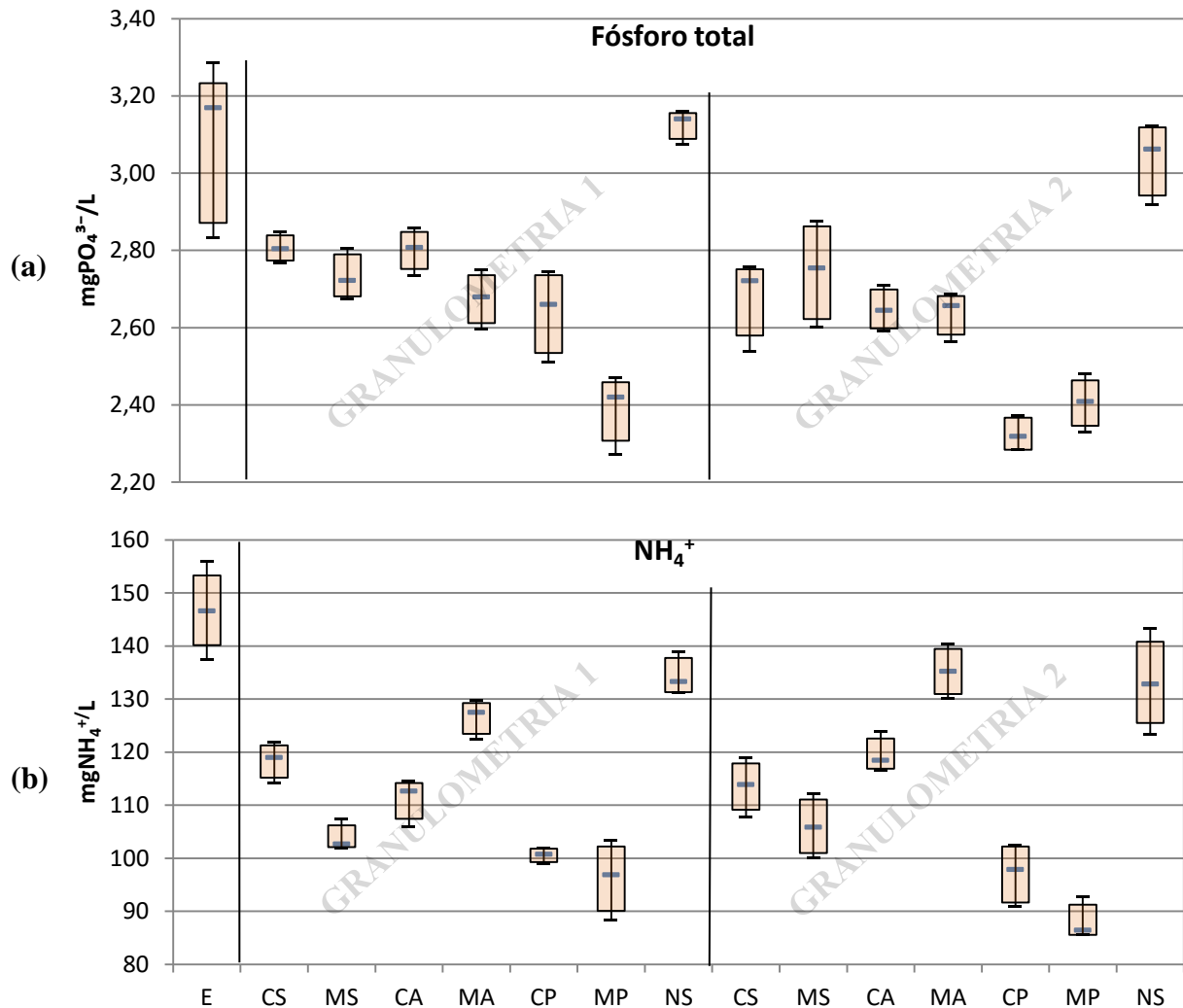
Os teores de fósforo nos lixiviados proveniente do efluente de RALF sofreram redução expressiva em todos os tratamentos que levam o agregado reciclado, sendo ele revestido ou não, conforme se observa no Gráfico 10 (a). Manjate *et al.* (2014) também registraram a capacidade de remoção de fósforo de efluentes domésticos com a utilização de materiais granulares e de diferentes granulometrias. Conforme o estudo realizado por Costa *et al.*

(2014), com wetlands, constatou-se que os agregados naturais são capazes de realizar uma grande remoção de fósforo do efluente, mesmo sem a presença dos vegetais. De acordo com os resultados explicitados no Gráfico 10 (a) os agregados naturais foram os que menos removeram fósforo do efluente, portanto pode-se dizer que os agregados reciclados podem ser aplicados como leito em sistemas de tratamento de esgoto residencial, o que também é confirmado por Yang *et al.* (2012), que utilizaram diversos tipos de RCD, obtendo grandes aumentos na remoção de fósforo.

Para as concentrações de nitrogênio amoniacal os dados obtidos revelam que os agregados reciclados também se mostram mais eficientes na remoção desse nutriente em relação ao agregado natural, evento que é respaldado pelos estudos de Yang *et al.* (2012), os quais relatam o aumento na remoção de nitrogênio de esgoto residencial utilizando RCD.

Com relação aos materiais de cobertura em conjunto com os agregados reciclados, conforme o Gráfico 10 (b), as análises apontam para uma maior eficiência em virtude da utilização da parafina, que apresentaram uma diminuição do íon NH_4^+ ainda maior que a observada nos agregados reciclados sem nenhum tipo de cobertura.

Gráfico 10 — Fósforo total e nitrogênio amoniacal no lixiviado de esgoto



Fonte: O autor

Notas: E: esgoto secundário; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Avaliando-se a análise de cor feita nas amostras de efluente após o contato com os materiais granulares foi possível comprovar, com base nos dados explicitados no Gráfico 11 (a), um resultado observado visualmente, conforme Figura 14. O uso de emulsão asfáltica como material de cobertura dos agregados reciclados acarreta num aumento nos valores médios de cor, independentemente de o agregado ser misto ou de concreto.

