

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

RAFAEL JANSEN MIKAMI

LIXIVIAÇÃO DE SULFATO E METAIS PESADOS EM CONCRETO PERMEÁVEL
PRODUZIDO COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL

PONTA GROSSA
2017

RAFAEL JANSEN MIKAMI

LIXIVIAÇÃO DE SULFATO E METAIS PESADOS EM CONCRETO PERMEÁVEL
PRODUZIDO COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll

Co-orientadora:

Prof.^a Dr.^a Ana Carolina Barbosa Kummer

PONTA GROSSA

2017

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

Mikami, Rafael Jansen

M636 Lixiviação de sulfato e metais pesados em concreto permeável produzido com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil/ Rafael Jansen Mikami. Ponta Grossa, 2017.
100f.

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

Orientadora: Profª Drª Maria Magdalena Ribas Döll.

Coorientadora: Profª Drª Ana Carolina Barbosa Kummer.

1.Lixiviação. 2.Pavimento poroso. 3.Agregado reciclado. 4.Drenagem. I.Döll, Maria Magdalena Ribas. II. Kummer, Ana Carolina Barbosa. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. T.

CDD: 628.4



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



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Lixiviação de Sulfato e Metais Pesados em Concreto Permeável Produzido com Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos da Construção Civil”**

Nome: **Rafael Jansen Mikami**

Orientadora: **Profª Drª Maria Magdalena Ribas Döll**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. Flavio Bentes Freire
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

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

Ponta Grossa, 31 de março de 2017.

*À minha mãe Hilda, inspiração e
alegria da minha vida.
À minha família, que me apoiou em
todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre está presente em minha vida, me guiando e sustentando todos os dias.

À minha família, pelo apoio, suporte e compreensão durante toda a elaboração do trabalho.

À professora Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll, pela orientação e contribuição na realização deste trabalho.

À professora Dr.^a Ana Carolina Barbosa Kummer, pela coorientação, compartilhamento de sua experiência e toda a contribuição no mestrado.

Aos professores Ms. Patricia Kruger e Dr. Eduardo Pereira, por todo o incentivo, apoio e por sempre estarem dispostos a ajudar.

Aos acadêmicos Mateus Edilson Gomes Dobrovolski e Patricia Serbai, que fizeram parte deste projeto e contribuíram no seu desenvolvimento.

Aos laboratoristas Cícero Wislei Fernandes Guerellus e Paulo Ubirajara dos Santos, pelo auxílio nas análises.

A todos os colegas e amigos que me apoiaram e contribuíram para a elaboração do trabalho.

A professora Dr.^a Elizabeth Weinhardt Oliveira Scheffer, por ter disponibilizado o seu laboratório e sua disposição em ajudar.

A Zero Resíduos, pelo fornecimento dos materiais utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Laboratório de Engenharia de Materiais e ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu), pelo auxílio e realização de análises.

“A única maneira de não cometer erros é fazendo nada. Este, no entanto, é certamente um dos maiores erros que se poderia cometer em toda uma existência”.

(Confúcio)

RESUMO

O uso de agregados reciclados na confecção de concretos tem sido estudado como uma forma de reutilizar os resíduos da construção civil. Entretanto, esses agregados podem conter contaminantes, havendo o risco da lixiviação de poluentes, principalmente em locais expostos ao ambiente, como pisos e calçadas. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi verificar a liberação de sulfatos e metais pesados na água pela lixiviação de concreto permeável confeccionado com agregados graúdos reciclados. Seis tipos de agregados foram produzidos com distribuição granulométrica uniforme, sendo um agregado convencional e os demais agregados reciclados. Para cada tipo de agregado, contendo diferentes teores de cerâmica, foram confeccionados corpos de prova de concreto. Para a realização do teste de lixiviação, corpos de prova de concreto permeável foram imersos em água ultrapura, sendo esta renovada após 24, 48, 168 e 384 h do início do ensaio. A água lixiviada foi analisada quanto ao pH, condutividade elétrica, alcalinidade, a demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais, sulfatos e elementos potencialmente tóxicos (Cr, Cd, Zn, Pb, Cu). Verificou-se que todos os concretos produzidos apresentaram coeficiente de permeabilidade acima do valor mínimo recomendado para uso como pavimento permeável, de $0,10 \text{ cm.s}^{-1}$. No entanto, a resistência à compressão máxima obtida foi de 10,15 MPa, não atingindo o mínimo para utilização em pavimentos (20 MPa). A incorporação de material cerâmico no agregado resultou em um crescente aumento na absorção de água. Os testes de lixiviação demonstraram que o pH do lixiviado de concreto se manteve alcalino, atingindo um valor médio geral de 11,5. A condutividade elétrica ao longo do experimento aumentou, demonstrando que o concreto continuou a liberar íons ao longo do período de 16 dias. A concentração média de sulfato no lixiviado variou entre 21,3 e 71,7 mg.L^{-1} após 24 h de ensaio, reduzindo gradualmente até a última coleta, na qual a concentração se situou entre 2,4 e 21,6 mg.L^{-1} . Não foi constatada relação direta entre a concentração de sulfato e o teor de material cerâmico no agregado. No entanto, verificou-se visualmente que um corpo de prova estava contaminado com gesso, o que implicou em uma concentração de sulfato cinco vezes superior às demais amostras do mesmo tratamento, elevando a média do tratamento. Foram detectadas quantidades significativas de cromo no lixiviado, principalmente do concreto confeccionado com agregado 100% cerâmico, que liberou 0,083 mg.L^{-1} de cromo. Em todos os tratamentos verificaram-se concentrações de cádmio no lixiviado entre 0,009 e 0,113 mg.L^{-1} , ultrapassando o limite máximo de 0,005 mg.L^{-1} , estabelecido pela Norma Brasileira (NBR) 10004:2004.

Palavras-chave: lixiviação, pavimento poroso, agregado reciclado, drenagem

ABSTRACT

The use of recycled aggregates for producing concrete has been studied as a way to reuse construction waste. However, these aggregates may contain contaminants that may cause the leaching of pollutants, especially in open places, such as floors and sidewalks. Thus, the objective of this study was to verify the releasing of sulfates and heavy metals in the water by leaching of pervious concrete made of recycled aggregates. Six types of aggregates were produced with uniform granulometric distribution. One of the aggregates was conventional aggregate and the other ones were recycled aggregates. For each type of aggregate, containing different ceramic contents, concrete specimens were made. To perform the leaching test, pervious concrete specimens were immersed in ultrapure water, which was renewed after 24, 48, 168 and 384 h from the start of the test. The leached water was analyzed for pH, electrical conductivity, alkalinity, chemical oxygen demand (COD), total solids, sulfates and potentially toxic elements (Cr, Cd, Zn, Pb, Cu). It was verified that all concretes produced had a permeability coefficient above the minimum recommended value for use as a pervious pavement, of $0,10 \text{ cm.s}^{-1}$. However, the maximum compressive strength obtained was 10,15 MPa, not reaching the minimum for use in pavements (20 MPa). The incorporation of ceramic material in the aggregate resulted in an increase in water absorption. The leaching tests showed that the pH of the concrete leachate remained alkaline, reaching an overall average value of 11,5. The electrical conductivity throughout the experiment increased, demonstrating that the concrete continued to release ions over the 16 day period. The mean sulfate concentration in the leachate varied between 21,3 and 71,7 mg.L^{-1} after 24 h of the test, gradually reducing until the last sampling, in which the concentration was between 2,4 and 21,6 mg.L^{-1} . No direct relationship between the sulfate concentration and the ceramic content in the aggregate was observed. However, it was visually verified that a specimen was contaminated with gypsum, implying a sulfate concentration five times higher than the other samples of the same treatment, increasing the mean of the treatment. Significant quantities of chromium were detected in the leachate, mainly of the concrete made with 100% ceramic aggregate, which released 0,083 mg.L^{-1} of chromium. In all treatments, cadmium concentrations in the leachate were between 0,009 and 0,113 mg.L^{-1} , exceeding the maximum limit of 0,005 mg.L^{-1} , established by Brazilian Standard (NBR) 10004:2004.

Keywords: leaching, porous pavement, recycled aggregate, drainage

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Camadas constituintes de um pavimento permeável com infiltração total	20
Figura 2	Anel de infiltração para determinação do coeficiente de permeabilidade.....	22
Figura 3	Permeâmetro de carga variável para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos.....	23
Quadro 1	Traços de concreto permeável produzidos com agregados convencionais e os respectivos valores de resistência à compressão aos 28 dias e coeficiente de permeabilidade	26
Figura 4	Reciclagem de resíduos de construção e demolição por meio da trituração em forma de agregado	29
Figura 5	Concentração de Mo, Cr e V no lixiviado de resíduos de construção, em função do pH	35
Figura 6	Concentração de Cd, Cu, Pb e Zn no lixiviado de resíduos de construção, em função do pH.....	36
Quadro 2	Condições de ensaio para obtenção do lixiviado de amostras sólidas	37
Figura 7	Fluxograma com etapas realizadas neste trabalho	39
Figura 8	Agregado reciclado misto, após a trituração de resíduos de construção e demolição contendo concreto e material cerâmico, na granulometria brita 1	42
Figura 9	Tijolos cerâmicos e corpos de prova de concreto após a trituração em laboratório	43
Quadro 3	Propriedades físicas dos agregados analisadas e respectivas metodologias de ensaio	44
Quadro 4	Composição química média do cimento CP II-F-32 utilizado na confecção do concreto permeável.....	44
Figura 10	Moldagem dos corpos de prova cilíndricos em tubos de 10 cm de PVC, com compactação manual utilizando soquete metálico	45
Figura 11	Esquema da montagem do permeâmetro, adaptado para corpos de prova confeccionados em moldes de PVC.....	46

Quadro 5	Propriedades físicas do concreto permeável e respectivas metodologias de ensaio	48
Figura 12	Amostras de concreto permeável do tratamento A-NAT, imersas em água ultrapura e respectivas repetições.....	49
Quadro 6	Metodologias de ensaio dos parâmetros físico-químicos do lixiviado de concreto.....	50
Figura 13	Fotografia das amostras de concreto permeável confeccionado com agregado na granulometria 12,5/9,5 mm (A) e granulometria 19/12,5 mm (B). Vista superior do corpo de prova da granulometria 12,5/9,5 mm (C) e granulometria 19/12,5 mm (D)	52
Figura 14	Valores médios de coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis produzidos com diferentes tipos de agregado	56
Figura 15	Correlação entre os valores médios de índice de volume de vazios e coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis	57
Figura 16	Valores médios de resistência à compressão axial dos concretos permeáveis produzidos com diferentes tipos de agregado	58
Figura 17	Correlação entre a resistência e o índice de volume de vazios do concreto permeável.....	60
Figura 18	Correlação entre a resistência à compressão e a massa específica aparente dos concretos permeáveis	61
Figura 19	Corpos de prova de concreto dos tratamentos (A) A-NAT, (B) AR-0 e (C) AR-25	61
Figura 20	Valores médios de condutividade elétrica do lixiviado dos concretos com diferentes tipos de agregado ao longo de 16 dias de imersão em água	64
Figura 21	Valores médios de alcalinidade total do lixiviado de concreto ao longo de 16 dias de imersão em água ultrapura e sua composição em carbonatos e hidróxidos	65
Figura 22	Valores médios da concentração de sulfato no lixiviado dos concretos com diferentes tipos de agregado após 24 h de imersão em água	67
Figura 23	Corpo de prova do tratamento AR-10 contaminado com gesso (A) durante o ensaio de lixiviação e (B) após término do ensaio	71
Figura 24	Concentração acumulada de cromo no lixiviado, ao longo de 16 dias de ensaio	76

Figura 25	Concentração acumulada de cádmio no lixiviado, ao longo de 16 dias de ensaio	77
Figura 26	Concentração acumulada de cromo liberada pelo concreto, ao longo de 16 dias de ensaio.....	78
Figura 27	Concentração acumulada de cádmio liberada pelo concreto, ao longo de 16 dias de ensaio.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Concentração máxima permitida de elementos potencialmente tóxicos no lixiviado, expressos em mg.L-1.....	32
Tabela 2	Permeabilidade dos concretos em função da faixa granulométrica dos agregados	51
Tabela 3	Análise visual da composição do RCD segundo procedimentos da NBR 15116:2004	53
Tabela 4	Valores médios de absorção e massa específica dos agregados utilizados na confecção do concreto permeável	53
Tabela 5	Caracterização química dos agregados por meio de fluorescência de raios X	55
Tabela 6	Valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos concretos permeáveis.....	56
Tabela 7	Propriedades físicas e químicas da água de imersão do teste de lixiviação	62
Tabela 8	Resultados médios das propriedades físicas e químicas do lixiviado ao longo do tempo	63
Tabela 9	Consumo de cimento e traço em massa e volume dos concretos permeáveis.....	66
Tabela 10	Concentração de sulfato na amostra de concreto contaminado com gesso, em comparação com amostras não contaminadas do tratamento AR-10	71
Tabela 11	Concentração média de três repetições de elementos potencialmente tóxicos no lixiviado do concreto	73
Tabela 12	Análise de variância para os coeficientes de permeabilidade dos concretos elaborados com diferentes dimensões de agregado.....	97
Tabela 13	Análise de variância para os coeficientes de permeabilidade dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados.....	97
Tabela 14	Análise de variância para as resistências aos 28 dias dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados.....	97

Tabela 15	Análise de variância para o índice de volume de vazios dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados.....	97
Tabela 16	Análise de variância para a absorção dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados.....	97
Tabela 17	Análise de variância para a massa específica real dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados.....	98
Tabela 18	Análise de variância para a massa específica aparente dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados.....	98
Tabela 19	Resumo da análise de variância para parâmetros do lixivado após 24 h de ensaio	100
Tabela 20	Resumo da análise de variância para parâmetros do lixivado após 72 h de ensaio	100
Tabela 21	Resumo da análise de variância para parâmetros do lixivado após 168 h de ensaio	100
Tabela 22	Resumo da Análise de variância para parâmetros do lixivado após 384 h de ensaio	100
Tabela 23	Resumo da análise de variância para concentração de cromo e cádmio no lixiviado	100

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CE	Condutividade Elétrica
CV	Coeficiente de Variação
DMS	Diferença Mínima Significativa
DQO	Demanda Química de Oxigênio
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de Vinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL	19
3.2 CONCRETO PERMEÁVEL	21
3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	22
3.3.1 Permeabilidade	22
3.3.2 Índice de volume vazios	24
3.3.3 Resistência à compressão	25
3.3.4 Características dos concretos permeáveis.....	26
3.4 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	27
3.4.1 Classificação dos resíduos de construção e demolição	28
3.4.2 Reciclagem de RCD	28
3.5 LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	30
3.5.1 Elementos potencialmente tóxicos	31
3.5.2 Sulfatos	33
3.5.3 Mecanismos de lixiviação	34
3.5.4 Influência do pH na liberação de metais.....	34
3.5.5 Ensaio de lixiviação	36
4 METODOLOGIA	39
4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	39
4.2 CONFEÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	40
4.2.1 Escolha do traço.....	40
4.2.2 Granulometria.....	41
4.2.3 Preparo do agregado.....	41
4.2.4 Caracterização dos agregados.....	43

4.2.5 Moldagem dos corpos de prova	44
4.2.6 Permeabilidade do concreto permeável	46
4.2.7 Propriedades físicas e mecânicas.....	47
4.3 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO	49
4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1 GRANULOMETRIA	51
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	52
5.2.1 Composição do RCD.....	52
5.2.2 Características físicas e químicas dos agregados	53
5.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	55
5.4 ANÁLISE DO LIXIVIADO	62
5.5 ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS	72
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.6.1 Considerações sobre o teste de lixiviação	79
5.6.2 Considerações gerais.....	81
6 CONCLUSÕES	84
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE A – Análise estatística das propriedades do concreto	96
APÊNDICE B – Análise estatística da caracterização do lixiviado	99

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das cidades tem provocado grandes alterações hidrológicas, principalmente pelo fato de a pavimentação causar a impermeabilização do solo (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). Como consequência, há um aumento no escoamento superficial da água durante precipitações.

Os sistemas de drenagem de águas pluviais são responsáveis pela coleta e transporte desse volume que passa a escoar superficialmente. Um sistema de drenagem urbano precário está diretamente relacionado a problemas de inundações, que não são fenômenos recentes e existem de forma natural antes mesmo do surgimento de centros urbanos (TUCCI, 2003). No entanto, a ampliação ou substituição dos componentes do sistema de águas pluviais geram custos elevados.

Uma forma eficiente no controle de águas pluviais e drenagem é reduzir a impermeabilização do solo utilizando-se pavimento permeável (TUCCI, 2003). Esse tipo de pavimento é um mecanismo de infiltração, permitindo a passagem da água pelo seu interior.

O concreto permeável é um dos materiais que pode compor o revestimento do pavimento permeável. Embora não seja uma tecnologia nova, seu uso na drenagem urbana tem sido estudado de forma mais ampla recentemente (HÖLTZ, 2011). É possível substituir no concreto permeável os agregados naturais ou convencionais (brita de origem basáltica, granítica ou calcária) por reciclados para reduzir a exploração de matéria-prima.

Sendo um material de pavimentação considerado sustentável, as diversas vantagens do concreto permeável podem incentivar a sua utilização, ampliando os estudos feitos com agregados reciclados, como o resíduo de construção e demolição (RCD).

A reutilização dos resíduos de construção e demolição no setor de construção civil oferece diversas vantagens do ponto de vista ambiental. O RCD usualmente compõe a maior parte dos resíduos sólidos gerados no ambiente urbano (BUTERA et al., 2015). Dessa forma, a reciclagem desses materiais proporciona a redução de resíduos destinados a aterros. Além disso, a substituição dos agregados convencionais por reciclados reduz a exploração das jazidas naturais.

Entretanto, o estudo sobre a utilização de concretos permeáveis confeccionados com RCD ainda deve ser aprofundado, pois agregados reciclados podem liberar elementos potencialmente tóxicos por meio da lixiviação (GALVÍN et al., 2014a), oriundos da contaminação com outros produtos, uma vez que não há separação de materiais nas obras civis, o que pode limitar sua utilização.

Medina; Frías e Rojas (2014) citam que dependendo da sua origem, os agregados reciclados podem conter metais, ânions (como sulfatos) e compostos orgânicos, que lixiviam em contato com a água da chuva, tornando-se um risco ao ambiente e à saúde humana. Butera; Christensen e Astrup (2014) comentaram que a lixiviação dos resíduos podem contaminar o solo e as águas subterrâneas, causando efeito tóxico ao ecossistema e potencial risco à saúde humana devido a contaminação indireta. Rey et al. (2015) também observaram a lixiviação de sulfatos em agregados reciclados, principalmente quando há uma maior quantidade de material cerâmico na sua composição.

Além disso, os pavimentos permeáveis são estruturas que estão em contato direto com o solo e águas subterrâneas, de forma que qualquer poluente liberado pelo material pode oferecer risco de contaminação. Sendo assim, este estudo envolve a avaliação da lixiviação em concreto permeável produzido com agregados reciclados, visando a análise do impacto na qualidade da água.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a lixiviação de sulfato e metais pesados da água percolada de diferentes traços de concreto permeável confeccionado com resíduos de construção e demolição com diferentes teores de material cerâmico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Confeccionar concretos permeáveis com agregados reciclados utilizando diferentes teores de material cerâmico;
- Analisar a concentração sulfato, cromo e cádmio na água percolada dos concretos;
- Verificar a influência do material cerâmico na liberação de sulfato, cromo e cádmio;
- Avaliar ao longo do tempo a lixiviação do concreto permeável e a influência do tipo de agregado utilizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No sistema de drenagem convencional, parte da água precipitada escoar superficialmente até as galerias de águas pluviais, que possuem a função de conduzi-la até a sua disposição final. Entretanto, o processo de urbanização tem sobrecarregado esse sistema, gerando inundações em centros urbanos. Fatores que contribuem para a ocorrência de enchentes são a impermeabilização do solo e o dimensionamento inadequado das galerias de águas pluviais (TUCCI, 2008).

Segundo Tucci (2003), uma das medidas de controle de drenagem urbana é a infiltração. Essa é uma solução de baixo custo, visando a redução do volume de água que escoar superficialmente. O pavimento permeável é uma das técnicas que se enquadra nessa medida de controle. Essa estrutura é capaz de controlar o volume de escoamento superficial, promovendo recarga das águas subterrâneas (PARANÁ, 2002).

3.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL

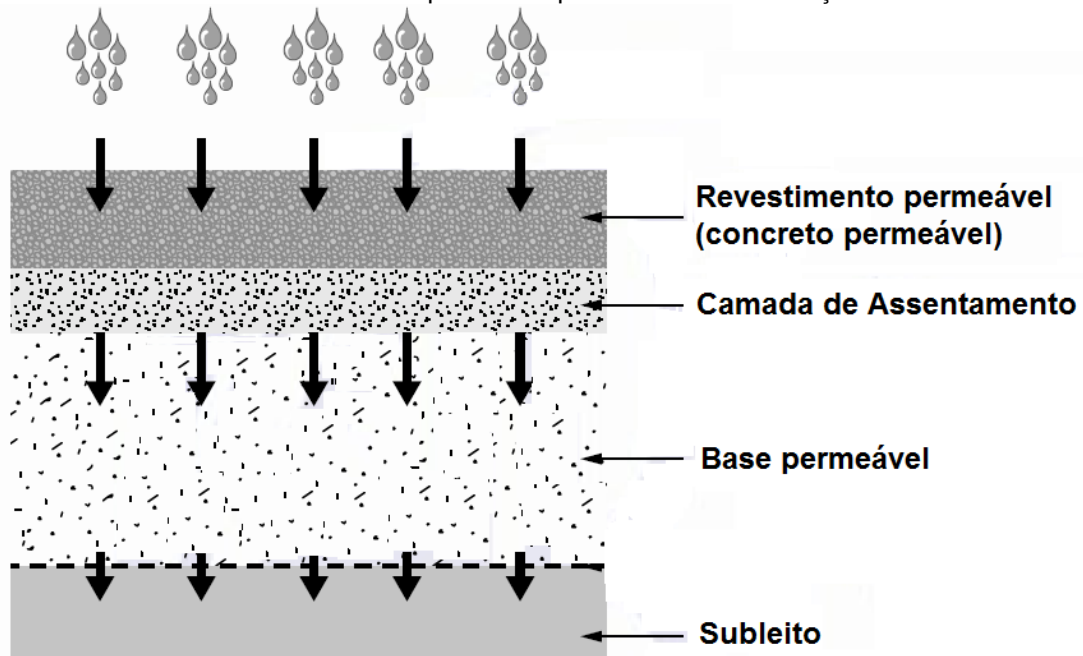
Um pavimento permeável consiste em uma medida de controle de drenagem urbana com o objetivo de facilitar a infiltração da água da chuva, podendo armazenar um determinado volume temporariamente (LIAN; ZHUGE, 2010). Esse sistema é basicamente composto por um revestimento permeável assentado em uma base permeável.

As características do pavimento poroso são influenciadas diretamente pela permeabilidade do solo. De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015) os pavimentos permeáveis podem ser compostos por sistemas de infiltração total, infiltração parcial ou sem infiltração, conforme descrito a seguir:

- a) Infiltração total: é o sistema no qual toda a água captada pelo pavimento infiltra no solo. É utilizado em solos com permeabilidade superior a 10^{-3} m.s^{-1} ;
- b) Infiltração parcial: parte da água que atinge o subleito é captada por meio de drenos, ocorrendo infiltração do restante. O subleito deve apresentar permeabilidade mínima de 10^{-5} m.s^{-1} ;
- c) Sem infiltração: nos solos com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-5} m.s^{-1} a água captada pelo pavimento fica armazenada temporariamente na base, sendo totalmente removida por meio de drenos.

Na Figura 1 estão ilustradas as camadas que formam o pavimento permeável com sistema de infiltração total.

Figura 1 – Camadas constituintes de um pavimento permeável com infiltração total



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416 Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Conforme a Figura 1, o revestimento é a camada externa do pavimento permeável. Essa camada tem como objetivo captar parte das águas pluviais, evitando um escoamento superficial excessivo. Diferentes revestimentos podem ser utilizados a fim de tornar um pavimento permeável. Os principais tipos de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015) são o pavimento intertravado, peças de concreto vazadas e o concreto permeável. A norma estabelece ainda que em revestimento constituídos por peças ou placas de concreto deve ser utilizada uma camada de assentamento composta por materiais pétreos de granulometria aberta.

A base permeável é uma camada intermediária, usualmente constituída por um material granular, como a brita. De acordo com Tucci (2003), a base tem como objetivo armazenar temporariamente a água da chuva durante as precipitações, visto que a infiltração da água no solo é um processo lento. De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015) o dimensionamento da camada de base é realizado em função da precipitação, a área de contribuição e a taxa de infiltração do solo. No sistema sem infiltração ou infiltração parcial ainda são utilizados drenos para realizar a coleta

da água contida na base. Esse volume de água pode ainda ser armazenado para posterior reutilização.

Segundo Tennis; Leming e Akers (2004), esse tipo de pavimento é uma alternativa para a drenagem urbana que apresenta vantagens, como a redução do escoamento superficial, a recarga de águas subterrâneas e ainda a redução de custos envolvidos com o manejo de águas pluviais.

