

PUCRS

ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

GABRIELI LAZZARI VIEIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO E CINZAS VOLANTES NO  
DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL**

Porto Alegre

2020

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO E  
CINZAS VOLANTES NO DESEMPENHO DO CONCRETO  
PERMEÁVEL**

**GABRIELI LAZZARI VIEIRA**  
ENGENHEIRA CIVIL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**  
**Março, 2020**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

# **INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO E CINZAS VOLANTES NO DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL**

**GABRIELI LAZZARI VIEIRA**

ENGENHEIRA CIVIL

ORIENTADOR: PROF(a). DR(a). JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Março, 2020**

## Ficha Catalográfica

V658i Vieira, Gabrieli Lazzari

Influência da substituição do agregado reciclado e cinzas volantes no desempenho do concreto permeável / Gabrieli Lazzari Vieira. – 2020.  
78 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade.

1. Concreto permeável. 2. Agregado reciclado. 3. Cinza volante. 4. Propriedades mecânicas. 5. Microtomografia de raios-x. I. Andrade, Jairo José de Oliveira.  
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

## **INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO E CINZAS VOLANTES NO DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL**

**CANDIDATA: GABRIELI LAZZARI VIEIRA**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

**DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - ORIENTADOR**

### **BANCA EXAMINADORA**

**DR. ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE  
BLUMENAU**

**DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - PGETEMA - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900  
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625  
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br  
www.pucrs.br/politecnica

*“Então por que eu falo sobre os benefícios do fracasso? Simplesmente porque fracasso significa se despir do que não é essencial... Eu estava em liberdade, porque o meu maior receio já tinha sido realizado, e eu ainda estava viva...Então o fundo do poço se tornou a base sólida sobre a qual eu reconstruí a minha vida. Talvez vocês nunca falhem na escala que eu falhei, mas alguns fracassos na vida são inevitáveis. É impossível viver sem falhar em algo, ao menos que você viva de forma tão cautelosa que você pode não ter vivido de verdade – nesse caso, você falha por omissão. O fracasso me deu uma segurança interna que eu nunca tinha atingido passando em exames. Ele também ensinou coisas sobre mim que eu não poderia ter aprendido de nenhuma outra forma. Descobri que tinha uma grande força de vontade e mais disciplina que suspeitava; também descobri que eu tinha amigos cujo valor estava realmente acima de rubis. O conhecimento que você adquire sábia e fortemente a partir de uma derrota significa que você está, sempre, seguro de sua capacidade de sobreviver. Vocês nunca vão conhecer verdadeiramente a si mesmos, ou a força de seus relacionamentos, até que ambos tenham sido testados pela adversidade. Esse conhecimento é um verdadeiro dom, por isso que é adquirido arduamente, e tem significado para mim mais do que qualquer qualificação que já ganhei.”*

**J.K. Howling**

Dedico este trabalho à minha mãe Fátima e à minha madrinha Vanderli, por serem luz nas minhas noites mais escuras.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização de um projeto não é o sucesso de apenas um indivíduo, sucesso é o resultado de um grande trabalho em equipe.

Agradeço ao meu orientador, professor Jairo, pelos ensinamentos, pela dedicação e paciência durante a realização do mestrado.

Ao professor Ricardo Girardi e CIENTEC por tornarem possível a realização de ensaios essenciais no desenvolvimento do meu trabalho.

Ao Laboratório Central de Microscopia e Microanálise e ao Laboratório de Sedimentologia e Petrologia pelo auxílio durante a pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais de Construção, onde desenvolvi grande parte dos ensaios necessários neste projeto.

Ao apoio financeiro da CAPES, imprescindível para o desenvolvimento dos meus estudos.

Aos professores, funcionários e colegas do PGTEMA, que me auxiliaram no decorrer desses anos.

E, por fim, agradeço especialmente a minha família, ao meu pai Airo e minha mãe Fátima por todo incentivo e compreensão. E também aos meus padrinhos Cléo e Vanderli por serem meu porto seguro e manterem a certeza de que nunca estarei sozinha.