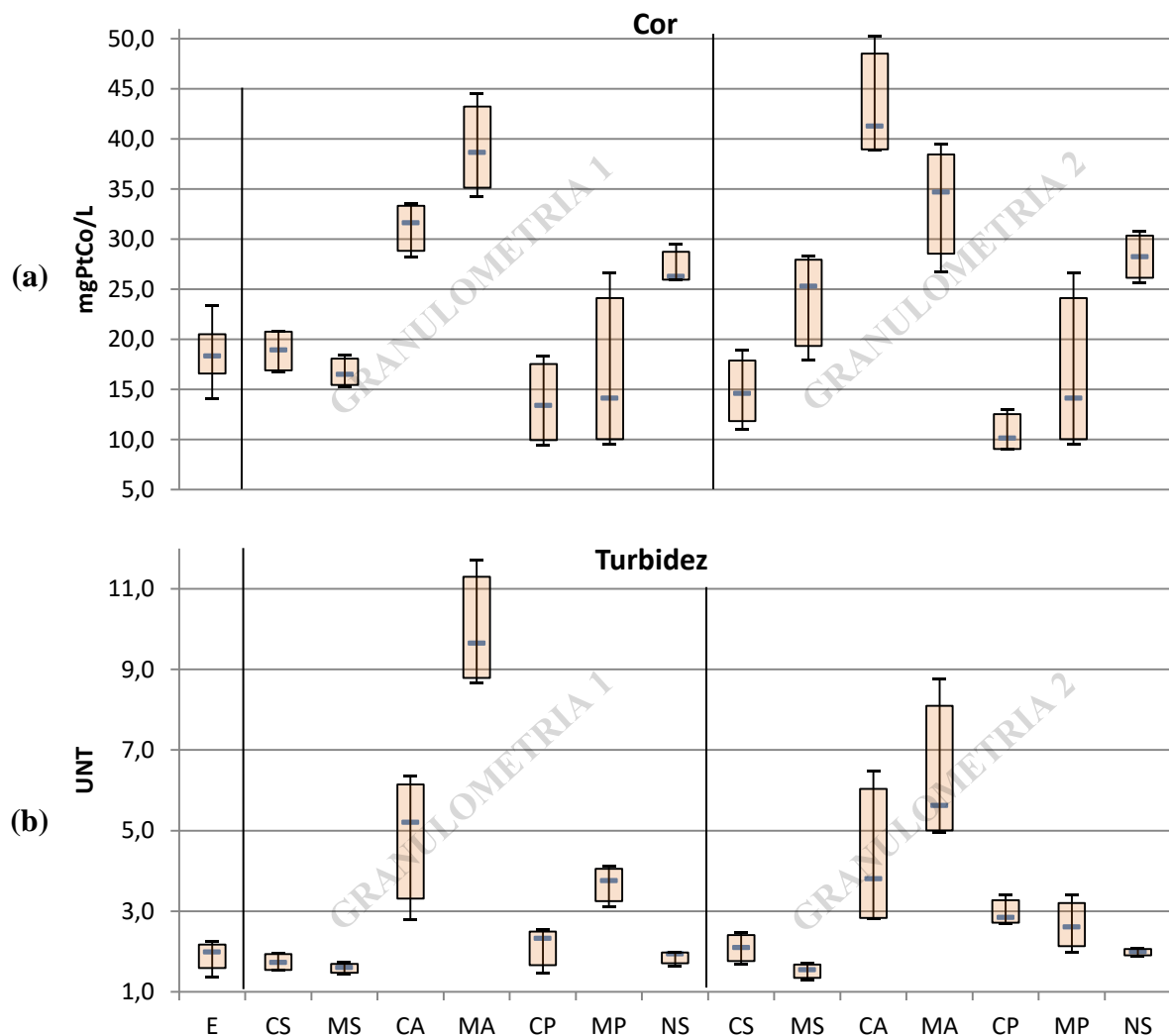
Um material que também revelou um aumento de cor ao efluente foi o agregado reciclado misto de granulometria maior. Não foi encontrado motivo específico que justifique esse resultado, além da variabilidade intrínseca ao material.

Figura 14 - diferença de cor nos diferentes tratamentos



Fonte: O autor

Gráfico 11 – Cor e turbidez no lixiviado de esgoto



Fonte: O autor

Notas: E: esgoto secundário; CS: concreto sem cobertura; MS: misto sem cobertura; CA: concreto com asfalto; MA: misto com asfalto; CP: concreto com parafina; MP: misto com parafina; NS: natural sem cobertura

Em relação à turbidez das amostras de efluente analisadas após contato com os materiais estudados foi possível confirmar uma preocupação latente em relação à utilização de

emulsão asfáltica em sistemas de tratamento de água e esgoto. Devido à grande importância desse parâmetro na qualidade da água dos corpos hídricos e, conseqüentemente, nos padrões de lançamento, os altos valores registrados tornam a aplicação do material asfáltico bastante problemática.

Os materiais revestidos com parafina apresentaram menor variação em relação aos revestidos com asfalto, mas também causaram um pequeno aumento de turbidez no meio líquido.

Ambos os materiais de cobertura causaram um aumento de turbidez, porém visualmente foi possível notar que se trata de fenômenos diferentes. Conforme observado na realização dos ensaios, o asfalto se dissolveu no meio líquido e a parafina liberou partículas flutuantes, sendo as duas situações detectadas pelo turbidímetro, conforme exposto no Gráfico 11 (b).

Além da interação dos agregados, foi identificada a grande influência da emulsão asfáltica nos resultados de cor e turbidez, portanto surge a necessidade de avaliar melhor o comportamento desse material.

A emulsão asfáltica consiste em uma mistura de água e cimento asfáltico, dois materiais imiscíveis a princípio. Sob condições altamente controladas essa mistura torna-se possível, porém o seu equilíbrio é bastante frágil. Essa fragilidade da mistura é o que torna possível a sua utilização nos serviços de pavimentação, pois a partir do momento que a emulsão entra em contato com os materiais granulares perde-se o equilíbrio da mistura e então se dá início ao chamado rompimento.

Com o rompimento as partículas de água voltam a se separar das partículas de asfalto, que por sua vez retomam seu aspecto pegajoso e realizam a coesão do material granular. Esse processo permite a realização de obras de pavimentação a frio.

A utilização de material betuminoso é feita a partir da mistura com agregados de granulometria contínua, ou seja, os grânulos maiores formam uma matriz que é preenchida por grânulos cada vez menores, tendo como material ligante os materiais asfálticos.

A condição granulométrica aplicada na metodologia utilizada para a realização da pesquisa foi a oposta da condição ideal da aplicada em serviços de pavimentação. Esse fato ocasionou problemas no processo de rompimento da emulsão asfáltica, pois a superfície de

contato com o material granular foi reduzida drasticamente, ocasionando morosidade no processo de rompimento ou até anulando-o em partes.

Para melhor análise do comportamento da emulsão asfáltica em contato com o agregado reciclado de granulometria uniforme foram avaliadas cor e turbidez de misturas em diferentes intervalos de tempo, sendo eles: 24, 96 e 168 horas após a mistura, ou seja, um, quatro e sete dias.

A metodologia aplicada foi a mesma para todas as outras análises realizadas em soluções, ou seja, foi adicionada água ao material granular e procedida a incubação por 24 horas a 20 graus Celsius para então serem aferidas cor e turbidez.

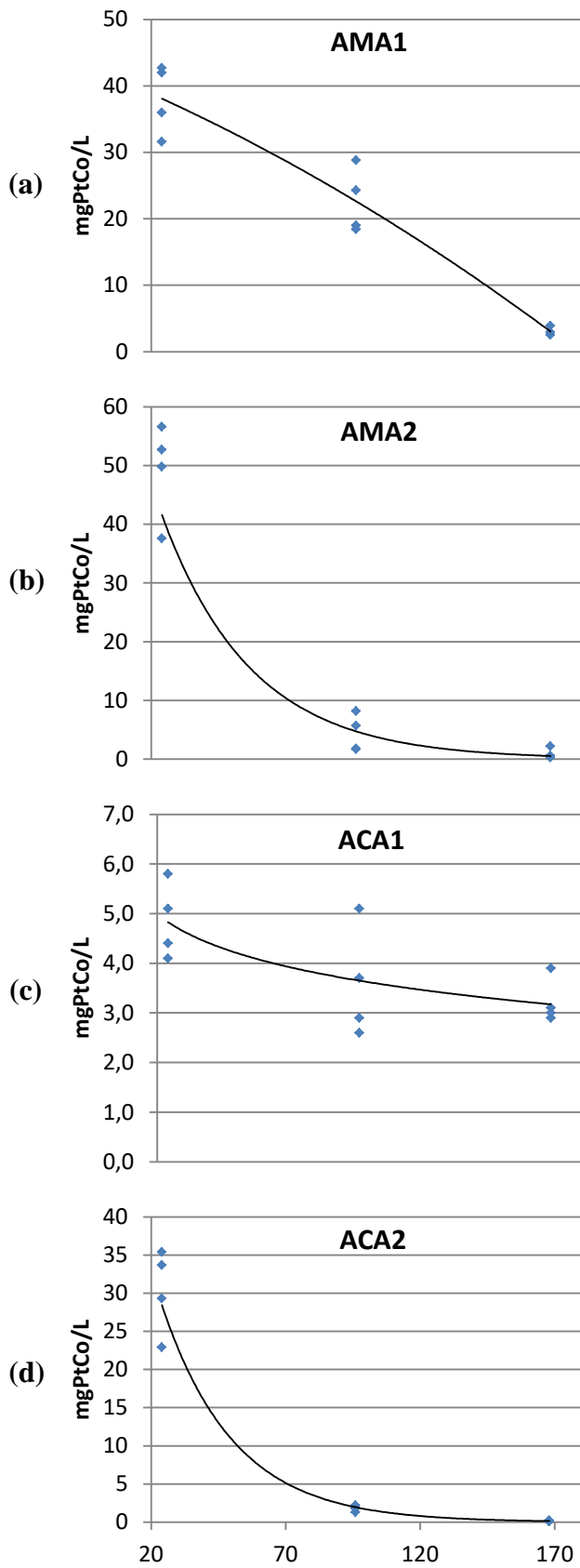
Para as análises de cor foram obtidos os resultados explicitados pelas curvas no Gráfico 12, já para as análises de turbidez foram obtidos os resultados explicitados pelas curvas no Gráfico 13.