Embora seja possível a sua utilização em passeios, estacionamentos e ruas de pouco tráfego, o seu emprego é limitado quando a água drenada é contaminada, visto que nessa situação ocorrerá impacto no lençol freático e no escoamento subterrâneo (TUCCI, 2003).

Um dos materiais que podem ser utilizados na confecção de pavimentos porosos é o concreto permeável. Embora não seja uma tecnologia recente, o material tem sido estudado como uma alternativa eficaz no controle da drenagem urbana (PERERA et al., 2013; ALENCAR; CABRAL, 2013; HÖLTZ, 2011).

3.2 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é uma mistura de cimento, água e agregado graúdo, formando um material com alto índice de vazios (IBRAHIM et al., 2014). De acordo com Hölztz (2011) a permeabilidade do concreto está diretamente relacionada com o volume de vazios interligados. A ausência de agregado miúdo na mistura torna isto possível, porém, a resistência do concreto é reduzida como consequência.

Segundo Huang et al. (2010) o concreto permeável já é usado há mais de 50 anos, principalmente nos Estados Unidos e Japão. De acordo com Bhutta; Tsuruta e Mirza (2012) devido às propriedades do concreto permeável, o mesmo pode ser utilizado em calçadas, estacionamentos, ruas com pouco tráfego e em áreas externas de edificações. Segundo Hölztz (2011) o concreto permeável possibilita trocas de calor entre o solo e a superfície, o que auxilia no equilíbrio da temperatura terrestre.

Em função dos benefícios ambientais citados, o concreto permeável pode ser considerado um material sustentável. Além disso, há a possibilidade de utilizar agregados reciclados na sua confecção, como o resíduo de construção e demolição. O reaproveitamento de resíduos da construção civil no próprio setor é uma prática consolidada em muitos países europeus (RODRÍGUEZ et al., 2015). Entretanto, no

Brasil muitos estudos estão sendo realizados com o objetivo de ampliar o seu emprego como agregado reciclado.

3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

3.3.1 Permeabilidade

A permeabilidade é uma das principais propriedades do concreto poroso. No estudo da condutividade hidráulica de solos, a permeabilidade é a capacidade de um material permitir escoamento de água pelo seu interior (CAPUTO, 2015). Esse conceito pode ser aplicado ao concreto permeável, que se comporta como uma camada de solo conduzindo água. Essa propriedade é medida por meio do coeficiente de permeabilidade.

No Brasil, a NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece o método do anel de infiltração para a determinação do coeficiente de permeabilidade de um pavimento permeável. O ensaio consiste em analisar o tempo necessário para a água escoar por um cilindro padronizado posicionado acima do pavimento, conforme Figura 2.

O método do anel de infiltração permite a análise do coeficiente de permeabilidade em pavimentos já executados, evitando a extração de corpos de prova.

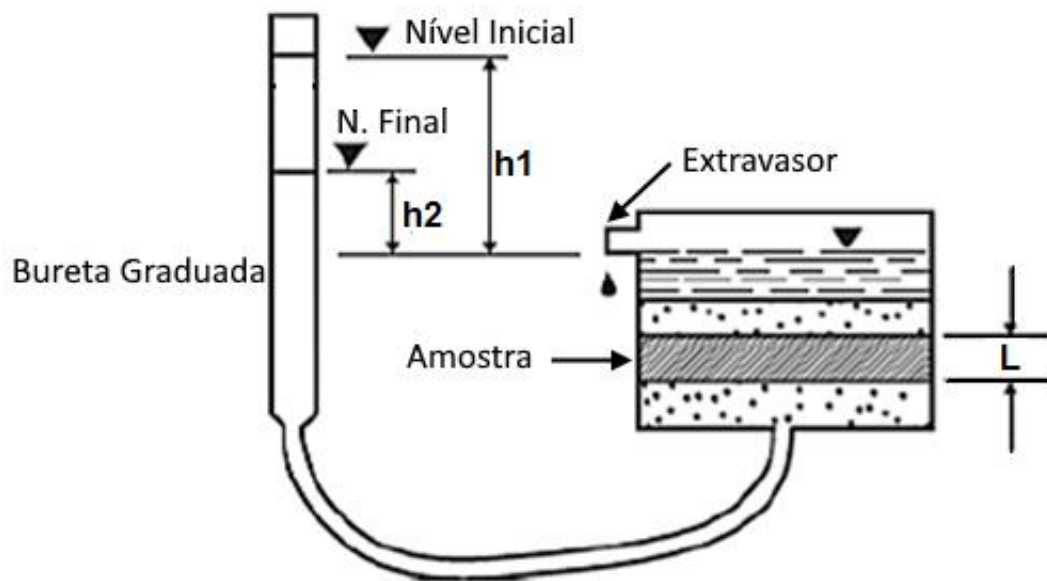
Figura 2 – Anel de infiltração para determinação do coeficiente de permeabilidade



Fonte: LAMB, G. S. Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados com concreto permeável. 2014, 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Outro método frequentemente empregado nas pesquisas envolvendo o concreto permeável é o permeâmetro de carga variável. Esse equipamento se baseia na Lei de Darcy, sendo também utilizado no estudo da permeabilidade dos solos. Na Figura 3 está ilustrado de forma esquemática o permeâmetro de carga variável.

Figura 3 – Permeâmetro de carga variável para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos



Fonte: CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações – Fundamentos. v. 1, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

Nesse equipamento, o material estudado é colocado em um recipiente interligado a uma bureta graduada preenchida com água. A amostra é disposta em uma camada com altura L . O tempo necessário para a água se deslocar do nível inicial h_1 para o nível final h_2 (em relação ao extravasor do recipiente) permite estimar o coeficiente de permeabilidade do material analisado, expresso em cm.s^{-1} . A vantagem do permeâmetro de carga variável é a possibilidade de analisar corpos de prova moldados em laboratório, como feito nos estudos de Hölitz (2011), Ibrahim et al. (2014) e Perera et al. (2013).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece que um pavimento recém construído deve apresentar um coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} m.s^{-1} . Entretanto, segundo Marchioni e Silva (2013) o coeficiente mínimo para considerar um pavimento permeável é $1,40.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. Esse valor garante o funcionamento hidráulico do pavimento ao longo de sua vida útil.

A permeabilidade do concreto é variável, sendo influenciada pelas características do agregado utilizado e o traço da mistura. A utilização apenas de agregados graúdos é o principal fator para promover um elevado índice de vazios no material. Entretanto, a distribuição granulométrica possui grande influência nesse parâmetro, bem como em outras propriedades mecânicas do material (ĆOSIĆ et al., 2015).

Crouch; Pitt e Hewitt (2007) afirmaram que agregados com distribuição granulométrica uniforme usualmente proporcionam uma maior permeabilidade, ainda oferecendo boa resistência ao concreto. Bhutta; Tsuruta e Mirza (2012) também citam que agregados com granulometria uniforme aliados a um baixo fator água-cimento são essenciais para a produção do concreto permeável.

3.3.2 Índice de volume vazios

O índice de volume de vazios de um concreto no estado endurecido é definido pela NBR 9778 (ABNT, 2005) como a relação entre os volumes de poros permeáveis à água e o volume total do material. O concreto permeável, diferente do convencional, possui uma grande quantidade de vazios em seu interior. De acordo com Neithalath; Sumanasooriya e Deo (2010) o índice de vazios do concreto poroso varia entre 15 e 30%, o que lhe garante boa permeabilidade e o torna eficiente na drenagem de água. Os concretos convencionais apresentam índice de vazios menores. Paiva (2013) verificou valores em torno de 12 % de vazios no concreto convencional.

Embora o índice de vazios esteja diretamente associado à permeabilidade, é fundamental que existam vazios interligados (HÖLTZ, 2011). Segundo Ćosić et al. (2015) a dimensão e o tipo de agregado utilizado são fatores fundamentais na quantidade de vazios do concreto. Os autores verificaram que os agregados com dimensão entre 4 e 8 mm e 8 e 16 mm proporcionam maior volume de vazios do que agregados com dimensões menores, entre 0 e 4 mm.

É importante notar também que o traço utilizado para a confecção do concreto é de grande importância na quantidade de vazios formados. Teixeira (2013) observou que o aumento do fator água-cimento reduziu o índice de vazios. Isto ocorreu devido a maiores quantidades de água permitirem que a pasta de cimento

preencha mais facilmente os espaços vazios da mistura, prejudicando assim a sua permeabilidade.

3.3.3 Resistência à compressão

As propriedades do concreto são variáveis, podendo ser ajustadas de acordo com sua composição. A distribuição granulométrica do agregado, o traço da mistura e o fator água-cimento são os principais fatores que influenciam na resistência (HÖLTZ, 2011). Isso torna a dosagem dos materiais um processo importante para a confecção de concretos.

A quantidade de vazios no concreto permeável tem influência direta na resistência à compressão do material. No estudo de Deo e Neithalath (2010), o aumento no índice de vazios de 17 para 27% reduziu em aproximadamente 50% a resistência à compressão. Isso pode ser prejudicial em algumas aplicações do concreto permeável, como em pavimentos permeáveis para tráfego leve.

Zaetang et al. (2016a) relataram que a resistência desse material pode variar de 2,8 a 28 MPa, sendo influenciada principalmente pela pasta de cimento, visto que o agregado normalmente é mais resistente. Segundo Tennis; Leming e Akers (2004) o valor típico de resistência para o concreto permeável convencional é de 17,0 MPa.

Além disso, a utilização de agregados reciclados como alternativa tende a resultar em concretos com menor resistência. Tavares e Kazmierczak (2016) verificaram uma redução de 46% na resistência em função da substituição do agregado natural pelo reciclado. Os autores explicam que isso pode ocorrer devido à existência de microfissuras nos agregados reciclados. Entretanto, no trabalho de Zaetang et al. (2016a) a substituição de 60% do agregado natural por resíduos de concreto promoveu um aumento de resistência, para um traço de 1:4,54. Dessa forma, a utilização de agregados reciclados nem sempre é prejudicial.

No Brasil, a NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece que as peças de concreto permeável devem apresentar uma resistência à compressão mínima de 20 MPa, aos 28 dias. Embora não exista distinção na resistência conforme o tipo de solicitação, a norma exige as espessuras mínimas de 6,0 e 8,0 cm para o tráfego de pedestres e tráfego leve de veículos, respectivamente.

3.3.4 Características dos concretos permeáveis

Diferentes tipos de misturas já foram utilizados no estudo de concretos permeáveis convencionais, resultando em materiais com características distintas. No Quadro 1 estão relacionados alguns estudos com os respectivos traços e fatores água/cimento da mistura, assim como os resultados obtidos de resistência à compressão e de coeficiente de permeabilidade. É importante notar que os estudos foram desenvolvidos com agregados convencionais.

Quadro 1 – Traços de concreto permeável produzidos com agregados convencionais e os respectivos valores de resistência à compressão aos 28 dias e coeficiente de permeabilidade

Autor	Traço em Massa (Cimento:Agregado) – Fator Água/Cimento	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	Coeficiente de Permeabilidade (cm.s⁻¹)
JOSHAGHANI et al. (2015) ¹	1:4,0 – 0,35	9,4	0,88
	1:4,6 – 0,35	7,2	1,57
	1:7,6 – 0,35	6,2	1,63
IBRAHIM et al. (2014)	1:6 – 0,35	6,95	1,84
	1:8 – 0,30	3,92	2,41
	1:10 – 0,35	1,71	2,75
	1:12 – 0,35	1,83	2,82
TAVARES; KAZMIERCZAK (2016) ¹	1:2,40 – 0,32	21,10	0,00
	1:3,30 – 0,33	21,83	0,50
	1:4,00 – 0,30	14,60	1,50
	1:4,80 – 0,32	10,83	1,80
PEREIRA; BARBOSA (2015)	1:4,2 – 0,30	10,5	0,13
BATEZINI; BALBO (2015)	1:4,4 – 0,30	n.d. ²	0,70
BHUTTA; TSURUTA; MIRZA (2012) ¹	1:5,0 – 0,27	12	3,30
	1:5,45 – 0,30	15	0,25
	1:6,90 – 0,27	14	2,10
ZAETANG et al. (2016a) ¹	1:4,55 – 0,24	13	1,01

Fonte: O autor.

Notas: ¹ Traço aproximado. No trabalho original a dosagem do material foi realizada por consumo de cimento e agregado por m³ de concreto.

² Propriedade não determinada no trabalho.

É possível verificar no Quadro 1 que a resistência à compressão do concreto e o coeficiente de permeabilidade são influenciados pelo traço adotado na mistura. Os estudos de Joshaghani et al. (2015) e Ibrahim et al. (2014) mostraram que a resistência à compressão tendeu a reduzir proporcionalmente com a redução da quantidade de cimento na mistura. Em contrapartida, o coeficiente de permeabilidade aumentou nos traços com menor teor de cimento.

Tavares e Kazmierczak (2016) obtiveram concretos com permeabilidade coerente com os traços adotados, porém a resistência à compressão foi superior aos outros trabalhos. É importante notar que o tipo de agregado pode ter influenciado

nos resultados, visto que em cada trabalho foram utilizados materiais de diferentes composições e origens conforme a sua disponibilidade.

Bhutta; Tsuruta e Mirza (2012) obtiveram coeficientes de permeabilidade incoerentes com os demais estudos, porém houve a influência da granulometria dos agregados utilizados. O mesmo pode ter ocorrido no trabalho de Pereira e Barbosa (2015), no qual o concreto analisado resultou em baixa permeabilidade. Além disso, deve-se considerar também a metodologia adotada na determinação do parâmetro.

Não há uma proporção exata entre cimento e agregado para ser utilizada no concreto permeável. Os estudos apontam que a resistência e a permeabilidade são inversamente proporcionais. Entretanto, a situação ideal é atingir o maior coeficiente de permeabilidade atendendo a resistência mínima estabelecida pelas normas técnicas. Conforme Tennis; Leming e Akers (2004) o traço usualmente varia de 1:4 a 1:4,5 em massa, com fator água/cimento variando de 0,27 a 0,34. O traço 1:5 já foi estudado e oferece valores de permeabilidade suficientes para a utilização do concreto permeável em pavimentos permeáveis, sendo o fator água/cimento de 0,30 um valor médio usualmente utilizado.

3.4 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), os resíduos de construção e demolição (RCD) são os “resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos”.

Diversos materiais compõem o RCD. Concreto, madeira, metais, tijolos, materiais cerâmicos, vidros, misturas betuminosas e gesso são exemplos da constituição de um resíduo da construção civil (VIEIRA, 2015).

É importante notar que a composição desses materiais varia em função de diversos fatores, como a etapa da construção, tipo de atividade (construção, pavimentação, demolição ou reforma) e o método construtivo empregado. De acordo com Oliveira et al. (2011) estimou-se que no Brasil 65% do RCD é composto por fragmentos de origem mineral.

3.4.1 Classificação dos resíduos de construção e demolição

A NBR 15116 (ABNT, 2004) classifica os resíduos da construção civil conforme a sua composição, existindo quatro classes (A, B, C e D). A Classe A é composta por resíduos que podem ser reutilizados como agregados, tais como argamassas, concretos e componentes cerâmicos. As demais classes reúnem resíduos para os quais não há processo de reciclagem viável, resíduos perigosos, contaminados ou que podem ser reciclados para outras finalidades.

Os RCD que se enquadram na Classe A podem ser divididos, ainda, em dois grandes grupos. Os agregados de resíduo de concreto (ARC) são agregados reciclados cuja composição deve ser de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Os agregados reciclados que apresentam composição inferior a esse limite são denominados de agregado de resíduo misto (ARM).

3.4.2 Reciclagem de RCD

Um dos principais recursos empregados na construção civil é o agregado. De acordo com Frazão (2002, p.12), o termo agregado é utilizado para designar um “material granular encontrado na natureza ou proveniente da fragmentação mecânica”. A NBR 7211 (ABNT, 2005) classifica esses materiais em dois tipos:

- a) Agregado graúdo: material com grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm;
- b) Agregado miúdo: material com grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m.

Diversas são as aplicações dos agregados para a construção civil, destacando-se a confecção de concreto e obras de pavimentação. As principais rochas utilizadas são o basalto e granito, que possuem elevada resistência mecânica, propriedade importante em elementos estruturais (FRAZÃO, 2002).

De acordo com Dahlbo et al. (2015) a grande disponibilidade e o baixo custo de agregados naturais são barreiras que impedem a busca por materiais alternativos. Entretanto, um dos problemas na exploração dos recursos naturais é o

alto consumo de energia, devido à produção e transporte dos materiais (OIKONOMOU, 2005). Além disso, o custo dos agregados tende a aumentar em função do esgotamento de materiais de boa qualidade em conjunto com o aumento do custo do transporte (BEHERA et al. 2014).

Uma alternativa ao alto consumo de recursos naturais é a utilização de resíduos da construção como agregados reciclados. O uso do RCD já é bem difundido em alguns países da Europa, com índices que podem atingir até 80% de reutilização (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2014).

A reciclagem de resíduos é feita basicamente pela trituração do material em partículas de menor dimensão, havendo a remoção de materiais indesejados, como a madeira e o plástico (BEHERA et al., 2014). Os autores salientam ainda que diversos trituradores podem ser utilizados no processo, como os britadores de mandíbula e por impacto.

Na Figura 4 é ilustrada uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição, localizada no município de Ponta Grossa.

Figura 4 – Reciclagem de resíduos de construção e demolição por meio da trituração em forma de agregado



Fonte: O autor.

Vieira et al. (2015) comentaram que o uso de agregados reciclados foi marcado pela Segunda Guerra Mundial, com o uso de tijolos triturados na confecção de concretos para a reconstrução das edificações. Segundo Rodríguez et al. (2015) atualmente existe grande variabilidade no reuso de resíduos. Os autores citaram que

países como Holanda, Estônia, Alemanha e Dinamarca aproveitam em torno de 75% do RCD, enquanto que Grécia, Portugal, Hungria e Espanha utilizam menos de 15%.

No Brasil, a utilização de agregados reciclados é limitada à pavimentação e ao preparo de concreto não estrutural, sendo permitida a utilização apenas dos resíduos da Classe A, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004). A norma técnica limita ainda os teores de materiais não minerais (madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos) e torrões de argila em 2% em relação à massa total de agregado.

Segundo Angulo et al. (2013) técnicas de separação podem ser empregadas visando um material de melhor qualidade. Entre os métodos utilizados no beneficiamento do RCD estão: o tratamento térmico e moagem, separação densitária a úmido e a separação óptica. O emprego de uma etapa de separação implica diretamente em maiores custos do agregado reciclado, porém será cada vez mais necessária para a viabilidade técnica da sua utilização.

Embora pela NBR 10004 (ANBT, 2004) possam ser classificados como materiais inertes, os RCD podem conter contaminações originárias na etapa de construção (JOHN; AGOPYAN, 2000). Pesquisas indicaram que a lixiviação de resíduos da construção pode liberar poluentes e alterar a qualidade da água, oferecendo assim um risco ambiental (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2014; GALVÍN et al., 2014a; SHAEFER, 2007).

3.5 LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Embora muitos benefícios ambientais sejam alcançados pelo uso de pavimentos permeáveis confeccionados com agregado reciclado (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004), é necessário analisar os potenciais riscos que o material pode oferecer à água, quando esta infiltrar pelo seu interior.

De acordo com Engelsen et al. (2010) a análise de lixiviação é uma das formas de avaliar o impacto ambiental dos materiais de construção e demolição, principalmente quando estes estão em contato com o solo e águas subterrâneas. O concreto permeável é um exemplo de material que se enquadra nessa situação, sendo importante verificar a lixiviação do material.

No estudo de Galvín et al. (2014a) foi constatado que o RCD utilizado como material de pavimentação liberou elevadas quantidades de Cr, Se e sulfato no

lixiviado. Isso mostra que é necessário um cuidado na utilização de agregados reciclados, principalmente quando há o risco da contaminação de mananciais ou águas subterrâneas.

Os concretos convencionais confeccionados com agregados reciclados também podem liberar poluentes no lixiviado. Jacob et al. (2009) verificaram a presença de Cr, As, Zn e Cd na água lixiviada de concretos convencionais confeccionados com RCD. Galvín et al. (2014b) também confirmaram que agregados reciclados continham metais como Cr, Pb, Cu e verificaram que houve liberação dos elementos na lixiviação dos concretos confeccionados com esses materiais.

Devido ao alto índice de vazios do pavimento permeável, uma maior área superficial do material estará em contato com a água durante precipitações. Consequentemente, é esperada uma potencialização da lixiviação nesse material. Conforme verificado no estudo de Solpuker et al. (2014), o lixiviado do concreto poroso continha Cu, Pb e Zn, apresentando também um pH alcalino.

O concreto permeável contendo agregados reciclados pode, então, apresentar uma elevada concentração de elementos potencialmente tóxicos e alterar a qualidade da água que infiltra no solo. Assim, torna-se fundamental verificar se a utilização desse material irá alterar a qualidade da água.

3.5.1 Elementos potencialmente tóxicos

No Brasil, a presença de elementos potencialmente tóxicos provenientes de resíduos sólidos é limitada pela NBR 10004 (ABNT, 2004). De acordo com a norma brasileira, resíduos sólidos submetidos a testes de lixiviação não podem apresentar concentrações de poluentes superiores aos estabelecidos pelos padrões de potabilidade da legislação brasileira (BRASIL, 2011). Nota-se que mesmo contendo elevadas quantidades de poluentes, deve-se levar em consideração a quantidade que é efetivamente liberada pelo material.

A concentração limite de elementos potencialmente tóxicos varia em função da legislação de cada país, existindo também diferentes metodologias para a análise do resíduo sólido.

Na Tabela 1 estão expostos os valores máximos permitidos (VMP) para alguns elementos, de acordo com as legislações brasileira, italiana e europeia.

Tabela 1 – Concentração máxima permitida de elementos potencialmente tóxicos no lixiviado, expressos em mg.L^{-1}

Elemento	Símbolo	NBR 10004 (ABNT, 2004)	Legislação Italiana (ITÁLIA, 1998)	EU Landfill Directive (BARBUDO et al., 2012) ¹
Antimônio	Sb	0,005	-	0,006
Arsênio	As	0,010	0,050	0,050
Bário	Ba	0,700	1,000	2,000
Cádmio	Cd	0,005	0,005	0,004
Chumbo	Pb	0,010	0,050	0,050
Cobre	Cu	2,000	0,050	0,200
Cromo	Cr	0,050	0,050	0,050
Mercúrio	Hg	0,001	0,001	0,001
Selênio	Se	0,010	0,010	0,010
Sulfato	SO_4^{2-}	250,0	250,0	100,0

Fonte: O autor.

Nota: ¹Valores originalmente expressos em mg.kg^{-1} , para relação entre solução extratora e amostra de 10 L/kg.

De acordo com Piveli e Kato (2006), os elementos potencialmente tóxicos, mesmo em concentrações pequenas, podem oferecer risco à saúde e ao meio ambiente. Segundo Righetto (2009) e Piveli e Kato (2006), as características dos principais contaminantes estão descritas a seguir:

- a) Arsênio: é um metal utilizado em produtos de preservação de madeira e relacionado a atividades industriais de produtos como vidros, tintas e corantes. Também pode ser encontrado na água devido ao desgaste de rochas que o contenham. Apresenta efeito cumulativo, sendo a dose fatal de 130 mg;
- b) Bário: pode ocorrer naturalmente na água devido ao desgaste de rochas ígneas e sedimentares. A dose fatal para o homem é de 550 a 600 mg, causando constrição dos vasos sanguíneos e afetando o sistema nervoso;
- c) Cádmio: é detectado em cursos d'água com despejo de efluentes industriais. É um metal irritante gastrointestinal, podendo levar à morte em doses superiores a 9,0 mg;
- d) Chumbo: em altas concentrações provoca o envenenamento, afetando o sistema nervoso central. Concentrações de 0,1 a 0,4 mg.L^{-1} são nocivas para a vida aquática;
- e) Cobre: é encontrado naturalmente nas águas em baixas concentrações, que podem ser benéficas ao organismo humano. Em altas concentrações promove gosto na água;

- f) Cromo: é um elemento empregado em processos de tratamento de superfícies metálicas. Possui efeito corrosivo no aparelho digestivo;
- g) Selênio: é um não-metal presente na água devido a efluentes industriais, sendo tóxico ao homem e animais.

A viabilização do uso de agregados reciclados na confecção de pavimentos permeáveis deve contemplar a análise do impacto ambiental causado pelo material. A água que passa pelo pavimento deve ter a sua qualidade preservada, sendo isenta de elevadas concentrações de elementos potencialmente tóxicos. Isso deve ocorrer para evitar a contaminação das águas subterrâneas e também permitir o reuso da água captada pelo sistema em atividades como a irrigação (NNADI et al., 2015).

3.5.2 Sulfatos

De acordo com Rey et al. (2015) o sulfato está presente em agregados reciclados devido ao gesso, fragmentos de cerâmica e à argamassa aderida às partículas. Segundo Barbudo et al. (2012) o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é a principal fonte de sulfato nos resíduos de construção e demolição, no entanto sua presença decorre da contaminação do material. A presença de gesso é um fator limitante na utilização de agregados reciclados para a confecção de concretos.

No estudo de Barbudo et al. (2012) não foi verificada uma relação direta entre a concentração de gesso em agregados reciclados e a concentração de sulfatos no lixiviado. Isso confirma que partículas de cerâmica e argamassas também podem liberar sulfatos em concentração significativa, podendo alcançar valores acima de 250 mg.L^{-1} .