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
3.1. SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	17
3.1.1. <i>Emprego de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção dos concretos</i> .....	19
3.1.2. <i>Concreto permeável</i> .....	23
3.1.2.1 Propriedades Físicas.....	24
3.1.2.2 Propriedades Mecânicas .....	27
3.1.2.3 Entupimento .....	28
3.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS) .....	30
<b>4. MATERIAS E MÉTODOS: ARTIGO</b> .....	<b>35</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>66</b>
<b>6. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>67</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>68</b>
<b>ANEXO A - SUBMISSÃO DO ARTIGO</b> .....	<b>77</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – RESULTADOS ENSAIOS COMPRESSÃO OBTIDOS POR ÖZALP ET AL. (2016).....	23
FIGURA 2 – CONCRETO PERMEÁVEL .....	24
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE REALIZAÇÃO DA RBS.....	31
FIGURA 4 – QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES RELEVANTES NOS ÚLTIMOS ANOS .....	32
FIGURA 5 – ENSAIOS REALIZADOS NOS PERIÓDICOS ANALISADOS .....	34

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- CLASSIFICAÇÃO RCD.....	18
QUADRO 2 – DESTINAÇÃO DO RCD NOS PAÍSES EUROPEUS.....	20
QUADRO 3 – VALORES DE TAXA PERMEABILIDADE ENCONTRADOS EM PESQUISAS.....	25
QUADRO 4 – RESULTADO DAS BUSCAS .....	32
QUADRO 5 – QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES RELEVANTES POR PERIÓDICO .....	33

## RESUMO

VIEIRA, Gabrieli Lazzari. **Influência da substituição do agregado reciclado e cinzas volantes no desempenho do concreto permeável**. Porto Alegre. 2020. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A indústria da construção é responsável por grandes volumes de extração de matéria prima para fabricação do cimento, e além disso descarta resíduos de construção e demolição em aterros sanitários. O concreto permeável é considerado uma alternativa sustentável de pavimento, visto que sua principal característica é permear a água, possibilitando a sua reutilização. Nesse sentido, para uma adequada utilização é necessária uma otimização de suas propriedades: (no seu dimensionamento e manutenção para evitar o entupimento de seus vazios). O propósito desta pesquisa foi analisar o emprego de agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição além de cinza volante em concretos permeáveis. Assim, foram investigados concretos permeáveis, um com uma relação a/c de 0,25, 0,30 e outro mantendo a relação a/c constante (0,30) e 10% de substituição de cimento por cinzas volantes, todos com substituição de agregado natural por agregado reciclado (25, 50, 75 e 100%). Foram realizados ensaios de entupimento, abrasão superficial, resistência à compressão e flexão, coeficiente de permeabilidade, taxa de infiltração, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia de raios-X. Os resultados mostraram que a incorporação de 10% de cinza volante no concreto permeável com 75% de agregado reciclado mostrou um aumento de 6% na tendência ao entupimento em comparação com o concreto permeável de referência. Além disso, as amostras com maior teor de agregado reciclado foram mais propícias ao entupimento, onde a maior tendência foi encontrada no concreto com 50% de substituição, enquanto o concreto de referência foi 46% menos suscetível ao entupimento. Verificou-se que o aumento do agregado reciclado no concreto permeável gerou o aumento da abrasão superficial. A investigação microestrutural mostrou uma boa relação entre as propriedades macroestruturais e o índice de vazios em concretos permeáveis.

**Palavras-Chaves:** Concreto permeável; agregado reciclado; cinza volante; propriedades mecânicas; microtomografia de raios-x.

## ABSTRACT

VIEIRA, Gabrieli Lazzari. **Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete.** Porto Alegre. 2020. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The construction industry is responsible for large volumes of raw material extraction for cement manufacturing, and also disposes of construction and demolition wastes (CDW) in landfills. The pervious concrete is considered a sustainable alternative for pavement, since its main characteristic is to permeate the water, allowing its reuse. In this sense, for an adequate use it is necessary to optimize its properties in its dimensioning and maintenance to avoid the clogging of its voids. In this way, the main purpose of this research was to analyze the use of recycled aggregates (RA) from construction and demolition waste and fly ash in pervious concrete. Thus, two series of pervious concretes, one with a w/b ratio of 0.25, 0.30, and other keeping w/b ratio constant (0.30) and 10% of cement replacement by fly ash were investigated, all with replacement of natural by recycled aggregate (25, 50, 75 and 100%). Clogging, surface abrasion test, compressive and flexural strength, permeability coefficient, infiltration rate, scanning electron microscopy (SEM) and x-ray microtomography were performed. The results showed that the incorporation of 10% fly ash in pervious concrete with 75% of recycled aggregate content showed an increase of 6% tendency to clogging compared to the reference pervious concrete. In addition, the higher levels of recycled aggregate showed a greater tendency to clogging in samples, where the highest tendency was found in the 50% replacement concrete, while the reference concrete was 46% less susceptible to clogging. It was verified that the increase of the recycled aggregate content in pervious concrete provided the increase of surface abrasion. The microstructural investigation showed a good relationship between the macrostructural properties and the void content in pervious concretes”.