Com exceção do agregado reciclado de concreto de granulometria menor, que apresentou uma curva diferente, o comportamento da cor em relação ao tempo de rompimento mostrou-se semelhante em todos os tratamentos testados. Ao primeiro dia as amostras apresentam valores altos de cor e turbidez alcançando valores próximos ou igual a zero no sétimo dia.

Os resultados obtidos com as análises mostram um comportamento semelhante aos resultados explicitados ao analisar a cor, no sentido de que no período de sete dias o rompimento acontece a ponto de refletir em valores próximos de zero.

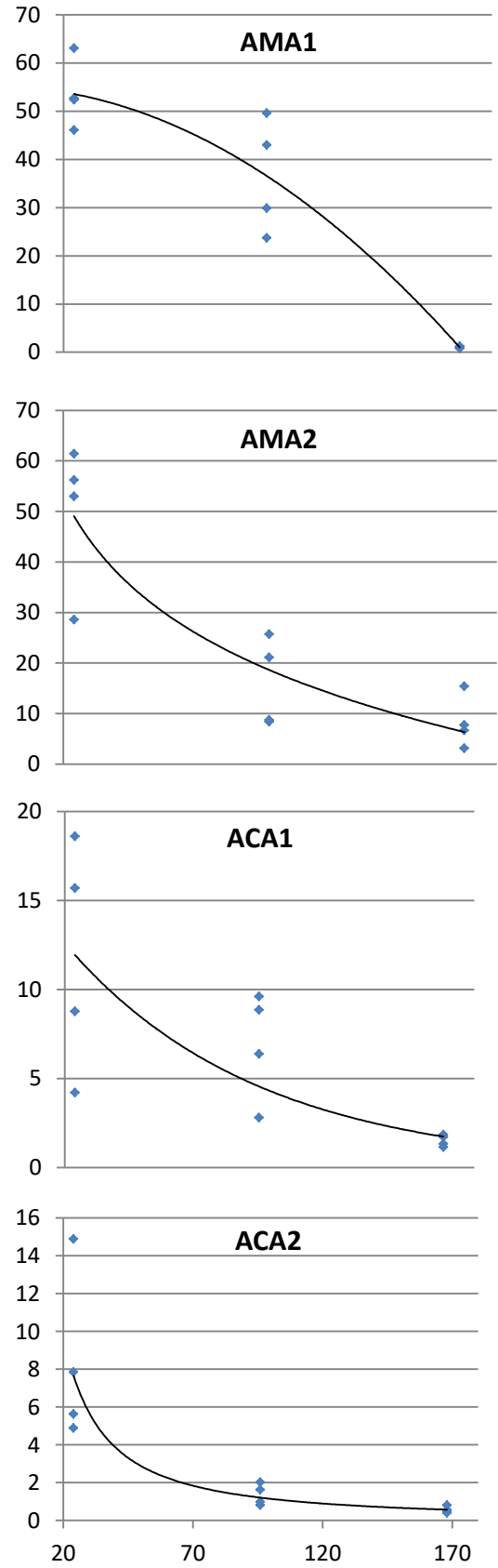
A turbidez indicou uma melhor interação do ARC com a emulsão asfáltica em relação ao ARM, tendo em vista que os valores iniciais no agregado misto são bem maiores (média de 50 UNT) que os valores para o agregado de concreto (média de 10 UNT). Aos sete dias de rompimento o agregado de concreto também mostrou ter mais afinidade com a emulsão asfáltica, alcançando valores mais próximos de zero.

Gráfico 12 – Curvas: cor x tempo



Fonte: O autor

Gráfico 13 – Curvas: turbidez x tempo



Fonte: O autor

5.5 INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS

Utilizando-se de mecanismos estatísticos torna-se possível a comparação taxativa entre os materiais estudados. Para a apresentação e discussão dos resultados das análises estatísticas são apresentados os dados por meio de tabelas e na sequência discutidos, condensando a discussão em casos de conclusões semelhantes entre os parâmetros avaliados.

Os experimentos fatoriais podem apresentar dois tipos de resultados, com interpretações distintas. Há casos em que não existe interação entre os fatores analisados, que para a presente pesquisa consiste em tipo de agregado (ARM ou ARC) e cobertura (parafina ou emulsão asfáltica), e casos em que essa interação é significativa.

Além desses dois tipos de resultados, o tratamento adicional aplicado às análises, fornece um terceiro resultado, que elucidada se os resultados dos tratamentos, de forma geral, diferem dos resultados alcançados com o agregado natural, ou seja, se os agregados reciclados, dotados de cobertura ou não, diferem do agregado natural.

Nos casos em que não há interação é possível inferir isoladamente acerca dos fatores. Trazendo para a realidade da presente pesquisa, a não interação entre fatores significa que os resultados encontrados para um agregado não sofrem interferência do material de cobertura e vice-versa. Ambos os casos ocorreram no presente trabalho, fato que demandou a divisão dos resultados estatísticos em dois grupos. As análises que não acusaram interação entre os fatores foram agrupadas nas Tabelas 5 e 6, já os resultados das análises em que houve a interação estão compiladas nas Tabelas 7 e 8.

As quatro tabelas mostram os resultados obtidos por meio do Teste de Tukey, o qual apresenta as diferenças estatísticas usando letras, sendo que letras diferentes significam médias que diferem estatisticamente entre si e letras iguais significam médias que não diferem estatisticamente entre si. As quatro tabelas também são organizadas por parâmetro analisado e por granulometria, sendo 1 a granulometria menor e 2 a maior.

A Tabela 5 (c)(d) apresenta os resultados obtidos referentes ao pH do lixiviado obtido a partir da água nas duas granulometrias. Eles apontam que a cobertura, seja em parafina ou em emulsão asfáltica, evita um acréscimo do pH no meio líquido. O aumento do pH é característico, conforme relatado por Roque *et al.* (2016), e o material de cobertura não sofre nem exerce interferência nos resultados obtidos para cada tipo de agregado.

É possível afirmar também que o agregado reciclado de concreto confere um maior aumento de pH em relação ao agregado reciclado misto. Por fim, em uma análise geral em relação ao pH, observa-se que os materiais reciclados, com cobertura ou não, acarretam em um lixiviado mais básico em relação à utilização de agregado natural.