O íon sulfato pode comprometer a durabilidade do concreto, motivo pelo qual sua concentração em agregados é limitada. O ataque por sulfato pode ocorrer pela expansão e fissuração do concreto, permitindo que a água penetre com maior facilidade no material e acelerando a sua deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2008). As consequências do fenômeno são a redução da resistência do concreto, acompanhada de perda de massa em função da falta de coesão dos produtos de hidratação do cimento.

Müllauer; Beddoe e Heinz (2012) verificaram também que a exposição do concreto a altas concentrações de sulfato pode aumentar a lixiviação de cromo e

vanádio. Devido ao comprometimento da durabilidade do concreto e à possível potencialização da lixiviação de elementos potencialmente tóxicos, a verificação da lixiviação de sulfatos é fundamental.

A NBR 15116 (ABNT, 2004) limita a concentração de sulfatos em 1% em relação à massa de agregado. No que se refere à presença de sulfatos no extrato lixiviado de resíduos sólidos, a NBR 10004 (ABNT, 2004) limita a concentração em $250,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a fim de ser possível a sua utilização como agregado reciclado. Esse limite coincide com o valor máximo permitido pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

3.5.3 Mecanismos de lixiviação

Embora na composição do concreto e dos agregados exista uma concentração elevada de elementos potencialmente tóxicos, o impacto ambiental deve ser avaliado pela concentração de elementos no lixiviado (GALVÍN et al., 2014a). Van der Sloot (2000) verificou que para a maioria dos elementos não há uma forte relação entre a sua concentração e lixiviação. Um dos motivos é o processo de lixiviação ser influenciado por diversos fatores, como a quantidade de água em contato com o material analisado, a sua geometria, temperatura ambiente e o pH do meio líquido (SCHIOPU et al., 2009).

Segundo Mullauer; Beddoe e Heinz (2012) os elementos presentes no concreto são lixiviados por dissolução da superfície ou dissolução e difusão da água presente nos poros do concreto. Neste último caso, a lixiviação depende da porosidade do concreto e a estrutura dos poros. De acordo com van der Sloot (1998) a lixiviação acontece de forma distinta em materiais na forma monolítica (amostra na forma de corpo de prova) e granular (amostra na forma triturada). Dessa forma, os materiais devem ser analisados da forma mais próxima de sua utilização.

3.5.4 Influência do pH na liberação de metais

Os estudos desenvolvidos sobre a lixiviação do concreto permeável e de agregados reciclados podem apresentar uma variação em função da metodologia empregada. Um dos fatores com maior influência na liberação de metais no lixiviado é o pH do meio líquido. Segundo Maciel (2015), condições ácidas favorecem a

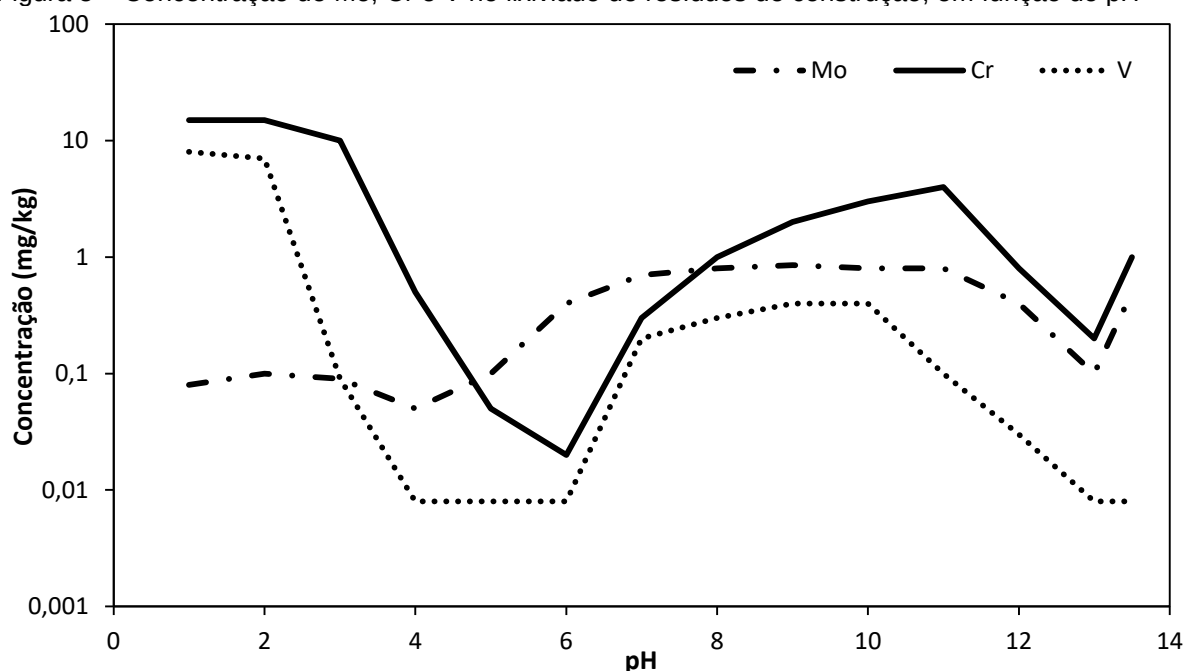
solubilidade de alguns metais em função da tendência que os mesmos têm na formação de óxidos. No entanto, existem metais que são liberados em maior concentração em condições alcalinas.

O concreto usualmente apresenta caráter alcalino, sendo o pH da solução dos poros aproximadamente 13,0 ou superior (ENGELSEN et al., 2012). Segundo Corinaldesi et al. (2009), a presença de íons alcalinos no concreto é responsável pelo elevado pH do lixiviado. Entretanto, segundo Engelsen et al. (2012) o pH tende a reduzir ao longo do tempo, visto que em condições alcalinas ocorre a carbonatação do concreto, consumindo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de concreto. De acordo com os autores, o pH atinge valores inferiores a 10,0, formando uma região de carbonatação, ocorrendo influência na liberação de metais no lixiviado.

Galvín et al. (2014b) verificaram que elementos como Zn, Cu, Ni, Pb e Cd são liberados em maior concentração em meios ácidos, enquanto que o Mo, Se, As, Sb e Cr foram detectados em maior quantidade em pH neutro.

No estudo de Engelsen et al. (2010), verificou-se que elementos como Cr, Mo e V apresentaram lixiviação máxima em uma faixa de pH de 7,0 a 11,0 (Figura 5). É importante notar que a faixa de pH entre 1 e 2 não corresponde a condições naturais, ocorrendo degradação da pasta de cimento. Elementos como Cd, Cu, Pb e Zn apresentaram concentração máxima em um pH inferior a 6,0 (Figura 6).

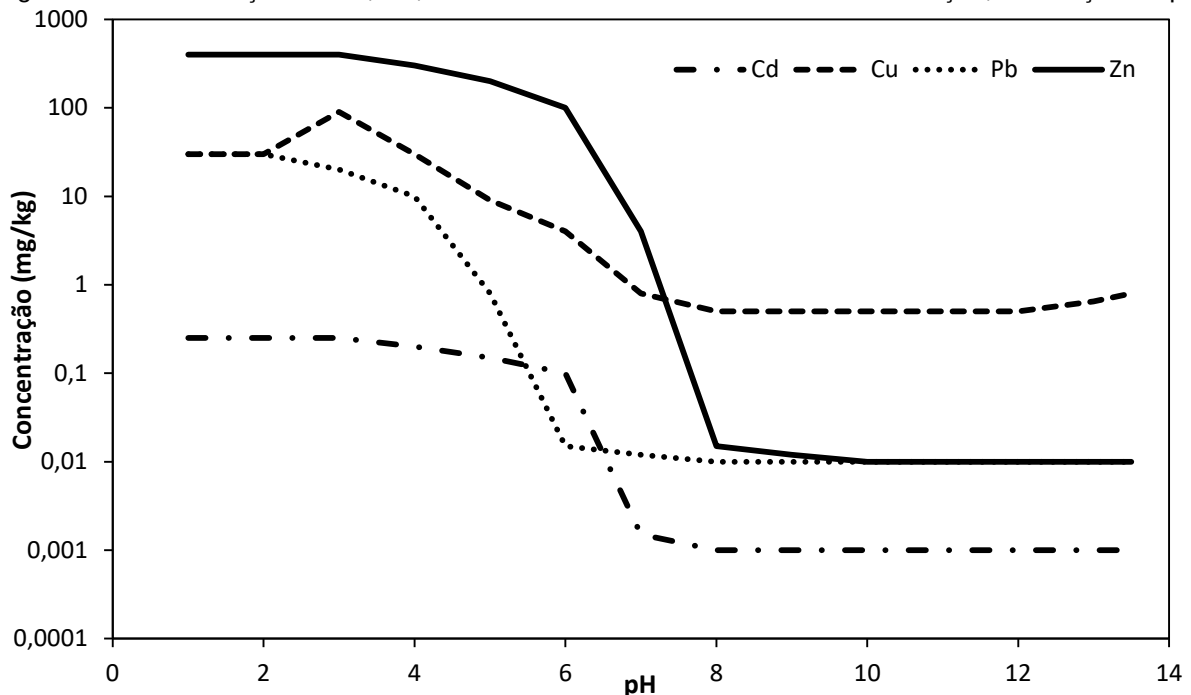
Figura 5 – Concentração de Mo, Cr e V no lixiviado de resíduos de construção, em função do pH



Fonte: Adaptado dos resultados obtidos por Engelsen et al. (2010).

Entretanto, nem todos os estudos apresentam o mesmo comportamento da lixiviação em função do pH do meio líquido. É importante lembrar que a proporção entre líquido e sólido afeta a concentração dos elementos lixiviados. No estudo de Engelsen et al. (2010) os resultados são expressos em mg do elemento lixiviado por kg da amostra de resíduos. A relação entre líquido e sólido no teste de lixiviação foi de 10 L/kg.

Figura 6 – Concentração de Cd, Cu, Pb e Zn no lixiviado de resíduos de construção, em função do pH



Fonte: Adaptado dos resultados obtidos por Engelsen et al. (2010).

3.5.5 Ensaio de lixiviação

A metodologia empregada para a obtenção do lixiviado do concreto ou agregado analisado irá influenciar diretamente na concentração dos elementos potencialmente tóxicos. Isso se deve à variação nas condições de pH, proporção líquido/sólido, tempo de execução do ensaio, forma de contato com a água (imersão ou irrigação) e estado do material (triturado ou monolítico) (VAN DER SLOOT, 1998).

Outro fator a ser considerado ainda é a diferença no comportamento dos materiais em laboratório e em campo. Segundo Engelsen et al. (2012) a lixiviação em condições reais difere quando comparada às condições de ensaio de laboratório. Os autores verificaram que a concentração de metais em condições de campo pode ser superior aos valores determinados em laboratório. Dessa forma, alguns estudos

foram realizados por meio de simulações das condições de campo (GALVÍN et al., 2014a; SCHIOPU et al., 2009).

Embora existam diferentes metodologias para a análise da lixiviação, é essencial estudar o comportamento mais próximo das condições reais. No Quadro 2 estão relacionadas as principais metodologias internacionais com as respectivas condições de ensaio.

Quadro 2 – Condições de ensaio para obtenção do lixiviado de amostras sólidas

Norma	Meio líquido	Líquido/Sólido	Tempo de ensaio	Forma do material
Method 1311 TCLP	Água destilada com pH < 5,0	20	18 h	Triturado
NF X31-211	Água desmineralizada	10	3 extrações de 16 h	Monolítico
Method 1320 MEP	Solução ácida pH 5,0 e 3,0	16 (1 extração) 20 (8 extrações)	9 extrações de 24 h	Monolítico ou Triturado
NEN 7345	Solução ácida pH 4,0	5	64 dias	Monolítico
Method 1310B EP	Solução ácida pH 5,0	20	24 h	Triturado
DIN 38414-4	Água desionizada	10	24 h	Triturado
NBR 10005	Solução ácida pH 5,0	20	18 h	Triturado
NBR 10006	Água desionizada	6	7 dias	Triturado
Legislação Italiana	Água desionizada	5	8 extrações ao longo de 16 dias	Monolítico ou Triturado

Fonte: Adaptado de KULAKOWSKI, M. P. et al. Contribuição à avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos: proposta de método para obtenção de extrato lixiviado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 69-81, out./dez. 2014.

Pode-se notar que diversas metodologias relacionadas no Quadro 2 adotam o material na forma triturada. Mesmo para a análise de agregados, a trituração do material em frações menores altera as suas propriedades físicas, ou seja, não condiz com sua forma natural.

Devido às diferentes condições de ensaio, os resultados obtidos por cada metodologia podem variar de forma não desprezível. A norma a ser adotada para a obtenção do extrato lixiviado deve ser escolhida em função do tipo de material analisado e a sua utilização.

Conforme constatado nos estudos de Engelsen et al. (2012) e Galvín et al. (2014a) é importante também verificar as condições reais às quais o material estará sujeito, visto que as condições de laboratório diferem significativamente das condições de campo.

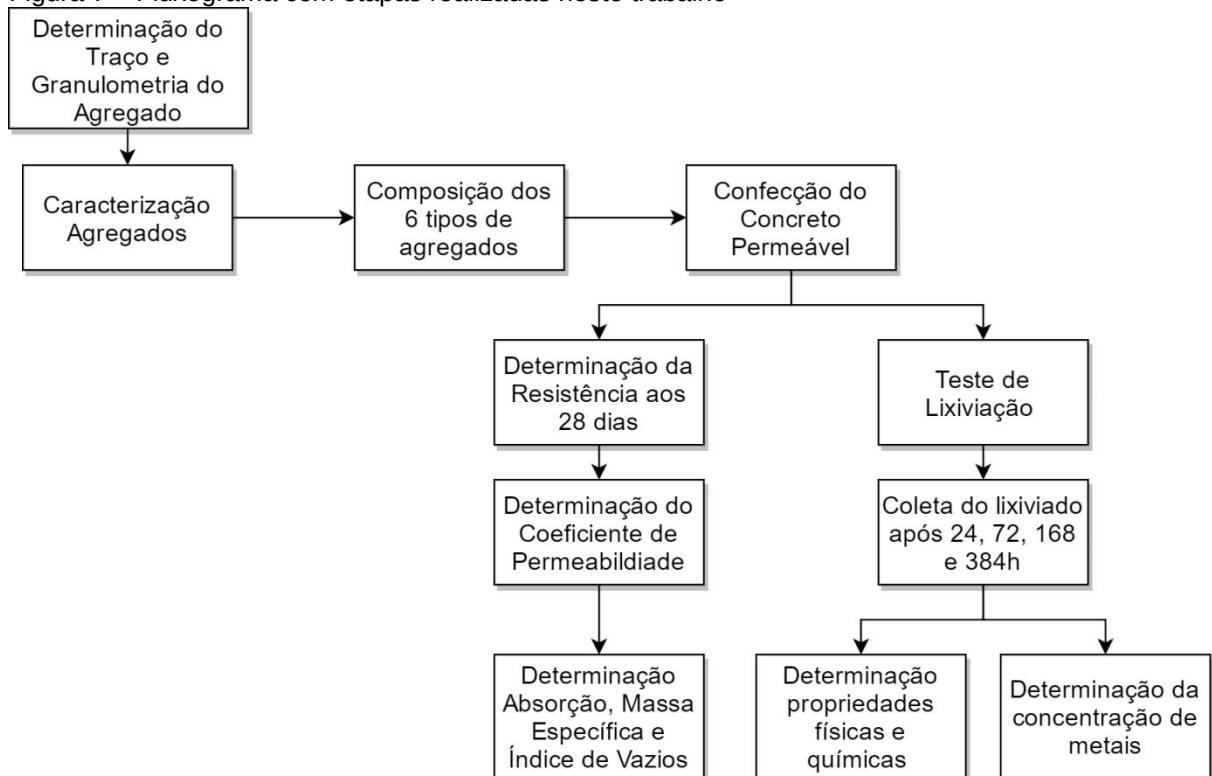
A metodologia descrita na Legislação Italiana (ITÁLIA, 1998) é um procedimento que permite a análise do concreto na forma monolítica, ou seja, em forma de blocos como são utilizados em condições reais. Dessa forma, o material não necessita ser triturado, o que interfere no processo de lixiviação. Além disso, o método permite a avaliação temporal da lixiviação do concreto, visto que são feitas coletas em oito intervalos de tempo.

4 METODOLOGIA

Este estudo foi elaborado no Laboratório de Construção Civil, Laboratório de Saneamento e Instalações Hidráulicas e no Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu), na Universidade Estadual de Ponta Grossa – Campus Uvaranas.

Na Figura 7 estão expostas as principais etapas deste estudo, desde a caracterização dos agregados utilizados na confecção do concreto permeável até a caracterização do lixiviado.

Figura 7 – Fluxograma com etapas realizadas neste trabalho



Fonte: O autor.

4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Seis tipos de agregados foram utilizados na confecção dos concretos permeáveis, sendo submetidos a um teste de lixiviação dinâmico, composto pela análise do lixiviado em 4 intervalos de tempo. As propriedades físicas e mecânicas do concreto também foram avaliadas de acordo com NBR 16416 (ABNT, 2015).

Cada concreto permeável foi elaborado com um tipo de agregado, variando-se o teor de material cerâmico em sua composição. Utilizou-se também um

agregado natural convencional, para permitir a comparação dos resultados. Os tratamentos deste estudo estão descritos a seguir:

- a) A-NAT: agregado natural – 100% brita basáltica;
- b) AR-0: agregado reciclado – 100% concreto;
- c) AR-10: agregado reciclado – 10% cerâmica + 90% concreto;
- d) AR-25: agregado reciclado – 25% cerâmica + 75% concreto;
- e) AR-50: agregado reciclado – 50% cerâmica + 50% concreto;
- f) AR-100: agregado reciclado – 100% cerâmica.

Neste experimento adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo cada tratamento representado por um concreto permeável produzido com um tipo de agregado e as variáveis de resposta as propriedades físicas e mecânicas do concreto e os parâmetros físico-químicos do lixiviado. Para cada tratamento foram utilizadas 5 repetições, com exceção da determinação da concentração de metais, utilizando-se 3 repetições.

4.2 CONFECÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Determinou-se o traço, o fator água cimento e a granulometria dos agregados de maneira que o concreto apresentasse permeabilidade suficiente para a sua utilização em pavimentos permeáveis e adequada resistência.

4.2.1 Escolha do traço

Com base nas pesquisas bibliográficas sobre o concreto permeável, adotou-se neste estudo o traço em massa 1:5 (cimento: agregado graúdo), sem a utilização de areia. Embora a utilização de traços com maior quantidade de agregado em relação ao cimento proporcione uma melhor permeabilidade, a resistência do concreto pode ser prejudicada (HÖLTZ, 2011).

Dessa forma, a utilização do traço 1:5 teve como objetivo obter concretos com resistência superior a 20 MPa aos 28 dias e coeficientes de permeabilidades superiores a $0,10 \text{ cm.s}^{-1}$, sendo suficientes para a confecção de pavimentos permeáveis.

Adotou-se neste estudo um fator água/cimento de 0,30, correspondente ao valor médio da faixa sugerida por Tennis; Leming e Akers (2004), que

recomendaram valores entre 0,27 e 0,34. Esse fator água-cimento confere ao concreto boa resistência e garante a sua permeabilidade (HÖLTZ, 2011).

Nos concretos confeccionados com agregados reciclados realizou-se a pré-molhagem dos materiais, visto que apresentaram elevada absorção. De acordo com o *American Concrete Institute* (ACI, 2010) os agregados devem ser umedecidos para garantir trabalhabilidade ao concreto, facilitando a compactação do material. Além da água utilizada na pré-molhagem dos agregados, utilizou-se o fator água-cimento 0,30 para a mistura do concreto.

4.2.2 Granulometria

Um agregado com distribuição granulométrica uniforme é capaz de produzir um concreto com alta permeabilidade (IBRAHIM et al., 2014). Entretanto, o tamanho do agregado também possui influência no material (DEO; NEITHALATH, 2010; ĆOSIĆ et al., 2015). Dessa forma, os agregados utilizados neste trabalho foram peneirados mecanicamente para obter a faixa granulométrica mais uniforme possível.

Analisaram-se duas dimensões de agregado, optando-se pela utilização do que proporcionou o maior coeficiente de permeabilidade do concreto. Uma amostra de agregado natural foi peneirada separando-se a fração passante na peneira com abertura de 19 mm e retida na peneira com abertura de 12,5 mm, formando a granulometria uniforme 19/12,5. A fração passante na peneira com abertura de 12,5 mm e retida na peneira com abertura de 9,5 mm compôs a granulometria uniforme denominada de 12,5/9,5.

Três corpos de prova de concreto foram moldados com cada tipo de agregado, submetendo-os ao ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade. Por meio da análise de variância foi determinada estatisticamente a diferença significativa entre os coeficientes de permeabilidade obtidos, permitindo assim a escolha da granulometria.

4.2.3 Preparo do agregado

Para a elaboração do concreto permeável foram preparados agregados com distribuição granulométrica uniforme, com 100% das partículas passantes na peneira

com abertura de 12,5 mm e retidas na peneira com abertura de 9,5 mm (granulometria uniforme 12,5/9,5).

O agregado natural (brita basáltica) utilizado foi obtido no Laboratório de Materiais de Construção Civil, sendo peneirado mecanicamente para adequá-lo à granulometria uniforme.

Foi utilizado como agregado reciclado amostras de RCD proveniente de uma empresa de beneficiamento de resíduos (Figura 8), localizada no município de Ponta Grossa. O material passou pelo processo de peneiramento mecânico, obtendo-se a distribuição granulométrica mais próxima do agregado natural.

Figura 8 – Agregado reciclado misto, após a trituração de resíduos de construção e demolição contendo concreto e material cerâmico, na granulometria brita 1



Fonte: O autor.

A composição do RCD foi determinada pelo método de análise visual, normalizado pela NBR 15116 (ABNT, 2004). Duas amostras de 4 kg foram separadas, sendo realizada a separação dos fragmentos de forma visual em quatro grupos:

- a) G_1 : fragmentos com pasta de cimento em mais de 50% do volume;
- b) G_2 : fragmentos compostos por rocha em mais de 50% do volume;
- c) G_3 : fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;
- d) G_4 : fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica, materiais carbonizados e contaminantes, como solo e gesso.

O material analisado foi, então, classificado em agregado reciclado de concreto (ARC) (soma dos grupos G_1 e G_2 superior ou igual a 90%) ou agregado reciclado misto (ARM) (soma dos grupos G_1 e G_2 inferior a 90%). Para variar o teor de material cerâmico do RCD foram produzidos em laboratório agregados de concreto e de tijolos cerâmicos. Corpos de prova de concreto utilizados em ensaios destrutivos no Laboratório de Materiais de Construção Civil foram triturados e peneirados na granulometria desejada. Da mesma forma, tijolos cerâmicos passaram pela trituração e o seguinte peneiramento, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Tijolos cerâmicos e corpos de prova de concreto após a trituração em laboratório



Fonte: O autor.

Para a elaboração dos 6 tipos de agregados propostos neste trabalho, foi realizada a adição de material cerâmico ao RCD. O tratamento A-NAT foi composto totalmente por brita basáltica, obtida no Laboratório de Construção Civil, da UEPG. Os tratamentos AR-0 e AR-100 foram compostos, respectivamente, por corpos de prova de concreto e tijolos cerâmicos triturados.

Os tratamentos AR-10, AR-25 e AR-50 foram compostos pelo RCD com diferentes quantidades de material cerâmico. Nos três tratamentos utilizou-se o mesmo RCD, cujo teor de cerâmica inicial era de 2,92%. Para adequar o material ao estudo em questão, adicionou-se material cerâmico de forma que os teores resultassem em 10, 25 e 50%.

4.2.4 Caracterização dos agregados

Após a trituração e peneiramento mecânico dos quatro materiais (brita basáltica, agregado de RCD, agregado cerâmico e agregado de concreto), as

propriedades físicas dos materiais foram analisadas conforme as metodologias descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades físicas dos agregados analisadas e respectivas metodologias de ensaio

Propriedade	Metodologia
Absorção de Água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa Específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Teor de Material Pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Massa Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: O autor.

A amostragem dos agregados foi feita pelo procedimento de quarteamento, Método B da norma NBR NM 27 (ABNT, 2001), garantindo a retirada de uma amostra representativa. O preparo das amostras para as análises foi realizado de acordo com cada metodologia indicada no Quadro 3. Além das propriedades físicas, também se realizou a caracterização química dos agregados por fluorescência de raios X. Para esta análise os agregados foram triturados de forma a passar pela peneira com abertura de malha de 0,075 mm, sendo analisado em um espectrômetro Shimadzu, modelo EDX-700, no laboratório de Engenharia de Materiais, da UEPG.

4.2.5 Moldagem dos corpos de prova

O concreto permeável utilizado neste trabalho foi confeccionado com uma mistura de cimento, água e agregado graúdo. Foi utilizado o cimento CP II-F-32, com composição média apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Composição química média do cimento CP II-F-32 utilizado na confecção do concreto permeável

Componente	Composição Média (%)
Al ₂ O ₃	4,23
SiO ₂	18,65
Fe ₂ O ₃	2,68
CaO	60,94
MgO	4,03
SO ₃	2,73

Fonte: ITAMBÉ (2016)

Os agregados reciclados foram molhados inicialmente com quantidade de água equivalente a sua absorção. A mistura foi realizada de forma mecânica,

obedecendo-se a sequência adotada por Teixeira (2013) e Rodrigues e Gans (2015), exposta a seguir:

- a) Adição do agregado e 50% da quantidade de água;
- b) Adição do cimento e mistura;
- c) Mistura com o restante da quantidade de água até homogeneização.