**Keywords:** pervious concrete; recycled aggregates; fly ash; mechanical properties; X-ray microtomography.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade e, conseqüentemente, da infraestrutura de pavimentos convencionais gera a impermeabilização do solo, ocasionando mudanças hidrológicas e variações na atmosfera que envolvem o ambiente. Assim, ocorre a diminuição da recarga das águas subterrâneas. Uma das estratégias adotadas para diminuição desses impactos é o sistema de concreto permeável (TENNIS, LEMING e AKERS 2004; HASELBACH et al., 2011; LI et al., 2013; CHANDRAPPA et al., 2016).

O concreto permeável é um concreto especial com um teor de vazios relativamente alto, com elevada permeabilidade à água em comparação ao convencional (SCHOLZ e GRABOWIECKI, 2007). Tal material tem sido cada vez mais utilizado como ferramenta de desenvolvimento de baixo impacto, que ajuda a gerenciar os impactos da construção de estruturas (SCHOLZ e GRABOWIECKI, 2007; BRUINSMA et al., 2018). Este tipo de concreto pode substituir o uso do concreto convencional, principalmente em locais com fluxo de veículos leves e também em estacionamentos (GARBER, RASMUSSEN e HARRINGTON 2011; WEISS et al., 2017).

O meio ambiente é beneficiado significativamente pelos concretos permeáveis, pois eles podem levar à redução da quantidade de escoamento de águas pluviais e melhorar a qualidade da água em relação ao total de sólidos suspensos, fósforo, nitrogênio e metais (McCAIN, SUOZZO e DEWOOLKAR, 2010; HOLMES, HART e KEVERN, 2017a, 2017b; KIM et al., 2017). Além disso, o problema do ruído do tráfego e o efeito da ilha de calor podem ser mitigados ao mesmo tempo.

Por outro lado, deve-se considerar a crescente geração de resíduos oriundos de diversas fontes, como formas de agressão ao meio ambiente. Segundo Özalp et al. (2016), a renovação urbana e os desastres naturais geram a demolição de edifícios mais antigos e como resultado há a produção de grandes quantidades de resíduos de construção e demolição (RCD). A disposição final dos mesmos é um grave problema social e ambiental. Em muitos países esses resíduos são enviados para aterros ou despejados em locais ilegais.

Nesse contexto, a reciclagem de resíduos de construção e demolição para uso como agregados na produção de novos concretos pode ajudar a minimizar o

problema do descarte e, assim, preservar recursos naturais (DAKWALEA; RALEGAONKAR, 2014). Portanto, a adição de agregado reciclado em substituição ao agregado natural é uma opção de reciclagem desses resíduos e produção de concretos permeáveis sustentáveis (ZAETANG et al., 2016). Ademais, podem ser usados para reduzir a taxa de escoamento de águas pluviais e em outras aplicações, como purificação de água, isolamento acústico e térmico (KIM; LEE, 2017).

Aliado a isso, a fabricação de cimento também é grande poluidora do meio ambiente, já que durante o processo de extração do calcário de pedreiras podem ocorrer desmoronamentos e erosões devido às vibrações produzidas no terreno ou pelo abandono de pedreiras já muito exploradas. Deve-se considerar que também são emitidos gases poluentes (CARON; HOELLER, 2014). As cimenteiras, em panorama global, são responsáveis pela emissão de 3% de todos os gases de efeito estufa e por 7% da emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mundial (na produção de uma tonelada de clínquer, é gerada uma tonelada de CO<sub>2</sub>), contribuindo em grande parte para o aumento dos problemas ambientais (PAL, 2018). A indústria do cimento libera também óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e compostos de chumbo, todos poluentes. A previsão é que a produção de cimento dobre nos próximos 40 anos, o que faria com que essas empresas fossem as causadoras por até 20% do total de emissões de CO<sub>2</sub>. Para evitar essa projeção, é necessário que o processo sofra alterações, já que dificilmente a demanda por cimento irá diminuir, o que demonstra a relevância desta pesquisa (WBCSD<sup>1</sup>, 2018).