Tabela 5 – Diferenças entre médias referentes ao lixiviado de água em que não houve interação entre fatores

Alcalinidade 1 (mgCaCO ₃ /L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(a)	sem cobertura	33,27a	concreto	24,10a	natural	17,28a
	Asfalto	19,21b	misto	27,07b	fatorial	25,58b
	Parafina	24,27c				
Alcalinidade 2 (mgCaCO ₃ /L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(b)	sem cobertura	32,70a	concreto	23,71a	natural	17,63a
	Asfalto	19,19b	misto	23,82a	fatorial	23,76b
	Parafina	19,41b				
pH 1						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(c)	sem cobertura	9,06a	concreto	8,36a	natural	7,67a
	Asfalto	7,82b	misto	8,18b	fatorial	8,27b
	Parafina	7,93b				
pH 2						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(d)	sem cobertura	8,61a	concreto	8,24a	natural	7,83a
	Asfalto	7,93b	misto	8,12b	fatorial	8,18b
	Parafina	8,01b				
Fósforo total 1 (mgPO ₄ ³⁻ /L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(e)	sem cobertura	0,081a	concreto	0,037a	natural	0,260a
	asfalto	0,024b	misto	0,045a	fatorial	0,041b
	parafina	0,019b				
Fósforo total 2 (mgPO ₄ ³⁻ /L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(f)	sem cobertura	0,102a	concreto	0,052a	natural	0,240a
	Asfalto	0,025b	misto	0,061a	fatorial	0,057b
	Parafina	0,043c				

Fonte: O autor

Notas: letras diferentes sinalizam diferença estatística entre as médias

Tendo em vista a alcalinidade ensaiada com os tratamentos compostos por água, constantes na Tabela 5 (a)(b), constataram-se resultados diferentes para as duas granulometrias aplicadas. Para a granulometria menor foi revelada uma média intermediária para os agregados recobertos com parafina e uma diferença entre os agregados reciclados misto e de concreto. Já para a granulometria maior não foi verificada diferença entre os agregados reciclados cobertos com parafina e asfalto nem diferença entre os agregados reciclados misto e de concreto.

Apesar da discrepância dos resultados obtidos para alcalinidade com relação às diferentes granulometrias, é possível afirmar que os agregados reciclados promovem uma alcalinização do meio líquido, conforme observado por Martínez e Cortázar (2013), e que os materiais de cobertura foram eficientes em diminuir o aumento da alcalinidade.

Os resultados referentes aos teores de fósforo total no lixiviado proveniente da água revelou um resultado interessante que mostra uma situação em que o agregado natural ocasiona maiores concentrações do íon no líquido lixiviado em relação aos agregados reciclados, sejam eles com ou sem cobertura, o que, segundo Yang *et al.* (2012) pode ser atribuído a processos de sedimentação e adsorção. Tratando-se das comparações entre os agregados reciclados foi observado, na Tabela 6 (e)(f) que não há diferença nas concentrações de fósforo em decorrência da origem do agregado, ou seja, ARC e ARM desencadeiam valores estatisticamente semelhantes, para ambas as granulometrias. Em relação aos materiais de cobertura ficou explícito que os mesmos são eficazes na diminuição do teor de fósforo no meio líquido. Para a granulometria 1 a parafina e a emulsão asfáltica não diferiram entre si. Já para a granulometria 2 a parafina foi menos eficiente que a emulsão asfáltica.

Ao se observar os resultados obtidos a partir do esgoto secundário como meio líquido, para alcalinidade, de acordo com a Tabela 6 (a), todos os tratamentos revelaram médias estatisticamente semelhantes para a granulometria 1, o que destoa da literatura, uma vez que os agregados reciclados ocasionam acréscimo nesse parâmetro, conforme exposto por Martínez e Cortázar (2013).

Tratando-se de DQO, um importante parâmetro de dimensionamento e monitoramento de sistemas de tratamento de efluentes, o resultado apresentado na Tabela 6 (b)(c) não indica absolutamente nenhuma diferença estatística entre os tratamentos em que se utilizaram agregados de granulometria menor. Para a granulometria maior, a única diferença estatística apareceu na comparação do lixiviado proveniente do tratamento adicional com os demais tratamentos, indicando que o agregado natural acarreta em valores mais baixos de DQO no efluente secundário, resultado que vai contra os obtidos por Colombo *et al.* (2010), que apontam para melhores resultados em remoção de DQO utilizando-se agregado reciclado, em comparação com o agregado natural.

A terceira variável, se tratando do lixiviado proveniente de esgoto secundário, em que não houve interação entre os fatores origem e cobertura, foi sólidos totais, para a granulometria 1, Conforme Tabela 6 (d). Nesse caso a única diferença estatística se deu na

concentração de sólidos quando o agregado reciclado foi aplicado sem nenhuma cobertura, caso em que foi registrada a maior concentração em relação aos outros tratamentos. Esse fato está relacionado ao fato de a friabilidade dos agregados reciclados, conforme relatado por Leite *et al.* (2011).

Por fim, ao analisar as concentrações de fósforo no lixiviado proveniente de esgoto secundário e agregados de granulometria 2, foi possível observar, conforme Tabela 6 (e), que os tratamentos que levaram parafina como material de cobertura foram os que apresentaram a menor concentração de fósforo. Além disso, observou-se que o agregado natural acarretou em mais fósforo no meio líquido, o que vai de encontro com os resultados obtidos por Yang *et al.* (2012), em comparação aos agregados reciclados em geral.

Tabela 6 – Diferenças entre médias referentes ao lixiviado de esgoto em que não houve interação entre fatores

Alcalinidade 1 (mgCaCO ₃ /L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(a)	sem cobertura	255,54a	concreto	243,27a	natural	235,7a
	Asfalto	241,69a	misto	251,30a	fatorial	247,3a
	Parafina	244,63a				
DQO 1 (mgDQO/L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(b)	sem cobertura	49,73a	concreto	53,49a	natural	49,31a
	Asfalto	57,68a	misto	58,24a	fatorial	55,87a
	Parafina	60,19a				
DQO 2 (mgDQO/L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(c)	sem cobertura	55,59a	concreto	56,56a	natural	45,12a
	Asfalto	56,42a	misto	56,84a	fatorial	56,70b
	Parafina	58,10a				
Sólidos totais 1 (mg/L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(d)	sem cobertura	0,377a	concreto	0,332a	natural	0,297a
	Asfalto	0,306b	misto	0,332a	fatorial	0,332a
	Parafina	0,313b				
Fósforo 2 (mgPO ₄ ³⁻ /L)						
	COBERTURA		ORIGEM		TRAT ADIC	
(e)	sem cobertura	2,72a	concreto	2,55a	natural	3,04a
	Asfalto	2,64a	misto	2,60a	fatorial	2,58b
	Parafina	2,37b				

Fonte: O autor

Notas: letras diferentes sinalizam diferença estatística entre as médias

Quando os testes estatísticos acusam interação entre os fatores origem e cobertura, a análise torna-se mais complexa, pois é preciso explicitar as particularidades causadas por ambos os fatores conjuntamente. Portanto, quando há a interação, são feitas comparações separadamente para cada nível do fator. Os resultados das comparações foram agrupados e

sistemizados na Tabela 7, que se refere aos resultados obtidos com o lixiviado proveniente de água em contato com os agregados, e na Tabela 8, que faz referência ao lixiviado obtido utilizando-se o esgoto secundário como meio líquido.