Após a mistura, o material foi colocado em moldes plásticos de PVC (Figura 10) e adensado manualmente com auxílio de um soquete metálico. O adensamento foi realizado com duas camadas, aplicando-se 12 golpes em cada uma. Nos concretos contendo material cerâmico a compactação foi feita com cuidado para evitar a ruptura dos grãos do agregado. As amostras de concreto foram cobertas com um filme plástico para evitar perda de água na cura inicial, sendo desmoldados após 3 dias, visto que o concreto permeável pode não apresentar estabilidade suficiente nas primeiras 24 h (BATEZINI; BALBO, 2015). Os corpos de prova permaneceram em cura úmida até o momento do ensaio.

Figura 10 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos em tubos de 10 cm de PVC, com compactação manual utilizando soquete metálico



Fonte: O autor.

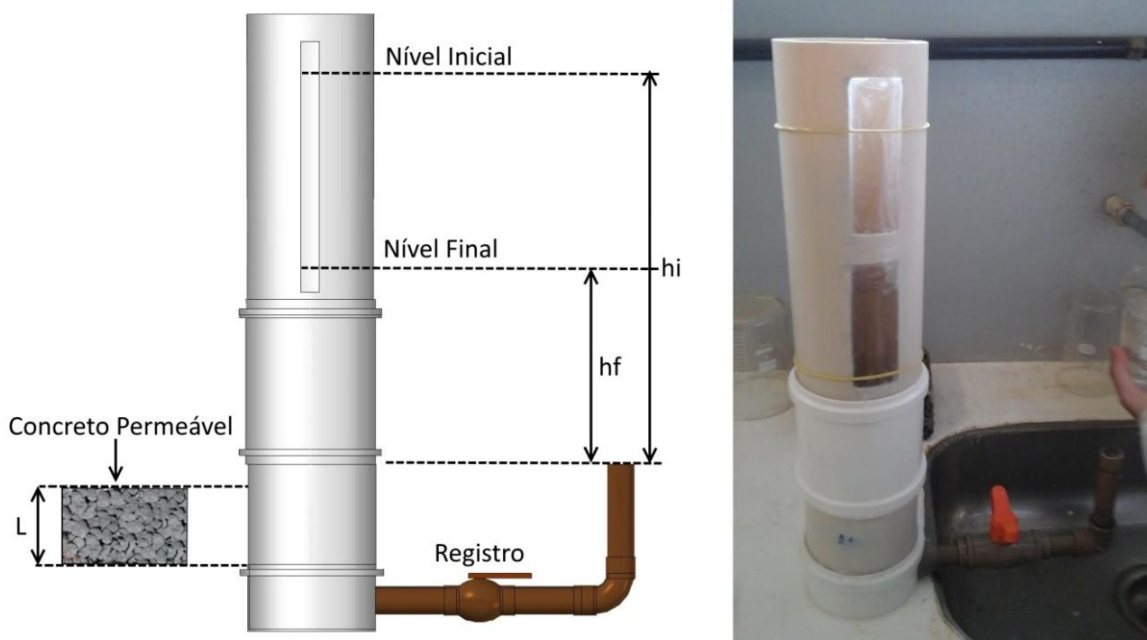
Utilizaram-se dois tipos de corpo de prova. Para a análise da resistência à compressão, coeficiente de permeabilidade e índice de vazios, moldaram-se amostras com 10 cm de diâmetro e altura de 6 cm. Para o teste de lixiviação foram confeccionados corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 6 cm de altura. A dimensão destas amostras teve como objetivo utilizar a menor quantidade de água ultrapura no teste, porém suficiente para realizar a caracterização do lixiviado. Para

cada tratamento, utilizou-se 16 corpos de prova, dos quais 5 destinaram-se à determinação da resistência à compressão aos 28 dias e do coeficiente de permeabilidade, 6 para a determinação do índice de vazios, absorção e massa específica e 5 amostras para o ensaio de lixiviação.

4.2.6 Permeabilidade do concreto permeável

A avaliação da permeabilidade do concreto permeável foi realizada utilizando um permeâmetro de carga variável, adaptado do estudo da Mecânica dos Solos. O permeâmetro foi confeccionado com configuração semelhante ao modelo utilizado por Hölitz (2011) e Neithalath (2010). O equipamento foi montado com tubos de PVC, permitindo a utilização das amostras no próprio molde. Dessa forma foi evitado o escoamento da água pelas laterais do corpo de prova, que poderia interferir nos valores de coeficiente de permeabilidade, resultando em valores maiores do que os coeficientes reais. Na Figura 11 está ilustrado o permeâmetro utilizado neste trabalho.

Figura 11 – Esquema da montagem do permeâmetro, adaptado para corpos de prova confeccionados em moldes de PVC



Fonte: O autor.

O permeâmetro possuía um corpo cilíndrico feito de tubo de PVC com 10 cm de diâmetro nominal, sendo encaixado no molde do corpo de prova com uma luva de correr. Na base do equipamento foi interligado um extravasor de 2 cm de

diâmetro, cuja extremidade se situava a um nível aproximadamente 2 cm acima do corpo de prova. Um registro de globo foi utilizado para controle do escoamento de água. Pela Lei de Darcy, o coeficiente de permeabilidade (k) no permeâmetro de carga variável é determinado pela equação 1.

$$k = \frac{A_1 \cdot L}{A_2 \cdot t} \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (1)$$

em que:

k : Coeficiente de permeabilidade ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

A_1 : Área da seção transversal da amostra (cm^2);

A_2 : Área do tubo de carga (cm^2);

L : Altura do corpo de prova cilíndrico (cm);

h_i : Nível inicial da água, em relação ao extravasor;

h_f : Nível final da água, em relação ao extravasor;

t : Tempo necessário para o nível de água passar de h_i para h_f .

O corpo de prova para o estudo da permeabilidade possuía o mesmo diâmetro do permeâmetro (diâmetro nominal 10 cm) e altura de 6 cm. Foram adotadas como nível inicial e final as alturas de 30 e 12 cm, respectivamente.

Para cada amostra o permeâmetro foi montado, sendo demarcados os níveis inicial e final, como ilustrado na Figura 11. A amostra de concreto foi inserida no permeâmetro, adicionando-se água até ocorrer escoamento pelo extravasor. Esse fluxo foi mantido até eliminação do ar, indicando saturação do corpo de prova, conforme o procedimento adotado por Neithalath (2004). Após a saturação do corpo de prova, o ensaio foi realizado preenchendo o equipamento com água até o nível inicial h_i , cronometrando-se o tempo necessário para a água escoar até o nível final h_f . Devido à variabilidade dos resultados, o teste foi repetido 5 vezes em cada amostra. Os coeficientes de permeabilidade foram calculados com a Equação 1.

4.2.7 Propriedades físicas e mecânicas

O concreto permeável foi analisado quanto à resistência à compressão aos 28 dias de idade, índice de vazios, absorção de água e massa específica. As metodologias utilizadas para os ensaios estão indicadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Propriedades físicas do concreto permeável e respectivas metodologias de ensaio

Propriedade	Metodologia
Resistência à compressão aos 28 dias	NBR 9781 (ABNT, 2013)
Massa específica	Adaptado da NBR 9778 (ABNT, 2005)
Índice de vazios	Adaptado da NBR 9778 (ABNT, 2005)
Absorção de água	NBR 9778 (ABNT, 2005)

Fonte: O autor.

Os poros formados no concreto permeável possuem maiores dimensões quando comparados ao concreto convencional. Esse fato impede a utilização da metodologia descrita na NBR 9778 (ABNT, 2005) para a determinação da massa específica e do índice de volume de vazios. Dessa forma, neste trabalho foi realizada uma adaptação do ensaio, conforme os estudos de Joshaghani et al. (2015) e Ibrahim et al. (2014).

Os corpos de prova analisados foram secos em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas. Após este período, suas massas foram aferidas. Em sequência, as amostras foram imersas em água para atingir a saturação (24 h). Com o auxílio de uma balança hidrostática foi medida a massa da amostra imersa, permitindo assim o cálculo do índice de vazios pelo princípio do empuxo (Equação 2).

$$I_V = \left(1 - \frac{m_{\text{sat}} - m_i}{V}\right) \times 100 \quad (2)$$

em que:

I_V : Índice de volume de vazios (%);

m_{sat} : Massa do corpo de prova saturado com superfície seca (g);

m_i : Massa do corpo de prova imerso em água após 24 h (g);

V : Volume total da amostra (cm^3).

A determinação da massa específica do corpo de prova foi realizada pelo mesmo procedimento, utilizando a Equação 3. Neste método, a diferença entre a massa seca e a massa imersa representou o volume de água deslocado pelo corpo de prova.

$$\mu = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3)$$

em que:

μ : Massa específica (g.cm^{-3});

m_s : Massa do corpo de prova seco em estufa após 24 h (g);

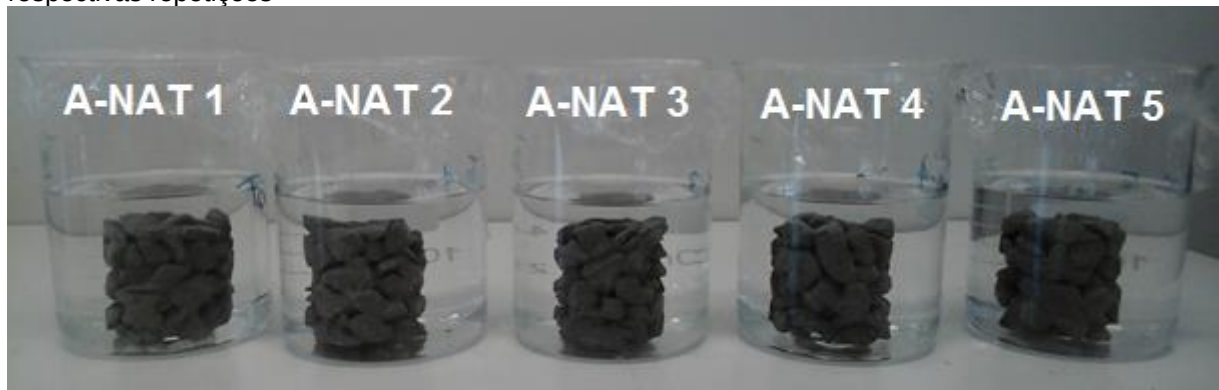
m_i : Massa do corpo de prova imerso em água após 24 h (g).

4.3 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

No Brasil, a NBR 10005 (ABNT, 2004) é a única norma técnica que estabelece os procedimentos para a obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Nessa metodologia o material analisado deve estar na forma granular. Como neste trabalho a amostra analisada é uma peça de concreto moldada, optou-se por utilizar um método aplicável a amostras de dimensão qualquer.

O teste de lixiviação foi baseado na metodologia italiana descrita no Decreto Ministerial de 5 de fevereiro de 1998 (ITÁLIA, 1998). No ensaio, o corpo de prova cilíndrico com 5 cm de diâmetro e 6 cm de altura foi imerso em um volume de água ultrapura 5 vezes superior ao volume da amostra (aproximadamente 590 ml). Esse recipiente foi armazenado em uma incubadora refrigerada para manter temperatura constante de 20 ± 5 °C, condição estabelecida pela metodologia italiana. Os concretos foram imersos em água com 31 dias de idade, visto que a metodologia recomenda a realização do ensaio após o período mínimo de um mês após seu preparo. Para armazenar a amostra durante o ensaio foram utilizados recipientes de vidro, cobertos por um filme plástico para evitar evaporação (Figura 12).

Figura 12 – Amostras de concreto permeável do tratamento A-NAT, imersas em água ultrapura e respectivas repetições



Fonte: O autor.

A água foi coletada nos períodos de 24, 72, 168 e 384 h, sendo totalmente substituída por um novo volume de água ultrapura. Em cada intervalo de tempo a água foi coletada para a determinação dos parâmetros físico-químicos do lixiviado, conforme as metodologias indicadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Metodologias de ensaio dos parâmetros físico-químicos do lixiviado de concreto

Parâmetro	Repetições	Metodologia
pH	5	4500-H ⁺ B (APHA,1998)
Condutividade elétrica	5	2510 B (APHA,1998)
Alcalinidade	5	2320 B (APHA,1998)
DQO	5	5220 D (APHA,1998)
Sulfatos	5	4500-SO ₄ ²⁻ C (APHA,1998)
Sólidos totais	5	2540 B (APHA,1998)
Cr, Cd, Pb, Cu, Zn	3	3010 B, 3030 D, 3110 (APHA, 1998)

Fonte: O autor.

Para a análise de metais, as amostras foram acidificadas com ácido nítrico (até pH < 2,0) logo após a sua coleta, conforme a metodologia 3010 B (APHA, 1998). Realizou-se a determinação da concentração de cromo, cádmio, chumbo, cobre e zinco em três repetições de cada tratamento. A análise foi realizada por meio de um espectrofotômetro de absorção atômica Varian AA240 FS, feita pelo Complexo de Laboratórios Multiusuários, na UEPG.

4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As propriedades do concreto (coeficiente de permeabilidade, resistência e índice de vazios) e os parâmetros do lixiviado (pH, condutividade elétrica, alcalinidade, acidez, sulfatos, sólidos totais e metais) foram analisados com auxílio do software SISVAR. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, utilizando o software R. Pelo software SISVAR (FERREIRA, 2015) foi realizada a análise de variância de cada propriedade e parâmetro, a um nível de significância de 5%, seguido do Teste de Tukey, para o mesmo nível de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 GRANULOMETRIA

Na Tabela 2 estão expostos os valores médios de permeabilidade dos concretos permeáveis elaborados com cada faixa granulométrica de agregado.

Tabela 2 – Permeabilidade dos concretos em função da faixa granulométrica dos agregados

Concreto Permeável	Dimensão do Agregado (mm)	Coefficiente de Permeabilidade médio (cm.s^{-1})	CV (%)
A	12,5/9,5	0,8572 a	4,80
B	19/12,5	0,8476 a	

Fonte: O autor.

Notas: Letras minúsculas diferentes na coluna representam médias com diferença estatística no teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Cada concreto permeável foi confeccionado com uma faixa granulométrica de agregado, sendo utilizados o mesmo traço e fator água cimento.

Os dois concretos atingiram um coeficiente de permeabilidade oito vezes superior a $0,10 \text{ cm.s}^{-1}$ que é o valor mínimo estabelecido pela norma NBR 16416 (2015) para um pavimento ser considerado permeável. Comparando os dois tipos de concreto, verificou-se que a mistura A apresentou um coeficiente de permeabilidade médio ligeiramente superior à da mistura B. Entretanto, não houve diferença estatística entre as duas médias para o teste de Tukey realizado a um nível de significância de 5%.

Os coeficientes de permeabilidade obtidos foram muito inferiores aos obtidos por Hölitz (2011), que encontrou valores superiores a 2 cm.s^{-1} para o mesmo traço adotado neste trabalho usando brita 1 (9,5 a 19 mm) como agregado. Entretanto, na pesquisa realizada por Rodrigues e Gans (2015), concretos permeáveis foram elaborados com permeabilidade entre $0,16$ e $0,37 \text{ cm.s}^{-1}$, porém com traço em massa de 1:4.

Dois fatores que podem ter influenciado na permeabilidade são a forma de adensamento e o permeâmetro utilizado. Os corpos de prova moldados para o ensaio de permeabilidade foram adensados manualmente, visto que a trabalhabilidade da mistura tornava a utilização do adensamento mecânico ineficiente. O permeâmetro montado para análise dos corpos de prova foi baseado no equipamento montado por Hölitz (2011) e Neithalath (2010). Em ambos os casos o corpo de prova foi retirado do molde para análise da permeabilidade, enquanto que neste trabalho o molde foi mantido, evitando assim o escoamento da água pela

lateral da amostra. Além disso, os equipamentos podem ter diferentes dimensões e detalhes construtivos que influenciaram nos resultados.

Não havendo diferença significativa da permeabilidade entre os dois concretos, optou-se neste trabalho por utilizar o concreto A com agregados na faixa granulométrica 9,5 a 12,5 mm. Além de apresentarem um coeficiente de permeabilidade pouco superior, a mistura utilizando esse agregado obteve melhor conformação nos moldes utilizados.

Embora o aspecto visual dos dois concretos não apresente grande diferença (Figura 13), a granulometria 9,5 a 12,5 mm resultou em uma superfície mais regular, o que proporcionaria o melhor acabamento do pavimento permeável, principalmente para o seu uso em calçadas.

Figura 13 – Fotografia das amostras de concreto permeável confeccionado com agregado na granulometria 12,5/9,5 mm (A) e granulometria 19/12,5 mm (B). Vista superior do corpo de prova da granulometria 12,5/9,5 mm (C) e granulometria 19/12,5 mm (D)



Fonte: O autor.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

5.2.1 Composição do RCD

A caracterização do RCD pela metodologia da NBR 15116 (ABNT, 2004) resultou em uma composição média exposta na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise visual da composição do RCD segundo procedimentos da NBR 15116:2004

Grupo	Composição dos fragmentos	Percentual em massa (%)
G1	Rocha em mais de 50% do volume analisado	53,39
G2	Pasta de cimento endurecido em mais de 50% do volume analisado	42,11
G3	Cerâmica vermelha ou branca não polida em 50% do volume analisado	2,92
G4	Impurezas	1,58
Total		100

Fonte: O autor.

Notas: São consideradas impurezas os materiais que não se enquadram nos tipos de resíduo utilizáveis, como madeira, plástico, vidro, materiais carbonizados e betume.

Foi possível notar que a porção de fragmentos constituídos por rocha e pasta de cimento endurecido foi predominante. O agregado pode ser classificado como agregado reciclado de concreto, visto que a soma dos percentuais em massa do grupo 1 e grupo 2 foi de 95,50%, superior ao limite de 90% imposto pela norma.

Identificou-se um teor de material cerâmico equivalente a 2,92%, composto principalmente por fragmentos de tijolos cerâmicos. Da massa de resíduo analisada, 1,58% dos fragmentos correspondiam a materiais não minerais, denominados neste trabalho como impurezas. No grupo 4 havia fragmentos de madeira, plástico, gesso e outros fragmentos não identificados visualmente. De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), o agregado reciclado pode conter no máximo 2% de fragmentos não minerais. Dessa forma, o RCD utilizado como agregado atende aos requisitos da norma técnica.

5.2.2 Características físicas e químicas dos agregados

Na Tabela 4 estão expostos os resultados de absorção, massa específica real, massa específica aparente e teor de material pulverulento.

Tabela 4 – Valores médios de absorção e massa específica dos agregados utilizados na confecção do concreto permeável

Agregado	Absorção (%)	Massa Esp. Real (g.cm^{-3})	Massa Esp. Aparente (g.cm^{-3})	Massa Unitária (g.cm^{-3})	Volume de Vazios (%)	Material Pulverulento (%)
Cerâmico	22,84	2,64	1,65	0,82	50,30	2,86
Concreto	4,77	2,95	2,83	1,41	46,26	0,24
RCD	2,18	2,62	2,33	1,17	49,83	2,73
Natural	0,84	3,02	2,94	1,43	51,47	n.d.

Fonte: O autor.

n.d. – Não determinado.

Foi possível observar que o agregado cerâmico apresentou a maior absorção de água. Dias e Agopyan (2004) relatam que a cerâmica vermelha é um material

poroso, apresentando assim absorção maior do que os agregados convencionais. Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), o agregado reciclado misto pode apresentar uma absorção máxima de 12%, tornando o agregado cerâmico inadequado ao uso de concreto não estrutural.

O agregado reciclado de concreto e o resíduo de construção e demolição apresentaram uma absorção semelhante, ambos se enquadram como agregado reciclado de concreto, portanto atendendo ao limite de absorção de 7% estabelecido pela NBR 15116 (ABNT, 2004).

A massa específica do agregado natural foi superior a dos demais agregados, resultando também em menor absorção. Entre os materiais reciclados, o agregado de concreto apresentou maior massa específica real, o que era esperado visto que os agregados reciclados tendem a resultar em menor massa específica (CARRIJO, 2005). O RCD apresentou a menor massa específica real, com densidade próxima a do agregado cerâmico. Isto pode ter ocorrido pela composição do material, devido às características dos resíduos que o compuseram.

O material cerâmico apresentou a menor massa específica aparente, havendo uma grande diferença com o valor de densidade real. Isso mostra que o agregado analisado possui elevada porosidade, justificando assim sua alta absorção de água (DIAS; AGOPYAN, 2004). Os demais agregados apresentaram valores de densidade aparente mais próxima à massa específica real, coerente com a absorção verificada.

O teor de material pulverulento, determinado pela NBR NM 46 (ABNT, 2003), nos três agregados foi inferior a 10%, requisito imposto pela mesma norma técnica. O processo de britagem, com objetivo de produzir agregados nas dimensões adequadas à construção civil, pode produzir partículas finas (material passante na peneira de 75 μm), ficando aderidas à superfície dos agregados. Isso é mais acentuado no material cerâmico e no RCD, devido à fragilidade do material. Para o agregado natural essa propriedade não foi determinada, visto que o material foi lavado antes da sua caracterização.

Na Tabela 4 estão relacionados os valores de massa unitária e volume de vazios de cada agregado, no estado solto, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Verificou-se que os materiais apresentaram volume de vazios maior que 45%, resultado da distribuição granulométrica uniforme. Em função da maior capacidade de absorção dos agregados reciclados, o volume de vazios foi calculado

desprezando a porosidade dos mesmos, ou seja, considerando-se apenas os vazios entre os agregados.

Na confecção de concretos é desejável utilizar materiais que atendam aos requisitos previstos em normas técnicas. Entretanto, neste trabalho foi utilizado o agregado cerâmico com o objetivo de analisar a sua influência nas propriedades do concreto endurecido, bem como na composição do lixiviado. Foram utilizadas também misturas de agregados, produzindo diferentes materiais para a confecção dos concretos.

Na Tabela 5 está apresentada a caracterização química dos agregados natural e reciclados.

Tabela 5 – Caracterização química dos agregados por meio de fluorescência de raios X

Agregado	Composição (% em massa)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	ZnO	SrO
Cerâmico	49,23	24,65	16,67	1,01	1,73	2,19	4,26	0,22	0,05	0,00
Concreto	30,85	8,25	20,79	32,55	1,53	3,37	1,88	0,56	0,06	0,17
RCD	39,97	7,12	8,22	37,11	1,83	1,52	3,98	0,20	0,06	0,00
Natural	34,25	11,34	28,67	17,62	1,00	4,38	2,12	0,40	0,09	0,12

Fonte: O autor.

Os principais componentes do RCD foram SiO₂ (39,97%), CaO (37,11%) , Fe₂O₃ (8,22%) e Al₂O₃ (7,12%), apresentando também SO₃, TiO₂ e K₂O. A composição do resíduo de concreto foi semelhante ao do RCD, porém com maior concentração de Fe₂O₃ (20,79%). O resíduo cerâmico foi composta principalmente por SiO₂ (49,23%), Al₂O₃ (24,65%) e Fe₂O₃ (16,67%). Em todos os agregados verificou-se a presença de SO₃, variando de 1,00% (agregado natural) a 1,83% (RCD).

5.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

A caracterização do concreto permeável, realizada para cada um dos tratamentos estudados está apresentada na Tabela 6. Os dados estão expressos em valor médio, seguidos da verificação estatística por comparação de médias, pelo Teste de Tukey, a um nível de significância de 5%. As análises estatísticas dos resultados da caracterização do concreto permeável estão expostas no Apêndice A.