Tabela 7 – Diferença entre médias referentes ao lixiviado de água em que houve interação entre os fatores

Conductividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(a)	S	710,93aA	457,48aB			S	449,13aA	263,38aB		
	A	134,60bA	137,93bA	120,68A	284,48B	A	134,15bA	125,95bA	118,65A	209,16B
	P	107,58bA	158,35bB			P	136,03bA	146,35bA		
DQO (mgDQO/L)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(b)	S	49,29aA	36,70aB			S	46,28aA	33,79aB		
	A	32,59bA	31,62aA	35,01A	38,66B	A	43,74aA	51,37bA	35,88A	45,00B
	P	38,28cA	43,50bB			P	47,86aA	46,98bA		
Cálcio (mgCaCO_3/L)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(c)	S	529,62aA	223,85aB			S	313,73aA	129,58aB		
	A	93,66bA	68,46bA	79,51A	179,66B	A	76,76bA	64,44bA	79,92A	126,35B
	P	60,87bA	101,54bA			P	87,68bA	85,92abA		
Cor (mgPtCo/L)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(d)	S	2,53aA	1,65aA			S	2,05aA	0,40aA		
	A	3,83aA	22,63bB	0,30A	5,85B	A	1,80aA	4,35bB	0,35A	1,87B
	P	1,28aA	3,18aA			P	1,10aA	1,53aA		
Sólidos totais (mg/L)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(e)	S	0,643aA	0,490aB			S	0,358aA	0,233aB		
	A	0,120bA	0,126bA	0,122A	0,286B	A	0,118bA	0,090bA	0,117A	0,178B
	P	0,138bA	0,196cB			P	0,083bA	0,183aB		
Sulfato ($\text{mgSO}_4^{2-}/\text{L}$)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(f)	S	112,8aA	143,9aB			S	108,21aA	53,18aB		
	A	15,60bA	17,50bA	22,19A	52,24B	A	32,05bA	35,77abA	22,32A	44,05B
	P	7,04bA	16,52bB			P	13,99bA	21,10bA		
Turbidez (NTU)										
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial
(g)	S	0,920aA	1,10aA			S	0,670aA	1,19aA		
	A	6,91aA	36,55bB	0,525A	7,84B	A	1,37aA	15,98bB	0,558A	3,39A
	P	0,282aA	1,31aA			P	0,265aA	0,822aA		

Fonte: O autor

Notas: letras minúsculas traduzem as comparações feitas verticalmente e as letras maiúsculas se referem às comparações feitas na horizontal, onde letras diferentes sinalizam diferença estatística entre as médias

A Tabela 7 também traz a comparação do tratamento adicional com o conjunto fatorial, ou seja, dos resultados obtidos com agregado natural para com os resultados obtidos com os agregados reciclados como um todo, providos de cobertura ou não. Cada parâmetro ensaiado foi analisado individualmente, porém ao serem compilados os dados relativos ao

lixiviado obtido a partir de água, conforme Tabela 7, constatou-se que mais de um parâmetro apresentou comportamento estatístico semelhante.

O primeiro grupo de semelhanças apareceu com os dados obtidos pelos ensaios de condutividade elétrica e cálcio, conforme Tabela 7 (a)(c). Nessas variáveis ficou evidente que os materiais de cobertura se mostraram eficientes em promover um bloqueio entre a superfície dos agregados reciclados e o meio líquido, pois as concentrações ensaiadas foram estatisticamente maiores nos tratamentos em que o agregado reciclado foi utilizado sem nenhum tipo de cobertura.

Outra questão evidenciada nesse primeiro grupo é que o agregado reciclado promove um aumento maior nas concentrações desses parâmetros em relação ao agregado natural. Esses resultados corroboram com o que é explicitado por Martínez e Cortázar (2013), que apresentaram valores ainda mais expressivos para esses parâmetros, uma vez que o RCD analisado por esses autores era composto por todas as frações granulométricas.

Dentre esse primeiro grupo que apresenta comportamento estatístico semelhante os valores obtidos para cálcio estão entre os que apresentaram a maior diferença de valores entre os diversos tratamentos, apontando para um grande potencial de liberação de íons de cálcio partindo dos agregados reciclados, os quais são refletidos nos valores de condutividade elétrica, que também obtiveram uma grande discrepância de valores, entre agregados reciclados sem cobertura e agregados naturais, por exemplo.

Os resultados obtidos das análises de sólidos totais, de acordo com a Tabela 7 (e), revela um comportamento muito semelhante ao do primeiro grupo, onde fica evidente a maior concentração referente aos agregados reciclados sem nenhum material de cobertura em relação aos agregados cobertos. A diferença dos resultados estatísticos de sólidos totais para o primeiro grupo consiste no fato de que os dados de que os sólidos revelaram uma fragilidade da cobertura feita em parafina sobre o agregado reciclado misto.

Mesmo que a parafina tenha se mostrado eficiente em diminuir o contato entre o meio líquido e a superfície do agregado reciclado, essa eficiência foi menor em relação ao agregado reciclado de concreto. Esses resultados podem ser atribuídos à absorção maior, conforme resultados obtidos das análises descritas pela NBR NM 53 (2003), do agregado reciclado misto, ocasionando em maior exposição do agregado ao meio líquido.

Vale ressaltar que para todas as variáveis discutidas anteriormente o comportamento das variáveis é o mesmo nas duas granulometrias.

Para todos os outros parâmetros analisados referentes ao lixiviado obtido a partir de água as comparações estatísticas revelaram diferenças únicas intrínsecas a cada variável, acarretando em uma abordagem individual para cada parâmetro.

Tratando-se dos valores de DQO, conforme Tabela 7 (b), foi possível notar que a granulometria do agregado é uma característica que resultou em resultados diferentes. Para a granulometria menor, a cobertura sobre os agregados reciclados de concreto refletiu em diminuição dos valores de DQO em relação aos agregados sem nenhuma cobertura, sendo a emulsão asfáltica responsável por uma diminuição maior que a parafina, comportamento que não se repete na granulometria maior. A oscilação na demanda de oxigênio também se relaciona à composição complexa e variável do RCD observada por meio do ensaio de FRX, o qual pode conter diversos íons, que quando liberados na água consomem o oxigênio nela dissolvido.

Já para o agregado reciclado misto, a cobertura com emulsão asfáltica não ocasionou diferença estatística entre os valores de DQO obtidos para o lixiviado proveniente do contato com o agregado sem nenhuma cobertura e a cobertura com parafina gerou um valor estatisticamente maior dessa variável.

Analisando-se os resultados referentes à concentração de DQO, obtida no lixiviado proveniente do contato de água com os agregados de granulometria maior, foram observadas somente duas diferenças estatísticas. A primeira refere-se ao agregado reciclado misto, sem cobertura, que resultou em valores menores de DQO em relação ao agregado reciclado de concreto. A outra refere-se ao agregado reciclado misto coberto com emulsão asfáltica, que apresentou o maior valor dentre os tratamentos baseados no mesmo agregado.

Cabe ressaltar que, mesmo com todo o rigor metodológico empregado na realização das análises, a metodologia aplicada na aferição de baixas concentrações de DQO é altamente sensível, tendo em vista que a aferição é espectrofotométrica, ou seja, a presença de partículas dissolvidas ou suspensas na solução podem alterar a dispersão do feixe de luz que a atravessa, fato que dificulta a comparação com resultados encontrados na literatura, uma vez que a literatura revela interesse no RCD em sistemas de tratamento de efluentes, e não de água.