Tabela 6 – Valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos concretos permeáveis

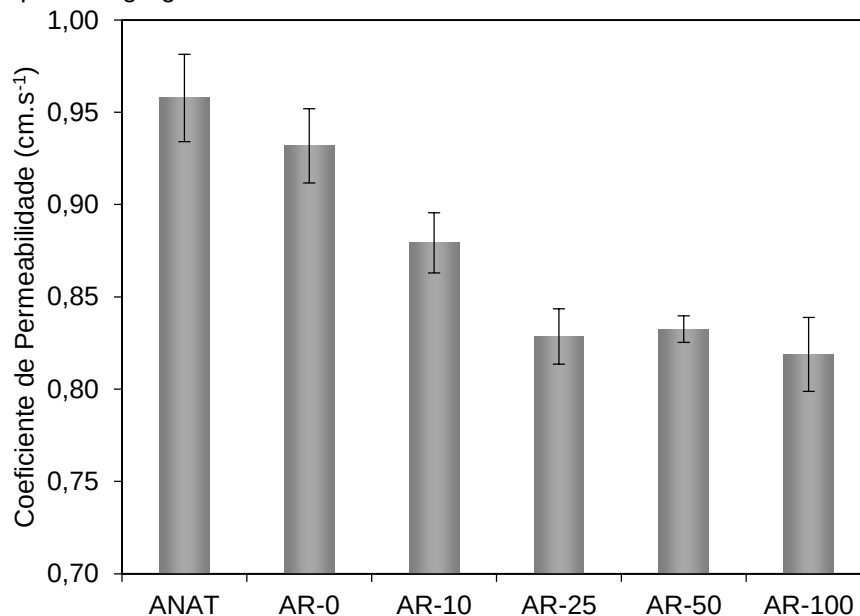
Trat.	Coefficiente de Permeabilidade (cm.s ⁻¹)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Índice de Volume de Vazios (%)	Absorção de Água (%)	Massa Específica Real (g.cm ⁻³)	Massa Específica Aparente (g.cm ⁻³)
A-NAT	0,96 a	8,84 a	36,47 a	4,02 f	2,94 a	1,67 a
AR-0	0,93 a	10,15 a	32,13 b	5,29 e	2,86 b	1,69 a
AR-10	0,88 b	2,95 b	36,72 a	8,47 d	2,59 e	1,34 b
AR-25	0,83 c	3,20 b	37,21 a	10,59 c	2,60 de	1,28 b
AR-50	0,83 c	2,66 b	37,35 a	14,89 b	2,61 d	1,18 c
AR-100	0,82 c	2,00 b	35,13 ab	25,02 a	2,63 c	1,03 d
N	5	5	6	6	6	6
CV (%)	2,04	20,44	6,83	3,40	0,43	3,88

Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente no teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Inicialmente esperava-se que a permeabilidade determinada no permeâmetro não variasse entre os tratamentos, visto que todos utilizaram agregados com mesma distribuição granulométrica. Entretanto, conforme a Tabela 6, verificou-se que houve diferença significativa entre os coeficientes de permeabilidade. Na Figura 14 estão apresentados os valores médios do coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis.

Figura 14 – Valores médios de coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis produzidos com diferentes tipos de agregado



Fonte: O autor.

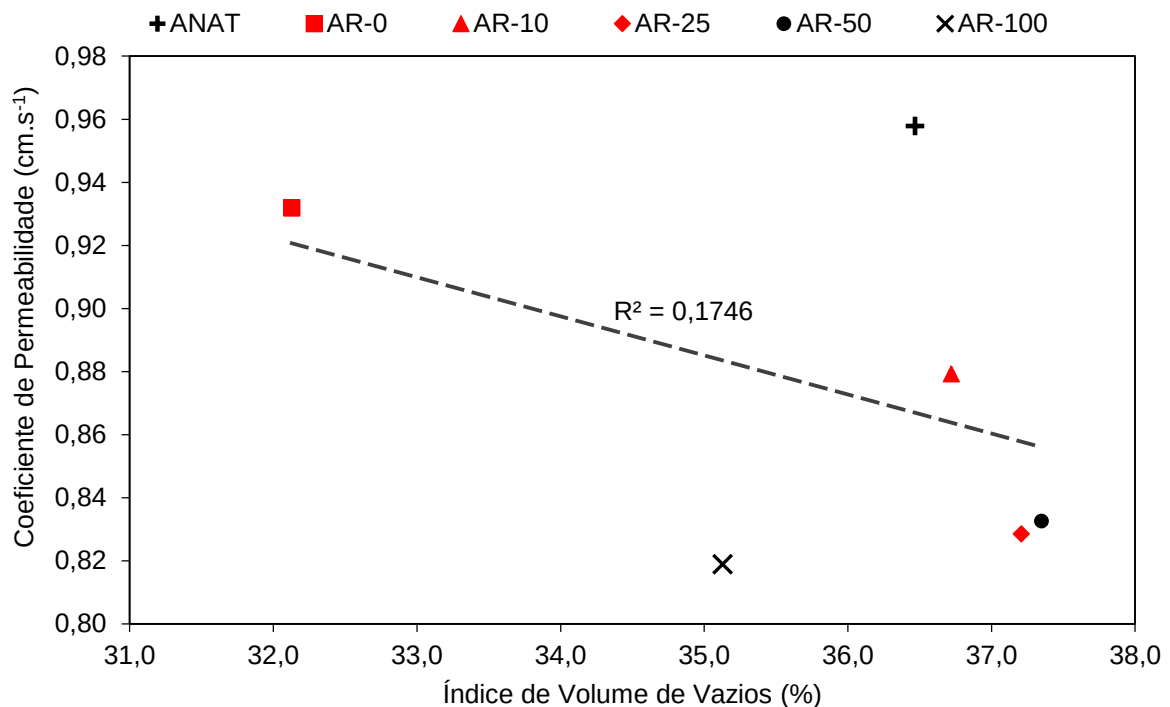
O concreto com maior coeficiente de permeabilidade foi o A-NAT, porém não correspondeu ao concreto de maior índice de volume de vazios em termos

numéricos, pois não houve diferença estatística significativa. O concreto AR-0, com menor volume de vazios, resultou em uma permeabilidade sem diferença estatística do A-NAT. Embora essa propriedade afete diretamente na permeabilidade, é importante que os vazios sejam interligados para conduzir a água.

Os tratamentos que possuíam cerâmica em sua composição foram os que apresentaram menor coeficiente de permeabilidade, o que pode ter ocorrido devido às características físicas dos agregados como absorção e forma. Mesmo apresentando os maiores índices de volume de vazios que os tratamentos controle (A-NAT e AR-0), os tratamentos AR-25 e AR-10 resultaram nos menores coeficientes de permeabilidade.

Nos estudos sobre o concreto permeável, o índice de volume de vazios é usualmente associado de forma direta ao coeficiente de permeabilidade (ACI, 2010; IBRAHIM et al., 2014; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). Na Figura 15 está exposta a correlação obtida neste estudo para as duas propriedades.

Figura 15 – Correlação entre os valores médios de índice de volume de vazios e coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis



Fonte: O autor.

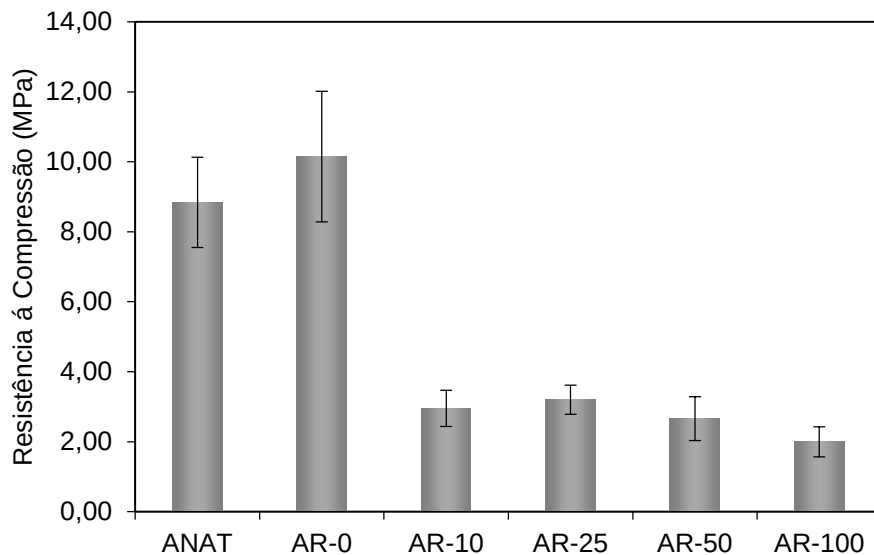
Na Figura 15 não foi possível estabelecer uma relação entre a permeabilidade do concreto e o índice de volume de vazios. No entanto, isto é justificado pela

diferença nas características dos agregados de cada tratamento. O procedimento de saturação dos agregados recomendado pela ACI 522R (ACI, 2010) pode ter influenciado na permeabilidade dos concretos, principalmente nos tratamentos com maior quantidade de cerâmica.

De forma geral, todos os concretos resultaram em permeabilidade superior ao valor mínimo de $0,10 \text{ cm.s}^{-1}$, estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Neste estudo o concreto com traço em massa de 1:5 apresentou coeficientes de permeabilidade entre $0,82$ e $0,96 \text{ cm.s}^{-1}$, variando em função do tipo de agregado utilizado. Utilizando um traço e fator água/cimento semelhante, Joshaghani et al. (2015), Tavares e Kazmierczak (2016) e Bhutta; Tsuruta e Mirza (2012) obtiveram valores de $1,50$ a $3,30 \text{ cm.s}^{-1}$. Os valores de permeabilidade deste estudo podem ter resultado em valores inferiores aos obtidos pelos autores devido à distribuição granulométrica do agregado e a forma de adensamento empregada. Além disso, deve-se considerar que o permeâmetro pode apresentar diferentes dimensões em relação aos demais estudos, o que também pode ter interferido nos resultados.

Na Figura 16 estão expostos os resultados médios de resistência à compressão dos concretos permeáveis.

Figura 16 – Valores médios de resistência à compressão axial dos concretos permeáveis produzidos com diferentes tipos de agregado



Fonte: O autor.

A resistência à compressão axial aos 28 dias de todos os concretos foi inferior a 20 MPa, valor mínimo para pavimentos permeáveis de concreto,

independentemente do tipo de esforço que o mesmo receberá. O tratamento A-NAT resultou em 8,84 MPa de resistência à compressão, coerente com os estudos de Tavares e Kazmierczak (2016) e Torres; Hu e Ramos (2015), que obtiveram resistências de 10,83 MPa e 10,40 MPa, respectivamente.

A mistura confeccionada com agregado reciclado de concreto (AR-0) apresentou maior resistência que o material elaborado com agregado natural, que teoricamente seria o agregado de melhor qualidade. Esse comportamento pode ter ocorrido em função do maior índice de vazios apresentado pelo tratamento A-NAT. Zaetang et al. (2016a) também citaram que a porosidade superficial e rugosidade dos agregados reciclados podem contribuir para uma melhor aderência da pasta de cimento ao agregado, contribuindo para aumento da resistência. No entanto, os tratamentos A-NAT e AR-0 não diferiram estatisticamente entre si.

Conforme a Figura 16 os tratamentos AR-10 a AR-100 resultaram nas menores resistências, não apresentando diferença significativa entre si. Dessa forma, não é possível afirmar que a quantidade de material cerâmico presente no agregado influenciou essa propriedade. A resistência dos corpos de prova provavelmente ficou limitada à resistência da cerâmica, independentemente da sua quantidade. Uma resistência superior nesses tratamentos seria possível pelo aumento da quantidade de cimento, entretanto isso torna o concreto mais oneroso, sendo inviável a sua utilização.

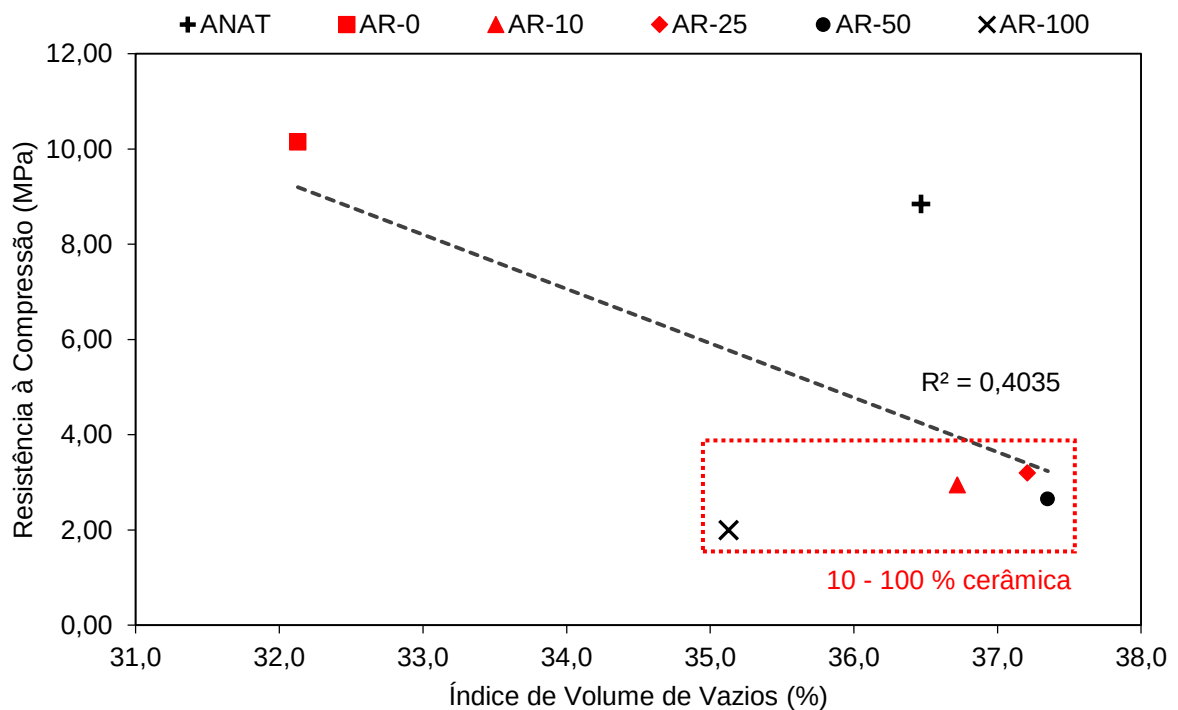
A mistura que utilizou 100% de agregado cerâmico (AR-100) foi a que resultou em menor resistência à compressão, conforme esperado. Nota-se que a massa específica real não influenciou diretamente na resistência dos materiais. Em geral, os valores de resistência são coerentes com a faixa de 2,8 a 28 MPa, indicada por Zaetang et al. (2016a).

No estudo de Alencar e Cabral (2013), a substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto ocasionou redução na resistência à compressão de 17,04 para 6,84 MPa. Bhutta et al. (2013) também observaram uma redução na resistência pelo uso de resíduos de concreto como agregados, que resultaram em concretos aproximadamente 25% menos resistentes. Entretanto, Zaetang et al. (2016b) verificaram em seu estudo que a substituição de 60% do agregado natural por agregado reciclado de concreto proporcionou um aumento da resistência do concreto permeável. Neste estudo, a utilização dos agregados reciclados com

cerâmica foi prejudicial, no entanto, misturas com o agregado natural poderiam resultar em maiores resistências.

Da mesma forma que a permeabilidade, a resistência à compressão também é associada ao índice de volume de vazios do concreto. Na Figura 17 está exposta a relação entre essas propriedades obtida neste estudo.

Figura 17 – Correlação entre a resistência e o índice de volume de vazios do concreto permeável

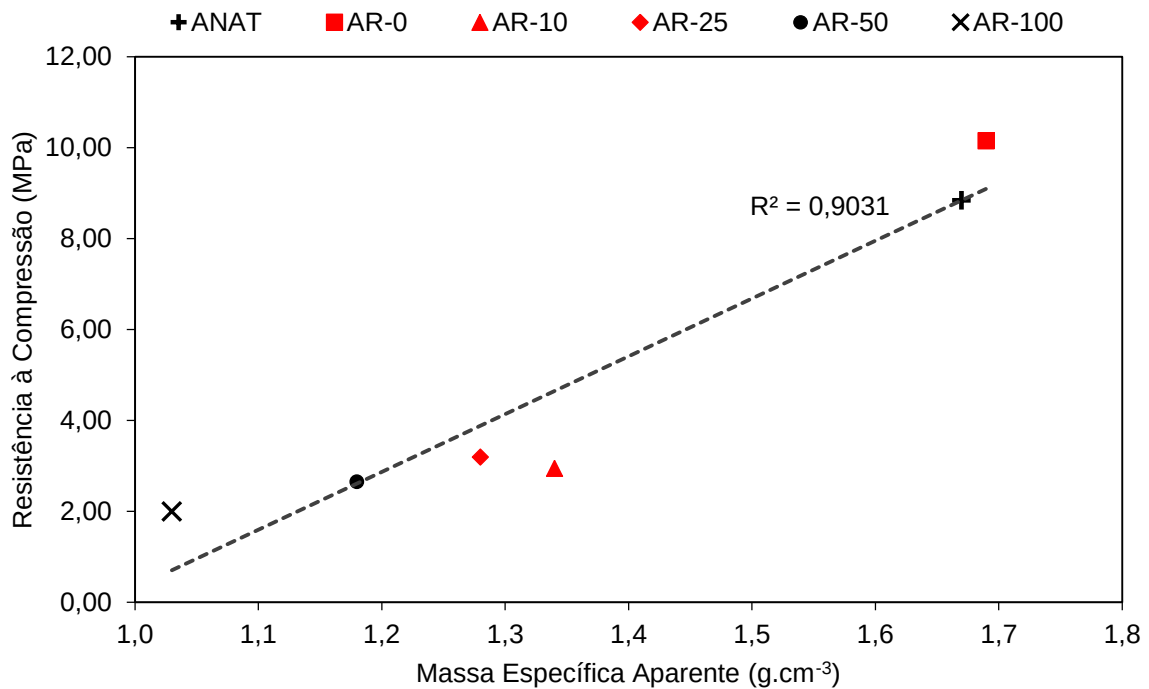


Fonte: O autor.

Conforme a Figura 17 a correlação entre a resistência e volume de vazios dos concretos produzidos neste estudo é fraca. Embora tenha ocorrido uma tendência de redução da resistência nos concretos com maior quantidade de vazios, os concretos contendo material cerâmico apresentaram resistência semelhante para diferentes volumes de vazios.

Dessa forma, a análise da resistência em função da massa específica aparente foi mais coerente, como está ilustrado na Figura 18. A massa específica aparente apresentou uma correlação forte com a resistência à compressão do concreto. Os concretos sem cerâmica (A-NAT e AR-0) apresentaram as maiores massas específicas e resistências, enquanto que nos demais tratamentos notou-se o inverso.

Figura 18 – Correlação entre a resistência à compressão e a massa específica aparente dos concretos permeáveis



Fonte: O autor.

É importante notar que houve uma grande variabilidade nos dados, influenciada provavelmente pelas condições de moldagem dos corpos de prova. De forma geral, um dos fatores que influenciou na moldagem dos corpos de prova foi a absorção dos agregados. Nos concretos que continham agregado cerâmico a trabalhabilidade da mistura foi comprometida, exigindo a pré-molhagem do material.

Na Figura 19 observa-se que nos concretos A-NAT e AR-0 (A e B, respectivamente) os agregados são totalmente envolvidos pela pasta de cimento. Já no tratamento AR-25 (C), existem grãos expostos, notando-se que os mesmos são envolvidos por uma fina camada de pasta de cimento.

Figura 19 – Corpos de prova de concreto dos tratamentos (A) A-NAT, (B) AR-0 e (C) AR-25



Fonte: O autor.

Além disso, neste trabalho foi fixado o traço em massa de 1:5. Devido à baixa densidade do material cerâmico, o consumo de cimento para um mesmo volume de agregado foi inferior. Nesses casos, a quantidade de aglomerante utilizado provavelmente não foi suficiente para envolver os grãos e proporcionar uma resistência maior.

Os tratamentos A-NAT e AR-0 foram os que apresentaram melhor desempenho com relação à interação entre resistência e permeabilidade. Nesses dois aspectos, ambos não diferiram estatisticamente entre si, ou seja, os agregados reciclados de concreto apresentaram capacidade de substituir os agregados naturais.

Para os tratamentos AR-10, AR-25, AR-50 e AR-100, os resultados de resistência obtidas neste estudo foram muito inferiores ao concreto de referência. A utilização de agregados com cerâmica deve ser avaliada com alterações no traço da mistura com objetivo de aumento da resistência. No entanto, a viabilidade da utilização de agregados reciclados ainda deve ser verificada pela análise da lixiviação de elementos potencialmente tóxicos.

5.4 ANÁLISE DO LIXIVIADO

As propriedades físicas e químicas da água utilizada para o teste de lixiviação estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades físicas e químicas da água de imersão do teste de lixiviação

Amostra	pH	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Alcalinidade Total ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	DQO (mg.L^{-1})	Sulfato (mg.L^{-1})	ST (mg.L^{-1})
1	6,43	1,15	2,0	0,0	0,0	0,0
2	6,17	1,27	2,0	0,0	0,0	0,0
3	6,36	1,09	2,0	0,0	0,0	0,0
4	6,18	1,06	2,0	0,0	0,0	0,0
5	6,15	1,06	1,0	0,0	0,0	0,0
Média	6,26	1,13	1,8	0,0	0,0	0,0

Fonte: O autor.

Conforme a Tabela 7, a água ultrapura utilizada apresentou um pH médio de 6,26, condutividade elétrica média de $1,13 \mu\text{S.cm}^{-1}$ e alcalinidade total de $1,8 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. As amostras eram isentas de matéria orgânica, sulfato e sólidos totais.

Os resultados da caracterização do lixiviado de concreto permeável estão expostos na Tabela 8, em que, para cada parâmetro, encontram-se os resultados

médios de cada coleta (24, 72, 168 e 384 h), seguidos da análise de comparação de médias pelo Teste de Tukey, a um nível de significância de 5%. As análises estatísticas da caracterização do lixiviado estão expostas no Apêndice B.

Tabela 8 – Resultados médios das propriedades físicas e químicas do lixiviado ao longo do tempo

Trat.	ANAT	AR0	AR10	AR25	AR50	AR100
pH						
24h	11,59 b	11,53 b	11,92 a	11,91 a	11,37 b	10,93 c
72h	11,85 ab	11,74 b	12,07 a	11,98 a	11,26 c	10,96 d
168h	11,78 a	11,73 ab	11,95 a	11,84 a	11,46 bc	11,32 c
384h	12,11 ab	12,09 a	12,07 ab	11,91 b	11,50 c	11,35 c
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)						
24h	556,1 a	463,7 b	625,3 a	601,4 a	374,0 c	278,1 d
72h	566,4 b	477,1 c	671,9 a	588,8 b	324,5 d	251,0 d
168h	573,9 a	561,0 a	681,8 a	568,0 a	388,8 b	316,1 b
384h	787,7 a	711,3 b	705,0 b	588,4 c	420,1 d	334,6 e
Alcalinidade Total ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)						
24h	273,0 a	230,7 ab	233,3 ab	232,8 ab	136,9 ab	99,6 b
72h	211,2 ab	148,1 bc	273,9 a	233,7 a	161,6 bc	130,4 c
168h	226,2 ab	212,0 bc	284,5 a	229,4 ab	153,9 c	151,1 c
384h	220,0 bc	179,2 bc	303,9 a	249,9 ab	187,1 bc	163,6 c
DQO (mg.L^{-1})						
24h	8,0 a	3,4 a	0,0 a	4,6 a	1,2 a	1,4 a
72h	10,8 a	6,1 a	10,6 a	8,5 a	0,1 a	9,6 a
168h	78,9 a	67,0 a	2,4 b	26,5 b	13,3 b	3,3 b
384h	0,3 a	16,4 a	7,1 a	16,8 a	3,6 a	6,1 a
Sulfato (mg.L^{-1})						
24h	21,3 b	29,6 b	30,0 b	22,5 b	45,6 b	71,7 a
72h	11,0 a	13,3 a	18,3 a	9,3 a	6,7 a	11,5 a
168h	9,2 a	9,8 a	22,2 a	8,5 a	6,1 a	2,7 a
384h	7,9 a	8,8 a	21,6 a	8,8 a	8,3 a	2,4 a
ST (mg.L^{-1})						
24h	320 ab	453 ab	413 a	352 ab	256 b	280 b
72h	453 a	400 abc	384 ab	336 bc	304 bc	280 c
168h	424 ab	368 bc	488 a	432 ab	320 cd	264 d
384h	336 bc	408 ab	488 a	400 ab	288 bc	256 c
STF (mg.L^{-1})						
24h	240 a	306 a	312 a	248 a	256 a	272 a
72h	333 a	293 ab	312 a	248 ab	200 b	192 b
168h	264 bc	296 abc	384 a	328 ab	264 bc	208 c
384h	200 c	304 ab	392 a	312 a	216 bc	176 c
STV (mg.L^{-1})						
24h	80 a	146 a	112 a	104 a	0 b	8 b
72h	120 a	106 a	72 a	88 a	104 a	88 a
168h	160 a	72 b	104 ab	104 ab	56 b	56 b
384h	136 a	104 a	96 a	88 a	72 a	80a

Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si no teste de Tukey à 5% de significância.

A partir dos resultados da coleta inicial percebe-se que, conforme esperado, o lixiviado do concreto apresentou característica alcalina, sendo que todos os tratamentos resultaram em um pH superior a 10,00 (Tabela 8). O pH do lixiviado é

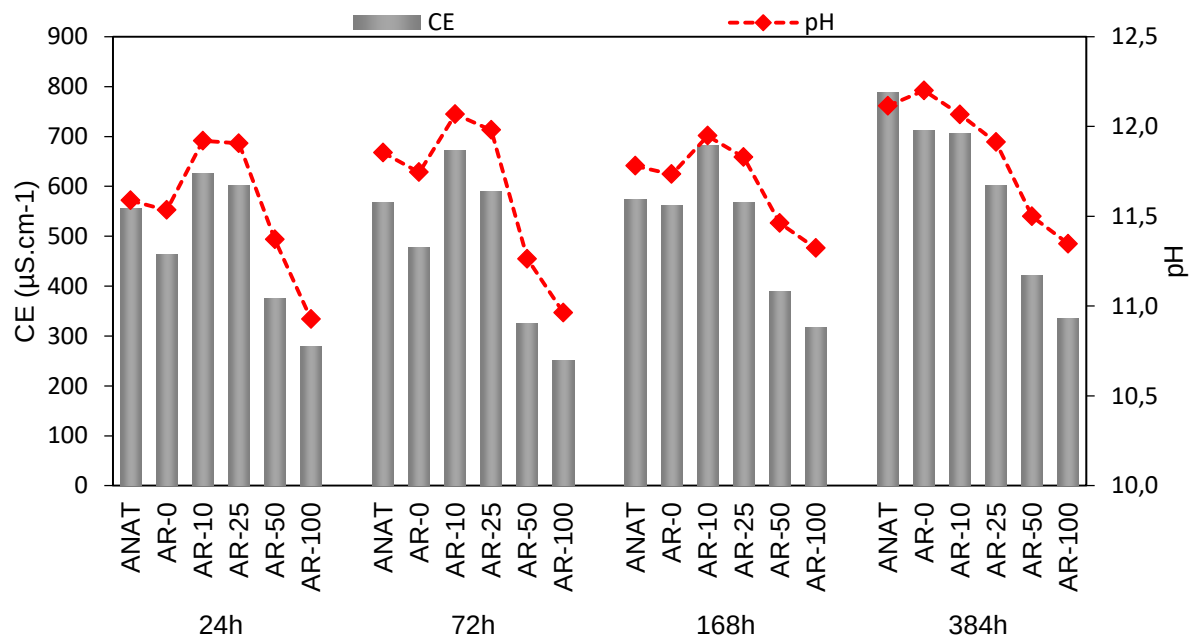
coerente com os resultados de Sani et al. (2005), que utilizando a mesma metodologia verificaram valores entre 10,30 e 11,40.