Tratando-se dos parâmetros cor e turbidez, conforme Tabela 7 (d)(g), as análises estatísticas revelaram uma ineficiência detectada no processo de mistura entre a emulsão asfáltica e o agregado reciclado misto, principalmente se tratando da granulometria menor.

As diferenças estatísticas apareceram nos tratamentos em que foram combinados o agregado reciclado misto com emulsão asfáltica. Os valores foram superiores aos demais tratamentos, chegando à ordem de quase 600% de diferença, no caso da granulometria menor. Essa grande variação nos valores de cor e turbidez estão diretamente relacionadas ao processo de cura da emulsão asfáltica, que não acontece plenamente devido à granulometria uniforme dos agregados aplicados na pesquisa, ou seja, a ausência de partículas menores desencadeia uma sobra de emulsão asfáltica que demora para aderir-se totalmente às superfícies e deixar de ser solúvel em água.

O desenvolvimento do processo de cura da emulsão asfáltica foi descrito por análises complementares de cor e turbidez ao longo do tempo, conforme apresentado nos Gráficos 12 e 13.

Observou-se ainda que o agregado natural resulta em valores de cor menores que os resultantes de agregados reciclados, independentemente de cobertura, origem ou granulometria.

O sulfato, último parâmetro referente ao lixiviado proveniente da água a ser abordado, com dados apresentados na Tabela 7 (f) revelou inferências diferentes para cada granulometria estudada. Para a granulometria menor os resultados se deram no mesmo teor dos observados para fósforo e sólidos totais, exceto pelo fato de que a parafina não revela menor eficiência na cobertura do agregado misto, mas o resultado se mostra estatisticamente igual ao obtido com a emulsão asfáltica. Em linhas gerais é expressiva a diferença revelada entre as concentrações referentes aos agregados reciclados com e sem cobertura, confirmando a grande capacidade de liberação de íons sulfato a partir do RCD retratada por Silva, Brito e Dhir (2014).

Quando se trata da granulometria maior, as comparações se alinham com as feitas no primeiro grupo de parâmetros, excetuando-se os valores obtidos a partir do agregado reciclado misto, para os quais a cobertura com emulsão asfáltica ocasiona valores intermediários da concentração de íons sulfato.

De maneira geral, a comparação entre o agregado natural e o arranjo fatorial, que envolve todos os agregados reciclados com ou sem cobertura, houve um resultado estatístico padrão em que é evidenciada a diferença entre o uso do agregado natural e dos agregados reciclados para todas as variáveis, o que vai de acordo com a constatação feita por Engelsen *et al.* (2012) de que os agregados reciclados estão mais sujeitos à liberação de compostos por meio da lixiviação. A única exceção se deu nos valores referentes à DQO para os agregados da granulometria maior, onde essa diferença não aconteceu.

Tratando-se dos testes estatísticos realizados com os dados obtidos a partir do lixiviado proveniente de esgoto secundário, não foi possível agrupar as inferências em grupos, tendo em vista que para cada parâmetro analisado caracterizou-se semelhanças e diferenças estatísticas distintas, de acordo com o apresentado na Tabela 8.

Ao analisar os resultados referentes aos valores de pH é possível observar que o agregado reciclado acarreta em valores maiores em relação ao agregado natural e que o agregado reciclado misto ocasionou um pH mais alto em relação ao agregado reciclado de concreto. Tal resultado mostra-se contrário aos resultados obtidos por Colombo *et al.* (2010), que apontam para valores maiores para o agregado de concreto em relação ao misto. Os materiais de cobertura mostraram eficientes em conter esse aumento do pH. A parafina, por sua vez, mostrou-se mais eficiente quando em contato com o agregado reciclado de concreto na granulometria menor.

Para os valores testados, referentes à condutividade elétrica, foi constatado, no caso da granulometria menor, que todos os tratamentos diferiram estatisticamente entre si, sendo que o agregado reciclado de concreto sem cobertura foi o tratamento com maiores valores de condutividade elétrica e o mesmo agregado, coberto com parafina, apresentou a menor média desse parâmetro. No caso da granulometria maior, os valores referentes ao agregado reciclado de concreto provido de cobertura foram semelhantes entre si e diferentes dos referentes ao desprovido de cobertura. Já no caso do agregado reciclado misto houve diferença significativa entre as coberturas, porém quando consideramos a cobertura asfáltica, agregado reciclado de concreto e misto apresentaram condutividades iguais.

Tabela 8 – Diferença entre médias referentes ao lixiviado de esgoto em que houve interação entre os fatores

		pH									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(a)	S	7,75aA	8,11aB			S	7,83aA	8,17aB			
	A	7,60bA	7,60bA	7,60A	7,72B	A	7,70bA	7,65bA	7,68A	7,81B	
	P	7,58bA	7,70bB			P	7,71bA	7,78cA			
		Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(b)	S	891,7aA	871,1aB			S	906,4aA	892,6aB			
	A	852,9bA	823,8bB	805,1A	849,5B	A	819,6bA	820,9bA	795,0A	851,6B	
	P	809,0cA	848,5cB			P	818,1bA	852,2cB			
		Alcalinidade (mgCaCO_3/L)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(c)		Tabela 6 (a)				S	252,9aA	261,8aB			
						A	249,5aA	249,2bA	231,9A	249,1A	
						P	232,9bA	248,1bB			
		Cálcio (mgCaCO_3/L)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(d)	S	123,6aA	111,3aA			S	110,5aA	144,4aB			
	A	105,1aA	105,8aA	107,4A	111,2A	A	86,24bA	92,03bA	106,0A	112,1A	
	P	84,79bA	137,0bB			P	98,55abA	140,6aB			
		Cor (mgPtCo/L)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(e)	S	18,88aA	16,68aA			S	14,78aA	24,20aB			
	A	31,28bA	39,00bB	27,00A	22,92B	A	42,93bA	33,90bB	28,25A	23,75B	
	P	13,63aA	18,08aA			P	10,58aA	16,10aA			
		Fósforo ($\text{mgPO}_4^{3-}/\text{L}$)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(f)	S	2,81aA	2,73aA								
	A	2,80aA	2,68aB	3,13A	2,68B				Tabela 6 (e)		
	P	2,64bA	2,40bB								
		Sólidos totais (mg/L)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(g)		Tabela 6 (d)				S	0,374aA	0,313aB			
						A	0,275bA	0,296aA	0,313A	0,315A	
						P	0,334aA	0,297aA			
		Nitrogênio (mgNH_4^+/L)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(h)	S	114,6aA	103,6aB			S	113,6aA	105,9aB			
	A	111,4aA	126,7bB	134,1A	108,9B	A	119,3aA	135,2bB	133,0A	109,8B	
	P	100,6bA	96,36aA			P	97,21bA	87,74cB			
		Sulfato ($\text{mgSO}_4^{2-}/\text{L}$)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(i)	S	78,64aA	61,95aB			S	70,61aA	80,12aB			
	A	30,44bA	30,36bA	31,88A	43,87B	A	29,51bA	28,25bA	32,89A	48,56B	
	P	26,88bA	34,96bB			P	43,29cA	39,56cA			
		Turbidez (NTU)									
	1	concreto	misto	natural	fatorial	2	concreto	misto	natural	fatorial	
(j)	S	1,738aA	1,590aA			S	2,093aA	1,525aA			
	A	4,888bA	9,913bB	1,875A	4,000B	A	4,225bA	6,243bB	1,990A	3,280B	
	P	2,163aA	3,685cB			P	2,945abA	2,650aA			

Fonte: O autor

Notas: letras minúsculas traduzem as comparações feitas verticalmente e as letras maiúsculas se referem às comparações feitas na horizontal, onde letras diferentes sinalizam diferença estatística entre as médias

Analisando-se os valores testados para alcalinidade, apresentados na Tabela 8 (c) obtidos com agregados de granulometria maior sob contato com o esgoto secundário foi possível inferir que o agregado reciclado misto acarreta em valores maiores em comparação ao agregado reciclado de concreto, exceto no asfalto. A cobertura asfáltica não apresentou redução significativa da alcalinidade para o agregado reciclado de concreto, mas para o agregado reciclado misto revelou uma média estatisticamente menor.