Mesmo em um período de apenas 24 h houve rápido aumento do pH em relação à água ultrapura (pH 6,26). Isto foi confirmado por Jung et al. (2014), que observaram que o aumento do pH do lixiviado ocorre de forma rápida nos primeiros 100 minutos de imersão, tornando-se um processo mais lento após esse intervalo de tempo. Os autores relatam que o caráter alcalino da pasta de cimento é originado principalmente do íon hidroxila, com a contribuição de outros íons como Fe^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ e K^+ .

Em todos os tratamentos foi observada uma condutividade elétrica alta, sendo os concretos com teor de cerâmica de 10% e 25% os que apresentaram maiores valores, porém sem diferir estatisticamente do tratamento A-NAT (Tabela 8). Os valores encontrados são coerentes com os estudos da lixiviação do concreto (SANI et al., 2005). Nota-se, entretanto, que mesmo utilizando concreto convencional, a condutividade elétrica foi superior aos valores encontrados neste trabalho, com concreto permeável.

Na Figura 20 estão ilustrados os resultados médios de condutividade elétrica do lixiviado ao longo de 16 dias.

Figura 20 – Valores médios de condutividade elétrica do lixiviado dos concretos com diferentes tipos de agregado ao longo de 16 dias de imersão em água

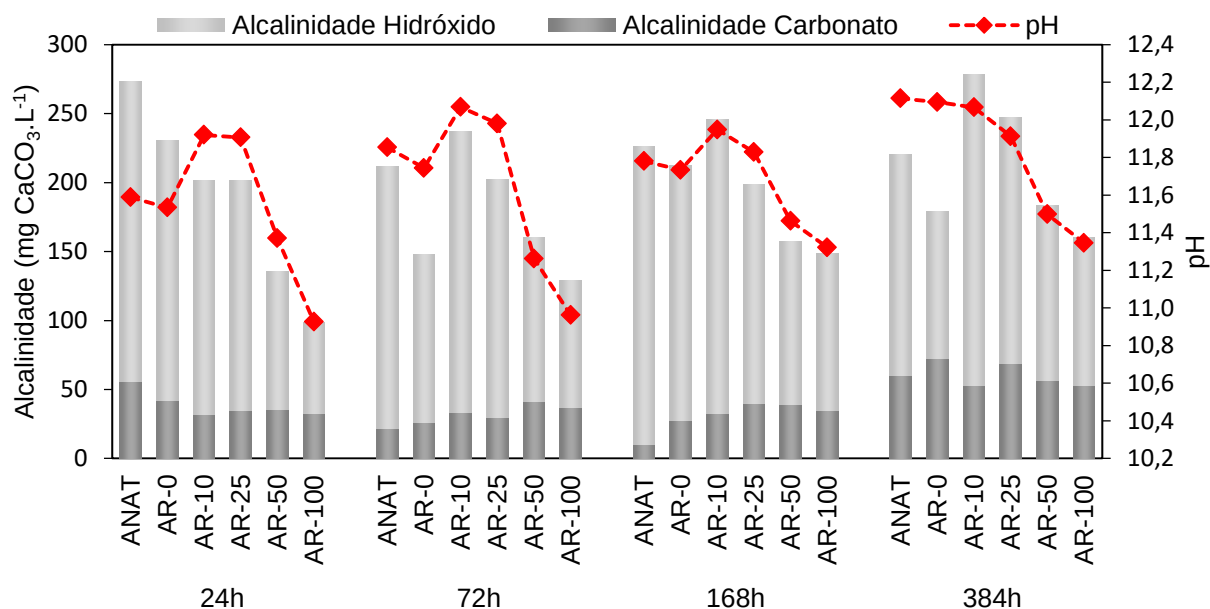


Fonte: O autor.

Nos concretos AR-10 a AR-100 houve uma redução na condutividade elétrica à medida que o teor de material cerâmico aumentou. Conforme a Figura 20 essa tendência ocorre de forma similar para o pH do lixiviado. É importante notar que o tratamento A-NAT resultou em condutividade superior ao tratamento AR-0. Dessa forma, nesse primeiro momento há uma liberação de íons na água pelo concreto, mesmo confeccionado com agregados naturais.

Na Figura 21 estão apresentados os valores médios de alcalinidade e sua composição em carbonato e hidróxido.

Figura 21 – Valores médios de alcalinidade total do lixiviado de concreto ao longo de 16 dias de imersão em água ultrapura e sua composição em carbonatos e hidróxidos



Fonte: O autor.

Os valores de alcalinidade total variaram de 99,6 a 273,0 mgCaCO₃.L⁻¹, sendo que o tratamento A-NAT resultou no maior valor. Conforme a Figura 21 a maior parte da alcalinidade é devida a hidróxidos, que provavelmente têm origem nos compostos do cimento que são liberados pelo contato com a água. Notou-se ainda uma parcela da alcalinidade devida a carbonatos, que podem ser originados na dissolução do gás carbônico atmosférico, predominando a formação de carbonatos em função da faixa de pH do lixiviado (entre 10,93 e 11,92 após 24 h).

A tendência de redução de alcalinidade, condutividade elétrica e pH nos concretos com maior teor de material cerâmico provavelmente está relacionada com a menor quantidade de pasta de cimento no concreto. A pasta de cimento hidratada é composta em sua maior parte (50 a 60%) por silicato de cálcio hidratado,

designado como C-S-H, o qual não é um composto bem definido (HALIM et al., 2004). De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a relação C/S pode variar entre 1,5 e 2,0, havendo uma variação ainda maior em relação ao conteúdo de água estrutural. O hidróxido de cálcio ou portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) corresponde de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento, enquanto que os sulfoaluminatos de cálcio constituem de 15 a 20% desse volume. Mehta e Monteiro (2008) afirmam, ainda, que durante os estágios iniciais da hidratação há uma tendência na formação de trissulfato hidratado ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), denominado de etringita, a qual pode conter pequenas quantidades de ferro.

De acordo com Jebli et al. (2016), a lixiviação do concreto ocorre com liberação do íon cálcio Ca^{2+} em função da dissolução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). De acordo com os autores esse processo inicia na superfície do material, com a migração dos compostos dissolvidos para o exterior, causando um aumento de porosidade. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o hidróxido de cálcio é o composto do concreto mais suscetível à lixiviação, visto que possui relativamente alta solubilidade em água pura. Rozière et al. (2009) relatam que a lixiviação do concreto ocorre com a liberação de cálcio e de íons hidroxila, ocasionando aumento da porosidade. Além de alterar as propriedades da água, a lixiviação do concreto ocasiona redução de sua resistência devido ao aumento da porosidade.

Dessa forma, os valores de condutividade e alcalinidade podem ser justificados pela lixiviação da pasta de cimento, ocorrendo tanto para o agregado natural como para os agregados reciclados. A diferença de lixiviação entre os tratamentos ocorreu provavelmente pela quantidade de pasta de cimento contida em cada concreto. Embora todos os tratamentos tenham sido confeccionados com mesmo traço em massa, a proporção entre cimento e agregado utilizado na mistura variou por causa da diferença de massa específica entre os agregados. Na Tabela 9 estão relacionados os traços em volume de cada tratamento.

Tabela 9 – Consumo de cimento e traço em massa e volume dos concretos permeáveis

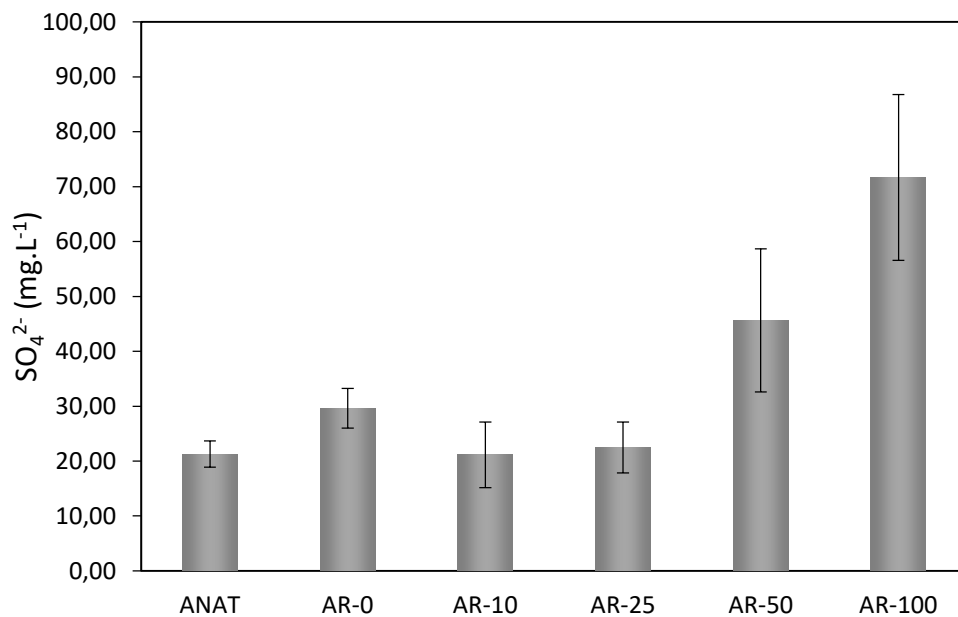
Trat.	Traço em Massa	Traço em Volume	Consumo de Cimento (kg/m^3)
A-NAT	1:5	1:3,4	295,5
AR-0	1:5	1:3,8	261,4
AR-10	1:5	1:4,6	217,7
AR-25	1:5	1:4,8	207,3
AR-50	1:5	1:5,2	191,9
AR-100	1:5	1:6,0	167,2

Fonte: O autor.

Notou-se que houve uma grande variação na quantidade de cimento por volume de agregado, sendo este o provável fator que influenciou nas propriedades do lixiviado. No entanto é importante lembrar que o índice de volume de vazios também pode ter influenciado nos resultados, visto que essa propriedade afeta a área de concreto em contato com o líquido. O tratamento AR-0, por exemplo, resultou no menor índice de volume de vazios, porém apresentou menor pH, condutividade elétrica e alcalinidade que o tratamento AR-10, mesmo contendo a maior quantidade de cimento em volume.

Na Figura 22 estão expostos os valores médios da concentração de sulfato no lixiviado coletado após 24 h de imersão do concreto em água.

Figura 22 – Valores médios da concentração de sulfato no lixiviado dos concretos com diferentes tipos de agregado após 24 h de imersão em água



Fonte: O autor.

Observou-se que mesmo o concreto confeccionado com agregado natural liberou sulfato no lixiviado, porém em menor concentração do que os concretos com agregado reciclado. O tratamento que liberou maior quantidade de sulfatos foi o AR-100 (Figura 22), demonstrando que a cerâmica pode ser responsável por parte da lixiviação do íon. Barbudo et al. (2012) verificaram que os resíduos de construção e demolição com grandes quantidades de material cerâmico liberam mais íons SO_4^{2-} do que agregados naturais. No estudo, os autores verificaram uma lixiviação de até 1625 mg.L⁻¹ de sulfato em agregados com mais de 50% de teor de material

cerâmico. Rey et al. (2015) também confirmam que a cerâmica é uma das origens do sulfato no RCD, no entanto o íon também está presente na argamassa aderida ao agregado reciclado.

Os resultados obtidos neste trabalho confirmam as verificações de Barbudo et al. (2012), visto que os tratamentos com mais de 50% de material cerâmico (AR-50 e AR-100) liberaram as maiores quantidades de sulfato. Os tratamentos sem cerâmica (ANAT e AR-0) também liberaram sulfato, oriundo provavelmente da argamassa aderida ao agregado reciclado e maior quantidade de cimento, conforme Rey et al. (2015). No entanto, nenhum tratamento ultrapassou o limite de 250 mg L^{-1} de SO_4^{2-} , de acordo com a NBR 10004 – Classificação de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

O lixiviado apresentou concentração de sólidos totais entre 300 e 500 mg.L^{-1} , sendo que a maior parte é composta por sólidos fixos, provavelmente originados pela lixiviação dos compostos inorgânicos da pasta de cimento. Houve uma tendência de redução da concentração de sólidos totais com o aumento do teor de material cerâmico.

Os valores de DQO não foram elevados, visto que não foi detectada pelo método matéria orgânica nos componentes do concreto. A matéria orgânica pode ter origem numa possível contaminação, principalmente na fase de separação do RCD no local de origem.

Após 72 h de imersão verificou-se que o pH do lixiviado continuou alcalino com valores elevados, acima de 10,00. Os concretos com as menores quantidades de material cerâmico continuaram a resultar nos maiores valores médios de pH.

Notou-se que a condutividade elétrica e alcalinidade se mantiveram em valores próximos à coleta inicial, apesar do maior tempo de incubação em água. Pode ser observado um indício de que a liberação dos compostos da pasta de cimento ocorreu de forma contínua e lenta.

Comparando-se com a coleta inicial houve uma redução considerável na concentração de sulfatos, não havendo diferença significativa nas concentrações. Todas as concentrações verificadas se situaram abaixo de $18,3 \text{ mg.L}^{-1}$.

Verificou-se ainda a presença de sólidos totais, compostos em sua maioria por sólidos fixos. As concentrações foram semelhantes aos valores encontrados na primeira coleta, não ultrapassando 500 mg.L^{-1} . Isso pode caracterizar um processo

constante de deterioração da pasta de cimento, ocasionada pela dissolução de seus componentes.

A DQO continuou a se situar em valores inferiores a 11 mg.L^{-1} . Não ocorreu diferença estatística entre nenhum dos tratamentos avaliados, houve grande variabilidade entre as repetições.

Os concretos que continham cerâmica em sua composição (AR-10 a AR-100) continuaram a apresentar redução no pH, condutividade elétrica, alcalinidade e sólidos totais com o acréscimo de material cerâmico. A concentração de sulfatos, no entanto, não diferiu estatisticamente entre os tratamentos.

Na terceira coleta, o pH do lixiviado continuou alcalino, não apresentando grande variação comparado às coletas iniciais. Todos os valores médios se situaram entre 11,00 e 12,00. O comportamento dos tratamentos se mantém com mesma tendência notada nas coletas anteriores.

Observou-se ainda que íons foram liberados na água, visto que a condutividade elétrica se manteve elevada. Houve um aumento considerável em relação à primeira coleta. A alcalinidade, no entanto, não resultou em grandes diferenças com relação à coleta após 72 h de imersão.

Com exceção do tratamento AR-10, houve uma redução na concentração de sulfatos. Não houve diferença estatística entre os tratamentos, embora a concentração de sulfatos nas amostras do AR-10 seja consideravelmente superior às demais amostras.

A quantidade de sólidos totais no lixiviado permaneceu com valores abaixo de 500 mg.L^{-1} , sendo a sua maior parte composta por sólidos fixos. Não houve grande variação em relação ao intervalo de tempo anterior.

Na coleta após 384 h de exposição, verificou-se que o pH do lixiviado ainda era alcalino. Ocorreu um pequeno aumento do pH em relação às coletas anteriores.

Houve um aumento considerável na condutividade elétrica do lixiviado, principalmente nos tratamentos A-NAT, AR-0. Isso se deve ao maior tempo de contato com água, embora não tenha ocorrido aumento significativo na alcalinidade total. As concentrações de sulfato foram mínimas, no entanto o tratamento AR-10 ainda apresentou valor superior aos demais, conforme havia ocorrido nas demais coletas. Notou-se ainda a presença de sólidos totais com valores semelhantes às coletas anteriores. Os valores de DQO foram superiores aos das coletas anteriores, resultando em até $78,9 \text{ mg.L}^{-1}$, correspondente ao tratamento A-NAT. Os valores de

DQO do lixiviado podem ter origem da interferência de íons inorgânicos (APHA, 1998), como o íon Fe^{2+} , também presente no lixiviado de concretos (JUNG et al., 2014).

Analisando o comportamento do lixiviado ao longo do período de 16 dias, o pH do mesmo se manteve alcalino mesmo após a renovação da água. Notou-se que o pH se elevou rapidamente nos tempos iniciais, como observado na coleta após 24h. Observa-se na Tabela 8 que o aumento de pH entre a 1ª e 2ª coletas é maior quando comparado entre as 2ª e 3ª coletas. Isso foi verificado também no estudo de Jung et al. (2014), que constataram que após 100 minutos iniciais a evolução do pH ocorre de forma mais lenta.

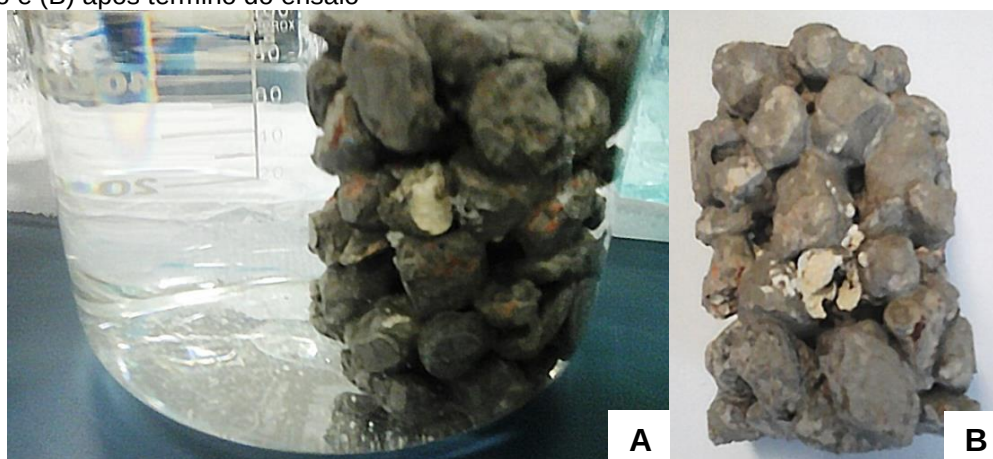
Conforme Engelsen et al. (2012), devido ao efeito de carbonatação do concreto, há uma tendência de redução do pH do material. Esse processo ocorre quando pela dissolução de CO_2 na água capilar do concreto, que consome $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de cimento, ocasionando assim a redução do pH. Porém isso ocorre ao longo da vida útil do concreto. No período total de 16 dias não houve alteração considerável do pH em qualquer tratamento, exceto na coleta inicial.

A condutividade elétrica se manteve com valores altos, ocasionado pela liberação de íons da pasta de cimento. Ao longo do teste não houve influência direta do tipo de agregado, porém notou-se que a condutividade tendeu a crescer em maiores valores de pH do lixiviado (Figura 20). Nos tratamentos A-NAT, AR-0 e AR-10 os valores de condutividade elétrica foram crescentes em função do tempo decorrido de ensaio. Nos demais tratamentos ocorreram quedas nos valores médios na 2ª coleta, voltando a crescer. A análise nas quatro coletas indicou uma tendência de que a liberação de íons é constante, fato que pode ser intensificado também pela maior área superficial do concreto permeável, em função de seus vazios.

A concentração de sulfato ao longo das coletas reduziu, podendo-se concluir que a lixiviação do íon tendeu a se estabilizar. Neste caso, a lixiviação inicial foi a que apresentou maior impacto na água de imersão dos corpos de prova. No entanto, em todas as coletas observou-se que a concentração de íons sulfatos foi superior no tratamento AR-10. Esperava-se que os tratamentos AR-25, AR-50 e AR-100 resultassem em uma maior quantidade de sulfatos, visto que foram confeccionados com maior teor de cerâmica. No entanto, foi constatado visualmente que o tratamento AR-10 estava contaminado com gesso.

Na Figura 23 (A) nota-se a presença de uma amostra de fragmento de gesso exposto, sem cobertura pela pasta de cimento. Ao longo do teste de lixiviação foi verificado que houve dissolução de grande parte da massa de gesso, conforme a Figura 23 (B).

Figura 23 – Corpo de prova do tratamento AR-10 contaminado com gesso (A) durante o ensaio de lixiviação e (B) após término do ensaio



Fonte: O autor.

A contaminação por gesso também pode ter ocorrido nos demais tratamentos, porém não foi constatado nenhum fragmento de gesso exposto. Na Tabela 10 estão relacionados os valores de sulfato para cada repetição do tratamento AR-10.

Tabela 10 – Concentração de sulfato na amostra de concreto contaminado com gesso, em comparação com amostras não contaminadas do tratamento AR-10

Repetição	$\text{SO}_4^{2-} \text{ (mg.L}^{-1}\text{)}$			
	24h	72h	168h	384h
1	24,8	2,6	4,3	3,4
2	16,5	1,2	1,4	12,6
3	74,1	55,4	76,0	68,5
4	17,6	7,0	1,2	1,2
5	16,9	5,5	1,2	1,2
Média	30,0	18,3	22,2	21,6

Fonte: O autor.

Conforme a Tabela 10, a repetição 3 apresentou a maior concentração de sulfato em todas as coletas. Mesmo após 384h em contato com a água, o concreto contaminado continuou liberando 68,5 mg.L⁻¹ de sulfato, concentração três vezes superior à média das repetições.

Analisando os resultados da DQO, não foi possível estabelecer uma relação entre os tratamentos ou entre os tempos de coleta. Na coleta com 168 h, elevados valores de DQO em relação aos demais tempos foram notados, sendo valores incoerentes com o comportamento esperado, visto que não foi a coleta com maior tempo de contato com a água. Esses valores pontuais não foram esperados, podendo ser atribuídos a alguma interferência no procedimento experimental.

A alcalinidade apresentou variação entre as coletas, porém não foi constatada nenhuma tendência ao longo do tempo de ensaio. Nos tratamentos A-NAT e AR-0 a alcalinidade foi superior no tempo de 24 h, apresentando menores concentrações nas coletas seguintes. Já nos demais tratamentos, a alcalinidade tendeu a se elevar até a última coleta. Conforme a Figura 21, ao longo dos 16 dias a alcalinidade foi devida a hidróxidos. Na coleta de 384 h a alcalinidade devida a carbonatos foi superior às demais coletas, provavelmente associada a maior dissolução do gás carbônico atmosférico

Em todas as coletas foram determinadas concentrações de sólidos totais entre 250 e 500 mg.L⁻¹. Não houve nenhuma tendência entre a concentração de sólidos e o tempo de imersão em água. Do total de sólidos, entre 67,6 e 80,8% correspondiam a sólidos fixos.

De forma geral, a lixiviação do concreto é um processo contínuo e influenciado pelo pH da água de imersão. O principal composto liberado do concreto é o hidróxido de cálcio (JEBLI et al., 2016) sendo que a sua lixiviação ocorre até que a maior parte do constituinte seja eliminada, deixando assim os demais constituintes da pasta de cimento suscetíveis à lixiviação (METHA; MONTEIRO, 2008).

5.5 ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

Os elementos analisados foram Cr, Cd, Pb, Ba e Zn, no entanto foram detectados apenas cromo e cádmio. Chumbo, zinco e cobre não foram detectados devido ao elevado pH do lixiviado. Na faixa de pH de 10 a 12 a lixiviação dos elementos é mínima, conforme exposto na Figura 6 (ENGELSEN et al., 2010). As análises estatísticas dos resultados obtidos constam no Apêndice B.

Na Tabela 11 estão expostas as concentrações médias encontradas no lixiviado do concreto permeável.

Tabela 11 – Concentração média de três repetições de elementos potencialmente tóxicos no lixiviado do concreto

do concreto								
Elemento	Cr (mg.L ⁻¹)				Cd (mg.L ⁻¹)			
Trat.	24h	72h	168h	384h	24h	72h	168h	384h
A-NAT	0,016 b	0,005 a	0,005 a	0,002 a	0,032 bc	0,048 d	0,063 d	0,070 d
AR-0	0,022 b	0,003 a	0,000 a	0,001 a	0,078 abc	0,083 c	0,088 c	0,091 c
AR-10	0,005 b	0,004 a	0,000 a	0,000 a	0,099 ab	0,100 b	0,108 b	0,110 b
AR-25	0,000 b	0,000 a	0,000 a	0,000 a	0,113 a	0,120 a	0,123 a	0,129 a
AR-50	0,013 b	0,002 a	0,003 a	0,000 a	0,089 ab	0,006 e	0,009 e	0,005 f
AR-100	0,083 a	0,008 a	0,004 a	0,004 a	0,009 c	0,010 e	0,013 e	0,013 e
CV (%)	58,12	134,23	158,55	236,97	41,77	5,28	4,83	4,00

Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente no teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Conforme a Tabela 11, em todos os tratamentos foi detectada a presença de cromo no lixiviado, com exceção da amostra AR-25. Não houve relação direta entre o teor de material cerâmico e a concentração de cromo, no entanto o tratamento AR-100 foi o que liberou maior quantidade do elemento na água, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Mesmo o concreto confeccionado com agregado natural liberou cromo no lixiviado, provavelmente devido à lixiviação da pasta de cimento.

Rey et al. (2015) verificaram concentrações elevadas de Cr em materiais cerâmicos, ocorrendo lixiviação entre 0,847 e 4,266 mg.kg⁻¹ do elemento. Os valores elevados encontrados pelos autores ocorreu devido à presença do elemento nas argilas utilizadas na confecção das cerâmicas. Isso pode ser presumido neste trabalho, visto que o tratamento AR-100 liberou a maior quantidade de cromo.

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2017), as argilas para a fabricação de cerâmica vermelha geralmente são compostas por illita, caulinita, pequenos teores de montmorilonita e compostos de ferro. De acordo com Luchese, Favero e Lenzi (2002), a caulinita (Al₄Si₄O₁₀(OH)₈) é uma estrutura rígida e não expansível, formadas por lâminas tetraédricas de Si e Al unidas por meio de oxigênios apicais destas; as illitas são originadas de micas (formadas pela reunião de tetraedros de Si⁴⁺ no centro e O nos vértices) que sofrem grande substituição de Si⁴⁺ por Al³⁺ e; as montmorilonitas são minerais formados pela reunião de lâminas tetraédricas de Si, intercaladas por lâminas octaédricas de Al, ocorrendo substituição de Al³⁺ por Mg²⁺ nos octaedros.

A presença de cromo nas argilas pode ser explicada por sua capacidade de adsorção do elemento. Abid; Galai e Ayadi (2010) verificaram que a argila illita pode remover cromo de meios aquosos, enquanto que Kumar et al. (2012) também

observaram que a montmorilonita modificada possui alta eficiência na adsorção de cromo.

A presença de cromo nos concretos A-ANT e AR-0 pode ser explicada pela adição de compostos ao cimento no processo de fabricação (GALVÍN et al., 2014a). Milanez, Fernandes e Porto (2009) relataram que o cimento possui pequenas quantidades de metais originados nas impurezas das matérias-primas e dos combustíveis utilizados na fabricação do material. O cromo, por ser um metal não volátil, é incorporado ao clínquer. Os autores afirmam que a coqueificação (utilização de resíduos em substituição aos combustíveis convencionais em fornos de cimento) pode aumentar a concentração dos elementos no cimento.

Matos e Nóbrega (2009) analisaram cimentos de diferentes fabricantes no Brasil, identificando cromo em três dos sete produtos analisados. Os autores encontraram concentrações de até 88,0 mg.kg⁻¹, não atendendo a padrões internacionais, como da União Europeia. Apenas o tratamento AR-100 ultrapassou o limite estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004), de 0,050 mg.L⁻¹. No entanto, isto ocorreu apenas na primeira coleta do lixiviado, enquadrando-se ao limite a partir da coleta com 72 h de imersão.

As maiores concentrações de cromo foram observadas na coleta com 24 h. Nos demais intervalos de tempo, as concentrações foram todas inferiores 0,008 mg.L⁻¹, não havendo diferença estatística entre os tratamentos. Notou-se a tendência de redução da liberação de cromo ao longo do tempo, porém é importante notar que o pH também pode ter influenciado no processo de lixiviação, visto que o mesmo não foi constante no período de ensaio. Na coleta de 24 h, a liberação de cromo pode ter ocorrido em função da presença de sulfatos no lixiviado. Conforme Müllauer; Beddoe e Heinz (2012) tanto o cromo como vanádio podem ser liberados com mais facilidade em meios contendo sulfato. Nas coletas de 72, 168 e 384 h, as concentrações de cromo foram menores do que às da extração inicial, coincidindo com menores concentrações de sulfato.

Foram detectadas elevadas concentrações de cádmio no lixiviado. O tratamento AR-100 foi o que resultou na menor concentração de Cd na primeira coleta, enquanto que no tratamento AR-25 a concentração foi máxima. Em todos os tratamentos o valor médio excedeu o limite de 0,005 mg.L⁻¹, estabelecido pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004). De acordo com Engelsen et al. (2010) a lixiviação de cádmio é mínima em um pH superior a 10,0. Neste trabalho verificou-se a liberação

de até $0,129 \text{ mg.L}^{-1}$, correspondente ao tratamento AR-25, mesmo para um pH acima de 10,0. Entretanto, esse valor corresponde ao pH no momento da coleta. O pH da água ultrapura era de 6,26, podendo ocasionar lixiviação do elemento nos períodos iniciais do teste de lixiviação.

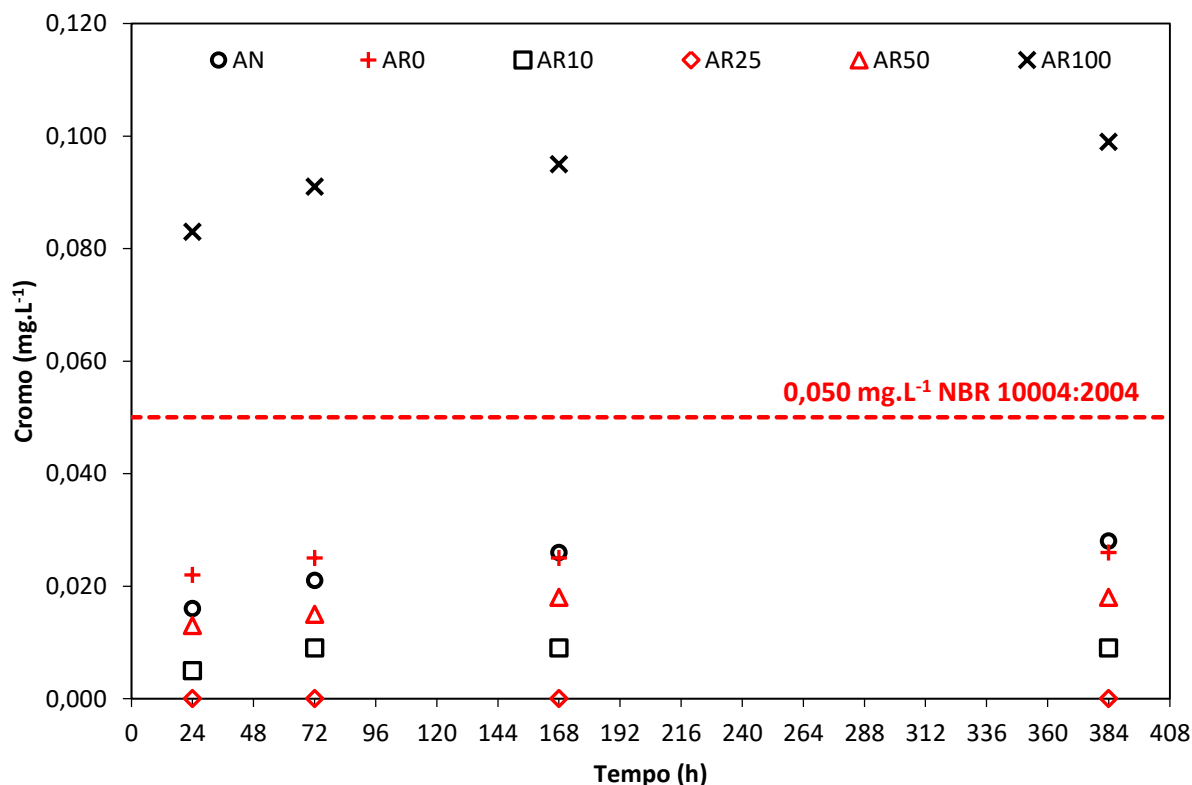
A lixiviação de cádmio não foi controlada pelo teor de material cerâmico no concreto. Shaefer (2007) verificou que agregados provenientes de usinas de beneficiamento de RCD possuíam elevada quantidade de cádmio no lixiviado. Da mesma forma que o cromo, o cádmio pode ser originado do processo de fabricação do cimento. No entanto, o cádmio é um metal semivolátil, passando por ciclos dentro do forno de cimento, sendo que parte é incorporada ao clínquer e parte é liberada para o ambiente (MILANEZ; FERNANDES; PORTO, 2009). Halim et al. (2004) verificaram que o cádmio está presente em resíduos cimentícios na forma $\text{Cd}(\text{OH})_2$, sendo a solubilização deste composto a provável fonte de cádmio no lixiviado. De acordo com os autores o elemento está encapsulado nos poros da matriz cimentícia, ficando exposto à lixiviação após a dissolução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Porém, a solubilidade de Cd é maior para uma faixa de pH entre 3 e 5, decrescendo a medida que o pH aumenta (HALIM et al., 2004).

O concreto confeccionado com agregado natural apresentou concentração de cádmio intermediária quando comparado aos demais tratamentos, resultando em uma concentração máxima de $0,070 \text{ mg.L}^{-1}$. A liberação de cádmio pelo concreto AR-0 foi superior ao concreto A-NAT, o que indica uma maior concentração do elemento nos agregados reciclados de concreto. Os concretos AR-10 e AR-25 também liberaram mais cádmio do que o concreto A-NAT, o que pode ter ocorrido pela utilização do RCD como agregado. Nos tratamentos AR-50 e AR-100 a quantidade liberada de Cd foi inferior ao concreto confeccionado com agregado natural, provavelmente devido a menor quantidade de RCD no agregado.

Ao contrário do cromo, a concentração de cádmio aumentou ao longo do tempo de ensaio, com exceção do tratamento AR-50. Notou-se assim que mesmo após 16 dias de ensaio, o concreto continuou liberando Cd na água. Isso foi observado principalmente nos tratamentos com maior quantidade de cimento e RCD. Isto pode ser explicado pelo cádmio estar encapsulado na matriz cimentícia, sendo liberado proporcionalmente à lixiviação de hidróxido de cálcio da estrutura do concreto (HALIM et al., 2004).

De acordo com a metodologia italiana descrita no Decreto Ministerial de 5 de fevereiro de 1998 (ITÁLIA, 1998), a concentração acumulada de cromo ao longo dos 16 dias não deve exceder $0,050 \text{ mg.L}^{-1}$, enquanto que a concentração acumulada de cádmio não deve ultrapassar o valor limite de $0,005 \text{ mg.L}^{-1}$. A concentração média acumulada de cromo no lixiviado pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 – Concentração acumulada de cromo no lixiviado, ao longo de 16 dias de ensaio

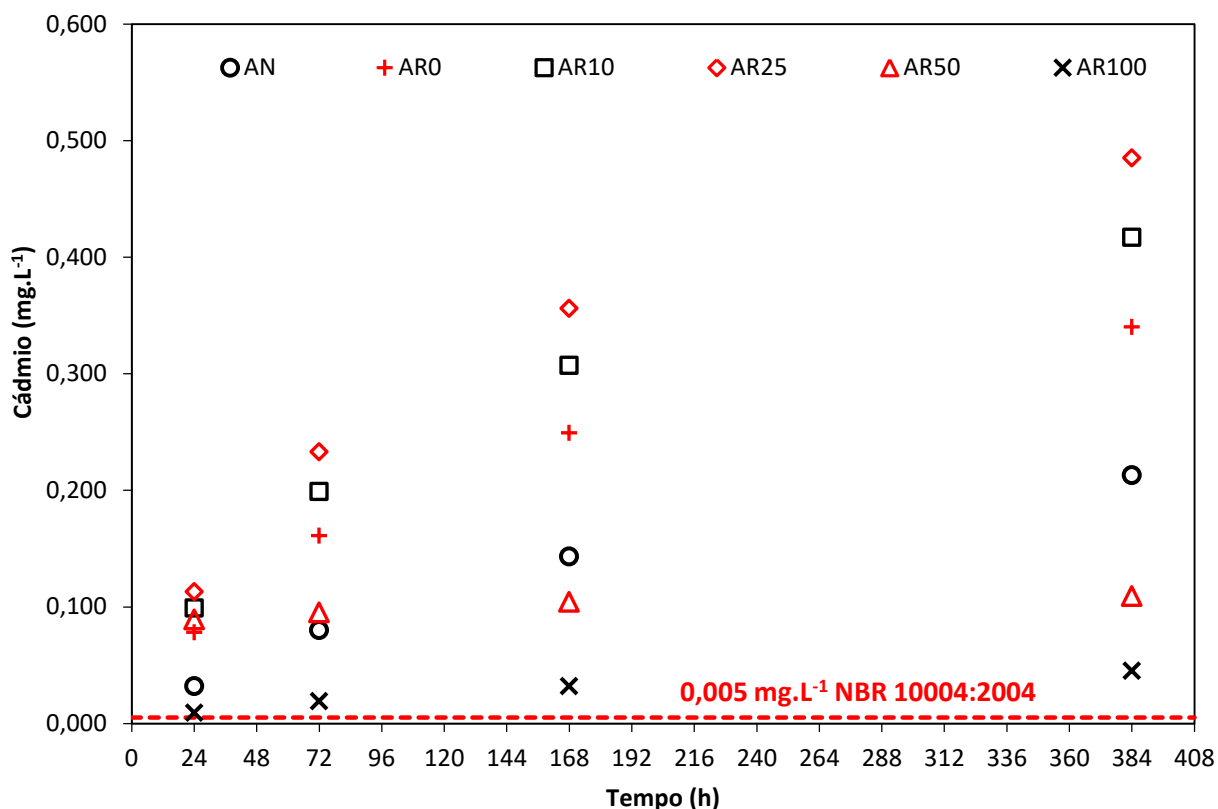


Fonte: O autor.

Analisando as curvas de concentração acumulada, pode-se visualizar que a partir de 72 h de imersão, não ocorreu aumento considerável de Cr. Dos seis tratamentos, apenas o AR-100 ultrapassou a concentração limite de $0,050 \text{ mg.L}^{-1}$ (ITÁLIA, 1998), atingindo um valor acumulado de $0,099 \text{ mg.L}^{-1}$. Mesmo para um tempo maior de exposição, os demais tratamentos provavelmente não lixiviariam uma concentração nociva de cromo, visto que entre a 3ª e 4ª coletas não houve aumento considerável nas concentrações acumuladas.

As concentrações de Cd no lixiviado estão expostas na Figura 25.

Figura 25 – Concentração acumulada de cádmio no lixiviado, ao longo de 16 dias de ensaio



Fonte: O autor.

Observando a Figura 25, notou-se que, de forma geral, houve uma liberação rápida de Cd nas primeiras horas de ensaio. A partir de 168 h, a lixiviação de cádmio foi mais lenta, porém ainda ocorreu de forma crescente.

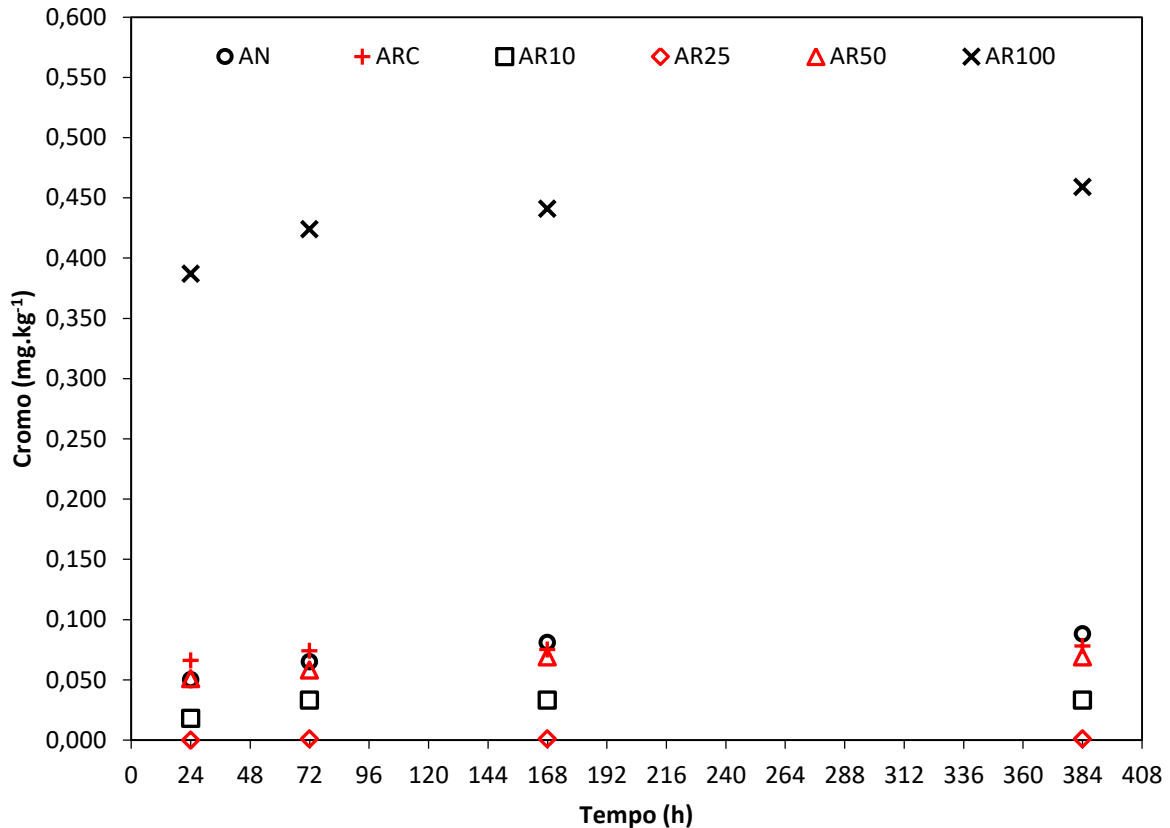
Todos os tratamentos ultrapassaram o limite de 0,005 mg.L⁻¹ da metodologia italiana, sendo que a concentração acumulada máxima chegou a até 0,485 mg.L⁻¹. Isso demonstra a necessidade de atenção para a lixiviação do concreto, tanto convencional como permeável, visto que concentrações até 100 vezes superior ao limite foram observadas.

Os tratamentos A-NAT, AR-0, AR-10 e AR-25 provavelmente continuariam a liberar Cd caso houvesse a extrapolação do tempo de ensaio, nas mesmas condições do meio líquido. Já para os tratamentos AR-50 e AR-100, houve pouco acréscimo na concentração do metal a partir da coleta de 72 h, indicando que mesmo em um tempo maior de exposição a liberação do elemento provavelmente não seria tão expressiva como nos demais concretos.

As concentrações de cromo e cádmio também foram analisadas em relação à massa de concreto, visto que a massa específica variou entre os tratamentos. Na

Figura 26 estão ilustradas as concentrações acumuladas de cromo, expressas em mg.kg^{-1} .

Figura 26 – Concentração acumulada de cromo liberada pelo concreto, ao longo de 16 dias de ensaio



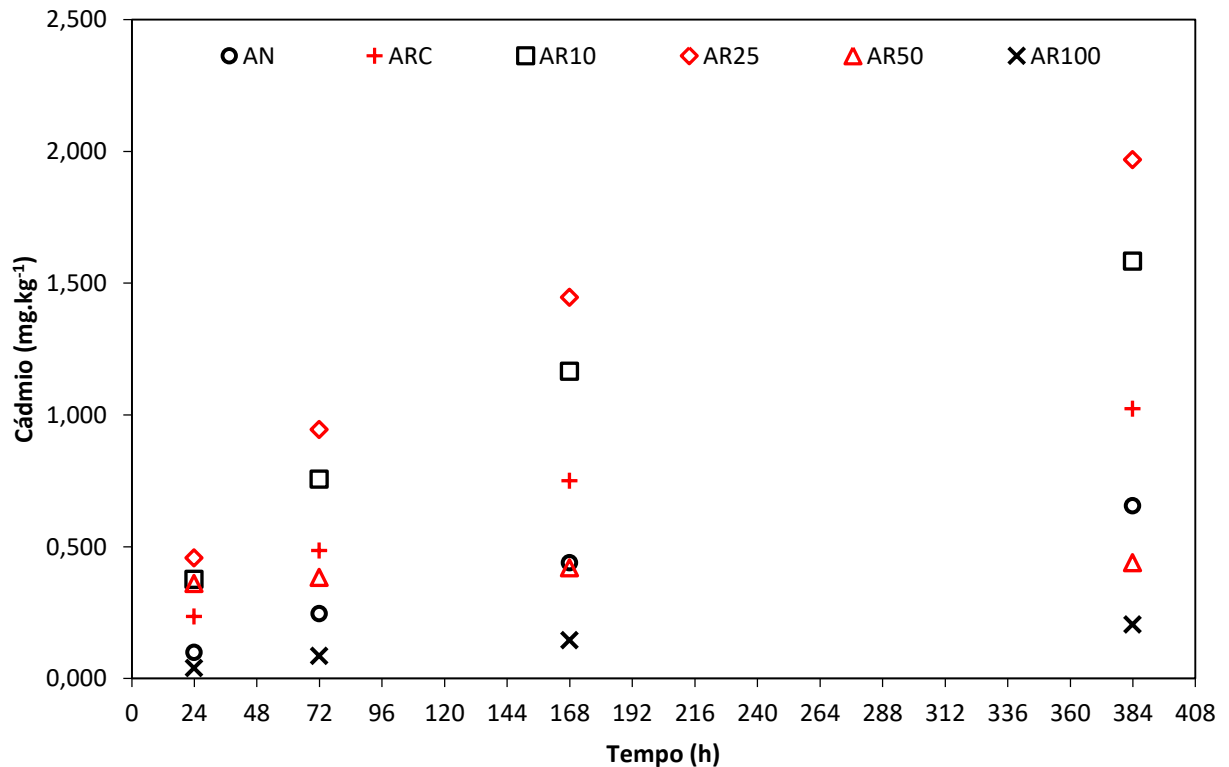
Fonte: O autor.

Analisando as concentrações na Figura 26, observou-se que a quantidade lixiviada de cromo foi inferior aos valores constatados por Engelsen et al. (2010), que se situaram entre 0,1 e 1 mg.kg^{-1} de cromo para um pH entre 10 e 12. Neste estudo as concentrações foram inferiores a 0,1 mg.kg^{-1} , com exceção do tratamento AR-100. A lixiviação de cromo do concreto AR-100 tornou-se ainda mais significativa nesta análise, atingindo um valor acumulado de 0,459 mg.kg^{-1} , aproximadamente 5,2 vezes superior à concentração acumulada de Cr do tratamento A-NAT.

O tratamento AR-25 apresentou comportamento anômalo, visto que não foi detectada presença de Cr. Como nesse concreto foi utilizado o mesmo material dos tratamentos AR-10, AR-50 e AR-100, esperava-se detectar o elemento no lixiviado.

Na Figura 27 estão ilustradas as concentrações acumuladas de cádmio, em mg.kg^{-1} .

Figura 27 – Concentração acumulada de cádmio liberada pelo concreto, ao longo de 16 dias de ensaio



Fonte: O autor.

A presença de cromo no concreto AR-100 e de cádmio em todos os tratamentos deve ser levada em consideração na utilização do pavimento permeável. Os elementos lixiviados podem oferecer risco ao ambiente, podendo ocorrer contaminação do solo e das águas subterrâneas. Além disso, a lixiviação dos mesmos pode inviabilizar o reuso da água que infiltra no pavimento.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.6.1 Considerações sobre o teste de lixiviação

É importante notar que embora o teste de lixiviação tenha o objetivo de simular condições reais da lixiviação do material, existem fatores que podem influenciar nos resultados. A seguir estão descritas algumas considerações a respeito do teste de lixiviação:

- Tipo de ensaio: o ensaio adotado foi de imersão, com substituição da água em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Em condições de campo, o pavimento permeável estará sujeito a um escoamento das

águas pluviais descontinuamente. Nesse caso há uma situação dinâmica, que poderá ter um comportamento diferente do caso estático do teste de imersão;

- b) Relação Líquido/sólido: para a análise do lixiviado, foi adotada a relação 1:5 entre o volume da amostra e o volume de água utilizada. Nas condições reais essa proporção não é constante, dependendo da intensidade da precipitação. Dessa forma a concentração de elementos potencialmente tóxicos no lixiviado pode variar dependendo da quantidade de água em contato com o concreto;
- c) Volume de vazios do concreto: a quantidade de vazios no concreto permeável também é outro fator que pode influenciar na lixiviação. Um concreto que possua maior volume de vazios proporcionará maior contato com a água e, conseqüentemente, pode intensificar o processo de lixiviação;
- d) Características da água da chuva: as características físico-químicas da água da chuva também podem interferir no processo de lixiviação. A alteração do pH pode provocar uma maior ou menor liberação de elementos potencialmente tóxicos no lixiviado;
- e) Estado de conservação do pavimento: o tipo de agregado utilizado na confecção do concreto permeável influencia na lixiviação do material, principalmente no que se refere à liberação de cromo e sulfato. Caso os agregados tenham sua superfície exposta (devido à degradação, por exemplo), a liberação dos elementos pode ser intensificada;
- f) Carbonatação do concreto: a carbonatação do concreto também pode alterar as condições da lixiviação, principalmente em relação ao pH. A longo prazo essa alteração pode influenciar na liberação de poluentes;
- g) Destino final do lixiviado: a concentração de elementos potencialmente tóxicos foi analisada conforme a metodologia do teste de lixiviação, no entanto é importante verificar os requisitos de acordo com o destino final da água infiltrada no pavimento. No caso da infiltração no solo, devem ser observados os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), que dispõe sobre a qualidade das águas subterrâneas.