A cobertura parafínica mostrou-se eficiente em conter o aumento da alcalinidade. Apesar das diferenças descritas entre os agregados reciclados, cobertos ou não, os valores de alcalinidade são estatisticamente iguais aos referentes ao lixiviado proveniente do agregado natural, revelando que o esgoto já apresenta alcalinidade alta ao sair do sistema de tratamento.

Os resultados obtidos em referência ao cálcio, constantes na Tabela 8 (d), no lixiviado proveniente do esgoto acarretaram em uma interpretação complexa. A parafina, para a granulometria menor, causou aumento no valor de cálcio quando aplicada ao agregado reciclado misto e redução, quando aplicada ao agregado reciclado de concreto. Já para a granulometria maior a parafina não revelou diminuição significativa para ambos os materiais. A cobertura asfáltica se mostrou eficiente quando usada nos agregados reciclados de granulometria maior e apresentou médias estatisticamente iguais para a granulometria menor

Tratando-se de cor e turbidez, conforme Tabela 8 (e)(j), o lixiviado proveniente do esgoto secundário mostrou comportamento semelhante ao revelado com a utilização de água, ou seja, a cobertura asfáltica acarreta em aumentos expressivos desses parâmetros em relação aos materiais sem cobertura. Tal comportamento é atribuído à solubilidade da emulsão asfáltica em água antes que o processo de ruptura esteja totalmente completo. Tal desenvolvimento de cor e turbidez nos agregados reciclados fica melhor evidenciado nos Gráficos 12 e 13.

Os resultados referentes aos sólidos totais para o lixiviado proveniente de esgoto e agregados da granulometria 2, apresentados na Tabela 8 (g), mostram que o agregado reciclado misto sem cobertura acarreta numa maior concentração de sólidos em relação ao agregado reciclado de concreto, o que pode ser atribuído à friabilidade relacionada à pasta de cimento, como visto na Tabela 1. A cobertura asfáltica ocasionou em uma diminuição do teor de sólidos no agregado reciclado de cimento, o que não aconteceu com o agregado reciclado misto. Ainda em relação aos sólidos, não houve diferença estatística entre as concentrações obtidas a partir do agregado natural em comparação com os agregados reciclados.

Analisando os dados obtidos para a concentração de fósforo, conforme Tabela 8 (f), foi possível constatar que os agregados reciclados sem cobertura apresentam comportamento semelhante para a granulometria 1. A cobertura asfáltica não mostrou diferença em relação aos agregados sem cobertura, diferente da parafina, que se mostrou eficiente na diminuição da concentração de fósforo total.

Com relação à concentração de nitrogênio amoniacal os resultados apresentados na Tabela 8 (h) indicam que a cobertura asfáltica somente foi eficiente quando combinada com o agregado reciclado misto. Já a parafina resultou em diminuição nos teores de nitrogênio para ambos os materiais. Foi possível perceber que os agregados reciclados são mais eficientes na diminuição da concentração de NH_4^+ do que os agregados naturais, conforme observado na Tabela 8 (h).

Os resultados obtidos para fósforo e nitrogênio vão de acordo com os resultados publicados por Yang *et al.* (2012), em que os autores comprovam a eficiência do RCD para a remoção desses nutrientes de esgoto doméstico.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do estudo foram encontrados percalços que foram relevantes no sentido de entender algumas limitações da utilização dos materiais avaliados, além de explicitar a necessidade constante de pesquisas sob diferentes abordagens.

A primeira limitação aparece já na disponibilidade do RCD no mercado. A Cooperconcre é a única empresa em Ponta Grossa que apresenta um fornecimento constante de agregado reciclado, o que é possível devido aos moldes cooperativistas em que a empresa foi estabelecida.

Apesar de contar com um fornecimento constante do produto, a Cooperconcre disponibiliza o agregado reciclado em somente duas maneiras: o agregado reciclado misto e o agregado reciclado de concreto, ambos sem nenhum controle granulométrico, o que encarece e muitas vezes inviabiliza a utilização desse material em qualquer outro tipo de aplicação que não seja em pavimentação.

Outra limitação enfrentada foi a falta do equipamento específico recomendado pela ABNT para a realização de ensaios de lixiviação, o que levou à adoção de uma normatização

italiana, impossibilitando a comparação direta com resultados obtidos por outros pesquisadores brasileiros.

Em relação às atividades realizadas para o cobrimento do agregado reciclado é importante ressaltar a dificuldade técnica envolvida. A expertise necessária para a realização do cobrimento dos agregados remete aos serviços de pavimentação, demandando profissionais e equipamentos dificilmente inseridos no ramo do saneamento.

Mesmo que o cobrimento dos agregados esteja ligado ao ramo da pavimentação, as misturas se mostraram difíceis de serem executadas, tendo em vista que a normatização e a expertise do ramo se baseiam no uso predominante de agregados naturais e de granulometrias contínuas, situação oposta do estudo realizado, em que foram aplicados agregados reciclados de granulometria uniforme.

Ainda sobre as dificuldades enfrentadas em relação às misturas para o cobrimento, ressalta-se a utilização da parafina, que consiste em um material dotado de propriedades não exploradas no ramo da pavimentação nem do saneamento, acarretando, portanto, um desafio acerca de sua manipulação.

Uma das principais limitações enfrentadas, amplamente relatada no meio científico, consiste na alta variabilidade encontrada nos agregados provenientes de RCD. Esse fator se soma a outras limitações, como as dificuldades encontradas no cobrimento, por exemplo, acarretando em possíveis distorções de resultados ou em resultados pouco conclusivos.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho não é suficiente para recomendações assertivas quanto à utilização de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais em sistemas de tratamento de água e de esgoto, pois são muitas as questões envolvidas. Contudo os resultados obtidos indicam diversas lacunas a serem avaliadas para que essa substituição seja validada ou não.

Tendo em vista a sensibilidade da qualidade necessária ao final de um sistema de tratamento de água e os impactos que o agregado reciclado causa nessa qualidade, os resultados apontam para uma inviabilidade nessa utilização.

Já se tratando dos resultados obtidos para o esgoto secundário o potencial de utilização é maior, uma vez que os parâmetros não sofreram tanta variação como constatado nas análises feitas com água potável e os padrões de potabilidade são muito mais restritivos do que os padrões de lançamento de efluentes tratados.

Fica totalmente aberto o leque de possibilidades em relação ao uso de agregados reciclados em sistemas de tratamentos industriais, uma vez que nesse caso os parâmetros de interesse são mais específicos, assim como os processos, possibilitando o emprego do RCD em etapas isoladas do tratamento.

Abrem-se lacunas em relação às misturas realizadas, sendo necessário mais estudos referentes às técnicas aplicadas e materiais utilizados.

Outra situação que deve ser avaliada consiste na promoção de regimes hidráulicos fiéis aos diversos sistemas de tratamento onde se vislumbre a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, uma vez que o procedimento adotado no presente trabalho foi genérico.