5.6.2 Considerações gerais

Na confecção do concreto permeável, tanto os agregados naturais como os agregados reciclados podem ser utilizados na sua composição. O objetivo de produzir um material com capacidade de drenagem pluvial em pavimentos foi alcançado, visto que todos os tipos de concreto apresentaram um coeficiente de permeabilidade suficiente. Os agregados que possuíam cerâmica em sua composição resultaram em menor permeabilidade do concreto, no entanto todos os resultados estão acima do valor mínimo de $0,10 \text{ cm.s}^{-1}$.

Entretanto, a viabilização do uso de resíduos de construção compreende tanto a análise das características técnicas quanto as condições ambientais afetadas pelo material. No que se refere à resistência do material, nenhum tratamento atingiu a resistência à compressão mínima de 20 MPa. Esse concreto permeável seria limitado, então, a utilizações cujas solicitações não sejam elevadas, como pisos externos e calçadas. Os resultados de resistência são referentes ao traço 1:5 utilizado na confecção dos concretos. Portanto, materiais mais resistentes podem ser obtidos principalmente pelo aumento da quantidade de cimento na mistura.

Uma observação importante é que o concreto permeável confeccionado com agregado reciclado de concreto apresentou uma resistência superior ao agregado natural, demonstrando que o material reciclado pode apresentar boa qualidade para seu uso na construção civil. No entanto, a presença de material cerâmico afetou diretamente as propriedades mecânicas do concreto, o que restringe a utilização de resíduos de construção e demolição. Verificou-se neste estudo que, independentemente do teor de material cerâmico, a resistência ficou reduzida significativamente, encontrando-se valores abaixo de 3,2 MPa.

O impacto ambiental de um concreto permeável é intensificado em relação ao convencional. Isso ocorre pelo fato de ser utilizado normalmente em áreas sujeitas a precipitações e em contato com o solo. Além disso, há um aumento da área de contato com o concreto em função da elevada quantidade de poros na sua estrutura.

A liberação de poluentes na água pode contaminar o solo, cursos d'água e as águas subterrâneas, sendo fundamental analisar o comportamento do material. Além disso, uma das alternativas do pavimento permeável é o armazenamento da água para posterior reuso, sendo ainda mais importante sua análise. Nos testes iniciais de lixiviação verificou-se um aumento considerável no pH da água, devido ao

caráter alcalino do concreto. Em todo o período de análise do concreto o pH se manteve entre 10 e 12.

Em um período de 16 dias notou-se um crescente aumento da condutividade elétrica do lixiviado, indicando que o concreto liberou íons de forma contínua. Os valores de condutividade variaram entre os tratamentos, com valores situados em uma faixa entre 250 e 790 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$.

Foram encontrados valores de alcalinidade do lixiviado variando de 93 a 273 $\text{mgCaCO}_3.\text{L}^{-1}$. A alcalinidade e condutividade elétrica encontradas no lixiviado são justificadas pela liberação de compostos da pasta de cimento, como a dissolução de hidróxido de cálcio.

Verificou-se que tanto o concreto convencional como o concreto com agregados reciclados alteraram as propriedades físico-químicas da água. Isso pode ser explicado pela lixiviação da pasta de cimento, visto que os agregados estão em sua maioria cobertos pelo material. Foi observado que o tipo de agregado utilizado no concreto influenciou também nas características do lixiviado. No entanto, as variações obtidas podem estar relacionadas também com a quantidade de cimento na mistura (devido a grande variação na massa específica dos agregados).

Nota-se que a liberação de sulfato na água não foi elevada, sendo a concentração máxima observada de 71,7 $\text{mg}.\text{L}^{-1}$, referente ao tratamento com maior quantidade de material cerâmico. Constatou-se que os agregados reciclados contaminados por gesso podem implicar em uma maior liberação de sulfatos na água, o que pode ser nocivo ao concreto e também ultrapassar os limites de concentração para resíduos sólidos, estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

Com relação à presença de elementos potencialmente tóxicos, foram detectadas concentrações consideráveis de cromo e cádmio no lixiviado. Os elementos estiveram presentes tanto nas amostras coletadas do concreto convencional como dos concretos com agregado reciclado. A liberação de Cr não foi elevada na maioria dos tratamentos, ultrapassando o limite de 0,050 $\text{mg}.\text{L}^{-1}$ apenas no tratamento AR-100, devido à elevada quantidade de material cerâmico. Nota-se que nos demais casos a liberação de cromo se deve também à lixiviação da pasta de cimento. No entanto, a liberação dos elementos tende a se reduzir com o tempo.

Além do cromo foi detectado também cádmio no lixiviado, com concentrações mais elevadas. Em todos os tratamentos as concentrações superaram o limite de

0,005 mg.L⁻¹. As maiores concentrações foram observadas nos tratamentos AR-10 e AR-25, que possuíam maior quantidade de RCD em sua composição.

Pôde-se verificar que a utilização de agregados reciclados deve ser feita com cautela. Os resíduos de construção e demolição podem conter alto teor de material cerâmico, devido à falta de uma etapa de separação dos materiais. Isso compromete a qualidade do concreto confeccionado com esse agregado, limitando sua utilização. Além disso, os materiais cerâmicos podem conter cromo, aumentando a liberação do elemento na água.

O concreto permeável também pode ser utilizado como uma camada filtrante, permitindo a passagem apenas de líquidos. Entretanto, a questão da liberação de cromo e cádmio deve ser considerada, principalmente no que se refere ao destino do lixiviado. Em leitos de secagem de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto, por exemplo, o emprego do concreto permeável resultaria em um aumento na concentração de elementos potencialmente tóxicos.

Dessa forma, conclui-se que a utilização do RCD como agregado reciclado é uma alternativa para a redução da exploração de recursos naturais, bem como uma forma de reutilizar os resíduos da construção civil no próprio setor. No entanto, é essencial que ocorra separação dos materiais no processo de beneficiamento do RCD, visto que materiais cerâmicos afetam de forma negativa tanto as características técnicas do concreto como as propriedades do lixiviado. Além disso, outros contaminantes como o gesso, tintas, vernizes e outros produtos presentes nos resíduos podem comprometer a qualidade da água lixiviada.

6 CONCLUSÕES

Por meio dos procedimentos desenvolvidos neste estudo, as seguintes conclusões foram observadas com base nos resultados obtidos:

- A utilização de agregados com distribuição granulométrica uniforme proporcionou permeabilidade suficiente ao concreto permeável, porém o traço 1:5 não garantiu a resistência mínima de 20 MPa;
- A utilização de agregado reciclado de concreto não reduziu a resistência do concreto permeável, no entanto a inclusão de material cerâmico no agregado reciclado reduziu a resistência significativamente;
- O lixiviado do concreto permeável apresentou caráter alcalino em todo o período de ensaio;
- O pH, alcalinidade, condutividade elétrica e sólidos totais foram inversamente proporcionais à quantidade de material cerâmico no agregado devido a menor quantidade de pasta de cimento;
- Tanto os concretos contendo agregado natural como agregado reciclado liberam sulfatos, cromo e cádmio no lixiviado;
- O aumento do teor de material cerâmico no agregado resultou no aumento na concentração de cromo e cádmio no lixiviado;
- A lixiviação de cádmio ocorreu de forma crescente, podendo indicar que o elemento está contido na matriz cimentícia, sendo liberado à medida que Ca(OH)_2 é lixiviado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir estão relacionadas sugestões e recomendações para trabalhos futuros, contemplando questões que não puderam ser abordadas neste trabalho e observações pertinentes ao estudo da lixiviação do concreto permeável:

- Analisar a lixiviação do concreto em condições dinâmicas, simulando o escoamento das águas pluviais;
- Estudar as propriedades físicas e químicas do lixiviado para diferentes quantidades de cimento no concreto;
- Avaliar a lixiviação dos agregados no estado solto a fim de ser possível a comparação com a lixiviação do concreto;
- Determinar a concentração de elementos potencialmente tóxicos nos agregados e no cimento;
- Estudar a influência da contaminação do agregado por gesso nas propriedades físicas e químicas do lixiviado;
- Comparar a lixiviação do concreto permeável com a do concreto convencional;
- Estudo da durabilidade do concreto permeável submetido a diferentes condições ambientais;
- Avaliação da influência do tamanho, distribuição granulométrica do agregado na resistência e permeabilidade do concreto permeável.

REFERÊNCIAS

ABID, I. G.; GALAI, I.; AYADI, M. T. Retention of chromium (III) and cádmium (II) from aqueous solution by illitic clay as a low-cost adsorbent. **Desalination**, v. 256, p.190-195, mar. 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10 Report on pervious concrete**. ACI, 2010.

ALENCAR, A. C. M. F.; CABRAL, A. E. B. Avaliação de piso drenante com a utilização de agregados reciclados. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55., 2013, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado: IBRACON, 2013.

ANGULO, S. C. et al. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduo de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 61-73, abr./jun. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttxt&pid=S1678-86212013000200006&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 10 out. 2015.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. New York DC, 1998. 1569 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Matérias primas naturais**. Disponível em: <<http://abceram.org.br/materias-primas-naturais/>>. Acesso em: 28 fev. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 9781 Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

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

_____. **NBR 15116 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 16416 Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR NM 27 Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 45 Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

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

_____. **NBR NM 53 Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BARBUDO, A. et al. Correlation analysis between sulfate content and leaching of sulfates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1229-1235, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12000475>>. Acesso em: 6 set. 2016.

BATEZINI, R. BALBO, J. T. Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 3, p. 248-259, jun. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952015000300248&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 6 set. 2016.

BEHERA, M. et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector: a review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501-516, out. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814007181>>. Acesso em: 10 out. 2015.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 67-73, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181100701X>>. Acesso em: 10 out. 2015.

BHUTTA, M. A. R. et al. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243-1248, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813005400>>. Acesso em: 10 out. 2015.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 3 de Abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 7 de Abril de 2008.

_____. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, 13 dez. 2011.

BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds. **Journal of Hazardous Materials**, v. 276, p. 302-311, jul. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389414003781>>. Acesso em: 10 out. 2015.

BUTERA, S. et al. Construction and demolition waste: Comparison of standard up-flow column and down-flow lysimeter leaching tests. **Waste Management**, v. 43, p. 386-397, set. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1500327X>>. Acesso em: 11 out. 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações** – Fundamentos. v. 1, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005, 129. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2005.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, J. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research finding and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262-274, mai. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816301131>>. Acesso em: 6 set. 2016.

CORINALDESI, V. et al. Biomass ash and its use in concrete mixture. In: LIMBACHIYA, M. C.; KEW, H. Y. (Ed.). **Excellence in Concrete Construction through Innovation**. 1. ed. Londres: Taylor & Francis, 2009. p. 245-250.

ĆOSIĆ, K. et al. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69-76, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814013750>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CROUCH, L. K.; PITT, J.; HEWITT, R. Aggregate effects on pervious Portland cement concrete static modulus of elasticity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 7, p. 561-568, jul. 2007.

DAHLBO, H. et al. Construction and demolition waste management – a holistic evaluation of environmental performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 333-341, nov. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615001985>>. Acesso em 11 out. 2015.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 1, p. 402-412, nov. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509310010543>>. Acesso em: 6 set. 2016.

DIAS, J. F.; AGOPYAN, V. Determinação da absorção de agregados minerais reciclados porosos. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável/X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ENTAC, 2004.

ENGELSEN, C. J. et al. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 12, p. 1639-1649, dez. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610001778>>. Acesso em 6 set. 2016.

ENGELSEN, C. J. et al. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. **Science of the Total Environment**, v. 427-428, p. 86-97, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712005189>>. Acesso em: 6 set. 2016.

FERREIRA, D. F. **Sistema de análise de variância**. Versão 5.6. Lavras-MG: UFLA, 2015. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. São Paulo: ABGE, 2002. 132 p.

GALVÍN, A. P. et al. The effect of compaction on the leaching and pollutant emission time of recycled aggregates from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 294-304, nov. 2014a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614008026>>. Acesso em: 10 out. 2015.

GALVÍN, A. P. et al. Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: Physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete. **Waste Management**, v. 34, n. 9, p. 1693-1704, set. 2014b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14001810>>. Acesso em: 10 out. 2015.

HALIM, et al. Implications of the structure of cementitious wastes containing Pb(II), Cd(II), As(V), and Cr(VI) on the leaching of metals. **Cement and Concrete Research**, v. 34. p. 1093-1102, 2004.

HÖLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011, 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HUANG, B. et al. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 818-823, mai 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809003626>>. Acesso em: 6 set. 2016.

IBRAHIM, A. et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813008623>>. Acesso em: 10 out. 2015.

ITÁLIA. Decreto Ministerial de 5 de fevereiro de 1998. Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n°22. **Suplemento ordinário do Diário Oficial nº 88**, 16 abr. 1998.

ITAMBÉ. **Relatório de Ensaio**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368&chave=2016-13>>. Acesso em: 28 fev. 2017.

JACOB, J. S. et al. Análise da lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados. In: III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 3., 2009, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife: UFPE, 2009. Disponível em: <http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2009/2009_artigo_016.PDF>. Acesso em: 10 out. 2015.

JEBLI, M. et al. Influence of leaching on the local mechanical properties of aggregate-cement paste composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 241-250, out. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516301263>>. Acesso em 14 set. 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: <[http://globalconstroi.com/images/stories/M/anais_tecnicos/2010/reciclagem_residuos/CETESB.pdf](http://globalconstroi.com/images/stories/M/anuais_tecnicos/2010/reciclagem_residuos/CETESB.pdf)>. Acesso em: 11 out. 2015.

JOSHAGHANI, A. et al. Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. **Construction and Building Materials**, v. 101, n.1, p. 317-325, dez. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305158>>. Acesso em: 6 set. 2016.

JUNG, M. S.; HWANG, J. P.; KIM, J. H.; LEE, C. K.; ANN, K. Y. Enviromental contamination arising from concrete structures, part III: Alkali Leaching. **Journal of civil Engineering**, v. 19, n.6, p. 1597-1603, set. 2015.

KULAKOWSKI, M. P. et al. Contribuição à avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos: proposta de método para obtenção de extrato lixiviado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 69-81, out./dez. 2014. Disponível em: <www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/45723/32566>. Acesso em: 10 out. 2015.

KUMAR, A. S. K. et al. Potential application of dodecylamine modified sodium montmorillonite as an effective adsorbent for hexavalent chromium. **Chemical Engineering Journal**, v. 211-212, p. 396-405, set. 2012.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados com concreto permeável**. 2014, 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – na experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2664-2671, dez. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810001789>>. Acesso em: 10 out. 2015.

LUCHESI, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2002.

MACIEL, E. F. **Avaliação da lixiviação de cromo em monólito de concreto por imersão e irrigação**. 2015, 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O. **Conceitos e requisitos para pavimento de concreto permeável**. [S.l.]: ABCP, 2013. (Prática Recomendada n. 3).

MATOS, W. O.; NÓBREGA, J. A. Especificação de cromo em cimentos e derivados de cimento brasileiros. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2094-2097, set. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n8/v32n8a20.pdf>>. Acesso em 6 set. 2016.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S. de. Leaching in concretes containing recycled ceramic aggregate from the sanitary ware industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 85-91, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILANEZ, B.; FERNANDES, L. O.; PORTO, M. F. de S. A coincineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.14, n. 6, p. 2143-2152, dez. 2009.

MÜLLAUER, W.; BEDDOE, R. E.; HEINZ, D. Effect of carbonation, chloride and external sulfates on the leaching behaviour of major and trace elements from concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 618-626, mai. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512000224>>. Acesso em: 6 set. 2016.

NEITHALATH, N. **Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials**. 2004, 246 f. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 2004.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, n. 1, p. 802-813, ago. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580310001397>>. Acesso em: 10 out. 2015.

NNADI, E. O. et al. Stormwater harvesting for irrigation purposes: Na investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system. **Journal of Environmental Management**, v. 147, p. 246-256, jan. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714004344>>. Acesso em: 10 out. 2015.

OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 315-318, fev. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894650400037X?np=y>>. Acesso em: 11 out. 2015.

OLIVEIRA, M. E. D. et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 219-224, jul./set. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n3/v16n3a03.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2015.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de Scheelita em substituição ao agregado miúdo**. 2013, 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Manual de Drenagem Urbana**. Curitiba: SUDERHSA, 2002.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 5., 2015, Campinas. **Anais...** Capinas: PUC, 2015.

PERERA, G. G. et al. Utilização de resíduo de construção e demolição para produção de pavimentos de concreto permeável. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55., 2013, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado: IBRACON, 2013.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físicos-Químicos**. São Paulo: ABES, 2006.

REY, I. D. et al. Analysis of chromium and sulfate origins in construction recycled materials based on leaching test results. **Waste Management**, v. 46, p. 278-286, dez. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15300672>>. Acesso em: 6 set. 2016.

RIGHETTO, A. M. (Coord.) **Manejo de águas pluviais urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. (Projeto PROSAB, n. 4).

RODRIGUES, A. C. M.; GANS, P. S. **Análise de propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável com substituição parcial do agregado natural por agregado de resíduo de construção e demolição**. 2015, 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.

RODRÍGUEZ, G. et al. Assessment of construction and dmeolition waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 16-24, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614012748> >. Acesso em: 11 out. 2015.

ROZIÈRE, E. et al. Durability of concrete exposed to leaching and external sulfate attacks. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1188-1198, 2009.

SANI et al. Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. **Waste Management**, v.25, p. 177-182, 2005.

SHAEFER, C. O. **Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos da construção e demolicção (RCD) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias**. 2007, 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SCHIOPU, N. et al. Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 5, p. 1613-1630, fev. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896970801139X>>. Acesso em: 6 set. 2016.

SOLPUKER, U. et al. Leaching potential of pervious concrete and immobilization of Cu, Pb, and Zn using pervious concrete. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 161, p. 35-48, jun. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772214000461>>. Acesso em: 10 out. 2015.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75-90, fev. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952016000100075&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 6 set. 2016.

TEIJEIRA, P. S. **Concreto permeável de cimento Portland para utilização em lajotas destinadas a calçamento**. 2013, 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**. Skokie: Portland Cement Association, 2004.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850-859, out. 2015.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos Avançados**, v.22, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org.). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH GWP, 2003, v.1, p. 45-150.

VAN DER SLOOT, H. A. Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 15, n. 5, p. 298-310, 1998.

VAN DER SLOOT, H. A. Comparison of the characteristic leaching behaviour of cements using standard (EM 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1079-1096, 2000.

VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 192-204, out. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915300562>>. Acesso em: 11 out. 2015.

ZAETANG, Y. et al. Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 289-295, out. 2016a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815302701>>. Acesso em: 5 set. 2016.

ZAETANG, Y. et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15-21, mai. 2016b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816301209>>. Acesso em: 5 set. 2016.

APÊNDICE A – Análise estatística das propriedades do concreto

Tabela 12 - Análise de variância para os coeficientes de permeabilidade dos concretos elaborados com diferentes dimensões de agregado

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	1	0,000139	0,000139	0,0830	0,7874
Erro	4	0,006668	0,001667		
Total	5	0,006807			
CV (%)	4,79				
Média geral	0,8524	Nº Observações	6		

Fonte: O autor.

Tabela 13 - Análise de variância para os coeficientes de permeabilidade dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	5	0,086113	0,017223	54,103	0,0000
Erro	24	0,007640	0,000318		
Total	29	0,093753			
CV (%)	2,04				
Média geral	0,8748	Nº Observações	30		

Fonte: O autor.

Tabela 14 - Análise de variância para as resistências aos 28 dias dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	5	316,341620	63,268324	61,406	0,0000
Erro	24	24,727717	1,030322		
Total	29	341,069336			
CV (%)	20,44				
Média geral	4,966	Nº Observações	30		

Fonte: O autor.

Tabela 15 - Análise de variância para o índice de volume de vazios dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	5	0,01175	0,002355	3,929	0,0074
Erro	30	0,017980	0,000599		
Total	35	0,029755			
CV (%)	6,83				
Média geral	0,3584	Nº Observações	36		

Fonte: O autor.

Tabela 16 - Análise de variância para a absorção dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	5	0,179176	0,035835	2401,122	0,0000
Erro	30	0,000448	0,000015		
Total	35	0,179624			
CV (%)	3,40				
Média geral	0,1138	Nº Observações	36		

Fonte: O autor.

Tabela 17 - Análise de variância para a massa específica real dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	5	0,712400	0,142480	1036,251	0,0000
Erro	30	0,004125	0,000137		
Total	35	0,716524			
CV (%)	0,43				
Média geral	2,705	Nº Observações	36		

Fonte: O autor.

Tabela 18 - Análise de variância para a massa específica aparente dos concretos permeáveis elaborados com diferentes tipos de agregados

FV	GL	Soma Quadrados	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor
Tratamento	5	2,109715	0,421943	150,900	0,0000
Erro	30	0,083885	0,002796		
Total	35	2,193601			
CV (%)	3,88				
Média geral	1,364	Nº Observações	36		

Fonte: O autor.

APÊNDICE B – Análise estatística da caracterização do lixiviado

Tabela 19 – Resumo da análise de variância para parâmetros do lixivado após 24 h de ensaio

FV	GL	Quadrados Médios							
		pH	CE	Alcalinidade	DQO	SO ₄ ²⁻	ST	STF	STV
Trat	5	0,6866	93846,1	22511,6	42,67	1837,4	18101,3	3925,3	15285,3
Erro	24	0,0174	1947,2	5408,5	19,98	176,4	4960,0	4880,0	960,0
Total	29								
p-valor		0,0000*	0,0000*	0,0073*	0,0957	0,0000*	0,0135*	0,5577	0,0000*
CV (%)		1,15	9,13	36,58	144,1	36,11	21,04	26,73	42,25
Média		11,54	483,12	201,04	3,103	36,77	334,7	261,33	73,33
Nº Observ.		5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: O autor.

Tabela 20 – Resumo da análise de variância para parâmetros do lixivado após 72 h de ensaio

FV	GL	Quadrados Médios							
		pH	CE	Alcalinidade	DQO	SO ₄ ²⁻	ST	STF	STV
Trat	5	0,9578	132770,3	15454,9	83,39	61,67	1656,3	14517,3	1408,0
Erro	24	0,0134	1646,3	1070,2	33,07	96,21	1973,3	2640,0	1653,3
Total	29								
p-valor		0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0570	0,6707	0,0001*	0,016*	0,5272
CV (%)		0,99	8,45	16,94	75,49	94,05	12,67	20,18	42,36
Média		11,64	479,9	193,16	7,618	10,43	350,7	254,7	96,0
Nº Observ.		5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: O autor.

Tabela 21 – Resumo da análise de variância para parâmetros do lixivado após 168 h de ensaio

FV	GL	Quadrados Médios							
		pH	CE	Alcalinidade	DQO	SO ₄ ²⁻	ST	STF	STV
Trat	5	0,2823	91712,9	12813,6	5498,1	126,3	33461,3	18389,3	7904,0
Erro	24	0,0258	5264,7	1207,0	417,3	190,9	2320,0	2826,7	1973,3
Total	29								
p-valor		0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,6559	0,0000*	0,0006*	0,0088*
CV (%)		1,38	14,09	16,58	64,06	184,3	12,59	18,29	48,29
Média		11,68	514,9	209,5	31,89	7,496	382,7	290,7	92,00
Nº Observ.		5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: O autor.

Tabela 22 – Resumo da Análise de variância para parâmetros do lixivado após 384 h de ensaio

FV	GL	Quadrados Médios							
		pH	CE	Alcalinidade	DQO	SO ₄ ²⁻	ST	STF	STV
Trat	5	0,6204	161143,9	13815,6	231,0	138,2	36821,3	34389,3	2560,0
Erro	24	0,0108	1484,2	1485,7	77,07	147,4	4053,3	2346,7	2746,7
Total	29								
p-valor		0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0306*	0,4745	0,0001*	0,0000*	0,4779
CV (%)		0,88	6,49	17,74	104,63	163,28	17,55	18,17	54,59
Média		11,86	593,5	217,3	8,39	7,436	362,7	266,7	96,00
Nº Observ.		5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: O autor.

Tabela 23 – Resumo da análise de variância para concentração de cromo e cádmio no lixiviado

FV	GL	Quadrados Médios							
		Cr 24h	Cr 72h	Cr 168h	Cr 384h	Cd 24h	Cd 72h	Cd 168h	Cd 384h
Trat	5	0,0027	0,000023	0,000015	0,000008	0,0050	0,00683	0,006977	0,007756
Erro	12	0,0001	0,000023	0,000010	0,000008	0,0009	0,00001	0,000011	0,000008
Total	17								
p-valor		0,0001*	0,4440	0,2616	0,4768	0,0058	0,0000*	0,0000*	0,0000*
CV (%)		58,12	134,23	158,55	236,97	41,77	5,28	4,83	4,00
Média		0,023	0,004	0,002	0,001	0,070	0,061	0,067	0,069
Nº Observ.		3	3	3	3	3	3	3	3

Fonte: O autor.