A utilização do RCD em sistemas de tratamento de água ou efluentes, assim como outras aplicações, também está sujeita a uma melhor qualidade do material, uma vez que a variabilidade na composição desse agregado leva a incertezas que inviabilizam seu uso.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K.. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 186, p.262-281, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
- ALI, Imran; GUPTA, V K. Advances in water treatment by adsorption technology. **Nature Protocols**, [s.l.], v. 1, n. 6, p.2661-2667, jan. 2007. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/nprot.2006.370>
- AMADEI, Daysa Ione Braga *et al.* A QUESTÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: UM BREVE ESTADO DA ARTE. **Revista Nupem**, Campo Mourão, v. 5, n. 3, dez. p. [n.i.] 2011.
- ANGULO, Sérgio Cirelli *et al.* Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 16, n. 3, p.299-306, set. 2011.
- ANGULO, Sérgio Cirelli *et al.* 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, jun. 2013.
- APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. New York DC, 1998. 1569p.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6300. Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211. Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005. Procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26. Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, ABNT, 2000.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27. Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, ABNT, 2006.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem.** Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, ABNT, 2006.

BARBUDO, Auxi *et al.* Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Waste Management**, [s.l.], v. 32, n. 6, p.1229-1235, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.005>.

BARRETO, M. L. Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001 215p.

BENHELAL, Emad *et al.* Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 51, p.142-161, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.

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, Seção 1, p.95-95, 17 de Julho de 2002.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998 e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, 3 Ago. 2010.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E.. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.178-189, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>.

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**, [s.l.], v. 276, p.302-311, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.033>.

BUTERA, Stefania; CHRISTENSEN, Thomas H.; ASTRUP, Thomas F.. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, [s.l.], v. 44, p.196-205, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>.

CAMPOS, Adriana Fiorotti. Gestão dos recursos energéticos para o desenvolvimento de uma matriz mais renovável no Estado do Espírito Santo. **Espacios**, [s. l.], v. 37, n. 24, p. [n. i.], maio 2016.

CARDOSO, Rafaela *et al.* Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, [s.l.], v. 49, p.131-145, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>.

COLOMBO, Laila Gicelli Engel *et al.* Emprego De Brita, Cerâmica Vermelha E Concretos Como Meios Suporte De Reator Anaeróbio No Tratamento De Lixiviado De Aterro Sanitário.

In: Simpósio Internacional De Qualidade Ambiental, 7., 2010, Porto Alegre. **Proceedings...** Porto Alegre: Abes, 2010. p. [s.n.]

ENGELSEN, Christian J. *et al.* Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 427-428, p.86-97, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.021>.

GÁLVEZ-MARTOS, José-luis *et al.* Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 136, p.166-178, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>.

GALVÍN, Adela P. *et al.* Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.1207-1214, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.091>.

GALVÍN, Adela .p. *et al.* Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: Physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete. **Waste Management**, [s.l.], v. 34, n. 9, p.1693-1704, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.001>.

GOMES, Carlos Valério Aguiar. Ciclos econômicos do extrativismo na Amazônia na visão dos viajantes naturalistas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.129-146, abr. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1981.81222018000100007>.

GUERRERO, Lilliana Abarca; MAAS, Ger; HOGLAND, William. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste Management**, [s.l.], v. 33, n. 1, p.220-232, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>

GEUS, Lúcio Marcos de. **Modelo De Apoio Para A Definição Da Localização De Pontos De Entrega Voluntária Para Pequenos Geradores De Resíduos De Construção E Demolição**. 2016. 160 f. Tese (Doutorado) - Curso de Gestão Urbana, Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, Curitiba, 2016.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: Seminário de Resíduos Sólidos e Domiciliares, 2000, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: CETESB, 2000. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228600228_Reciclagem_de_residuos_da_construcao>. Acesso em 14 set. 2016.

KOSSON, David S *et al.* An Integrated Framework for Evaluating Leaching in Waste Management and Utilization of Secondary Materials. **Environmental Engineering Science**, S.l., v. 19, n. 3, p.159-204, 2012.

KUMARA, G.M.P. Reviews On The Applicability Of Construction And Demolition Waste As Low-Cost Adsorbents To Remove-Heavy Metals In Wastewater. **International Journal Of Geomate**, [s.l.], v. 14, n. 42, p.44-51, 1 fev. 2018. International Journal of Geomate. <http://dx.doi.org/10.21660/2018.42.7148>.

LASSO, Paulo Renato Orlandi *et al.* Caracterização de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) para utilização como corretivo da acidez do solo. In: **Embrapa Instrumentação-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE

INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos, SP Anais do SIAGRO: ciência, inovação e mercado 2014. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 481-484. Editores: Carlos Manoel Pedro Vaz, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, Silvio Crestana., 2014.

LEITE, Fabiana da Conceição *et al.* Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 6, p.2972-2979, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>.

LUSTY, P. A. J.; GUNN, A. G.. Challenges to global mineral resource security and options for future supply. **Geological Society, London, Special Publications**, [s.l.], v. 393, n. 1, p.265-276, 23 jun. 2014. Geological Society of London. <http://dx.doi.org/10.1144/sp393.13>.

MANJATE, E. S. *et al.* First stage of the French vertical flow constructed wetland system: experiments with the reduction of surface area and number of units. **Journal Of Water, Sanitation And Hygiene For Development**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.50-55, 7 jul. 2014. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/washdev.2014.009>.

MARTÍNEZ, A.L., CORTÁZAR, A. L. G. **Emisiones en vertederos de residuos de construcción y demolición: un caso de estudio**. VSUR-REDISA. 2013.

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1, p.75-96, jun. 2012.

MIKAMI, Rafael Jansen. **Lixiviação De Sulfato E Metais Pesados Em Concreto Permeável Produzido Com Agregado Reciclado De Resíduos Sólidos Da Construção Civil**. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Associação Ampla Entre Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e Universidade Estadual do Centro-oeste (Unicentro), Ponta Grossa, 2016.

NETO, José Biscaino; RABELO, Gabriel Coimbra; FREIRE, Rosane. EFEITO DA POLUIÇÃO HÍDRICA DEVIDO AO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [s.l.], v. 3, n. 20, p.186-202, 3 set. 2015. ANAP - Associação Amigos de Natureza de Alta Paulista. <http://dx.doi.org/10.17271/2318847232020151065>.

ROQUE, A.j. *et al.* Assessment of Environmental Hazardous of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) from Laboratory and Field Leaching Tests Application in Road Pavement Layers. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 143, p.204-211, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.026>.

SILVA, Margarete Bernal de Lima e. **Novos Materiais À Base De Resíduos De Construção E Demolição (RCD) E Resíduos De Produção De Cal (RPC) Para Uso Na Construção Civil**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Novos Materiais À Base de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e Resíduos de Produção de Cal (RPC) Para Uso na Construção Civil, 2014.

SILVA, R.V.; BRITO, J. de; DHIR, R.k.. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 65, p.201-217, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.

SCHNEIDER, M. *et al.* Sustainable cement production—present and future. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 7, p.642-650, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>.

ULUBEYLI, Serdar; KAZAZ, Aynur; ARSLAN, Volkan. Construction and Demolition Waste Recycling Plants Revisited: Management Issues. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 172, p.1190-1197, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.139>.

YANG, Xianhe. Exploring the environmental impact of China's exploitation and utilization of mineral resources. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 170, p.1-5, jul. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/170/3/032001>.

YANG, Y. *et al.* Enhanced P, N and C removal from domestic wastewater using constructed wetland employing construction solid waste (CSW) as main substrate. **Water Science And Technology**, [s.l.], v. 66, n. 5, p.1022-1028, set. 2012. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2012.277>.