Segundo Santos e Borja (2005), na construção civil também encontram-se outras maneiras para a reciclagem de resíduos que poderão ser utilizados para fabricação de cimento, tais como adições de sílica ativa, cinza volante, casca de arroz. Há também outras maneiras de utilização de resíduos na produção de concretos, como fibras de pneu (GUPTA; T. et al., 2014), resíduo de mármore e granito (TAJI et al., 2019), sílica ativa (FALLAH e NEMATZADEH, 2017), entre outros.

Dessa forma, pode-se perceber a importância deste trabalho, considerando a demanda por novas alternativas sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento

---

<sup>1</sup> Disponível em < <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>>. Acesso: 8 jun. 2019.

da construção civil atrelado à preservação ambiental. Assim, será possível encontrar alternativas para reduzir essas problemáticas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar as propriedades do concreto permeável com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD) e da substituição de cimento por cinza volante.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- avaliar a influência da substituição de agregado natural por RCD nas propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e resistência à abrasão superficial) do concreto permeável em diferentes níveis de porcentagem;
- avaliar a influência da substituição de cimento por cinza volante nas propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e resistência à abrasão superficial) do concreto permeável em 10% de porcentagem;
- investigar a permeabilidade e a taxa de infiltração de água do concreto no nível de 10% de substituição de cimento por cinza volante;
- investigar a permeabilidade e a taxa de infiltração de água do concreto em diferentes níveis de substituição de agregado graúdo por RCD;
- verificar a possibilidade de entupimento dos canais permeáveis através da presença de diversas quantidades de agregado miúdo no concreto permeável;  
analisar a microestrutura do concreto permeável por meio dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microtomografia.



### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo apresenta estudos sobre a utilização dos concretos permeáveis e os efeitos do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) nas suas propriedades físico-mecânicas.

#### **3.1. SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

A construção civil existe desde a Antiguidade, a fim de auxiliar o ser humano no seu desenvolvimento, porém a preocupação com os impactos ambientais que tais atividades gerariam não acompanhou esse mesmo ritmo de crescimento e visou apenas a obtenção de objetivos de forma imediata (CORRÊA, 2009). Arelado a isso, no Século XVIII, com o início da Revolução Industrial na Inglaterra, houve muitas mudanças econômicas e sociais, bem como a evolução dos processos produtivos. Após a internacionalização da Revolução, novas técnicas industriais passaram a ser empregadas, o que aumentou significativamente o volume de matérias-primas utilizadas, objetivando o crescimento econômico sem se preocupar com o meio ambiente. Com a expansão do capitalismo, a degradação ambiental tomou maiores proporções, assim evidenciando a necessidade de políticas e regras para preservação (GRANZIERA, 2009).

A maior parte de geração de resíduos ocorre na fase da demolição, o que agrava ainda mais o impacto da contaminação dos solos, da água e do ar. Desde 2002, o Brasil conta com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos relacionados à gestão de resíduos. Já em 2010, é criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos por meio da Lei 12.305/2010, definindo a forma como devem ser dispostos, tendo em vista o incentivo para a reciclagem e sustentabilidade. De acordo com a Resolução CONAMA 307, os resíduos da Construção Civil são classificados da seguinte forma (Quadro 1).

Quadro 1- Classificação RCD

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

Fonte: adaptado da Resolução nº 307 CONAMA, 2002.

A atividade de reciclagem de resíduos de construção iniciou-se no Brasil na década de 80, com um crescimento lento da atividade até o final da década de 90. Um crescimento mais acelerado da quantidade de usinas instaladas ocorreu após o ano de 2002, com a publicação da Resolução nº 307 do CONAMA. A partir desse ano os geradores começaram a ser responsáveis pelos resíduos fabricados, o que estimulou o setor privado a investir em usinas de reciclagem (ABRECON, 2016).

A construção civil é responsável pela utilização de 20%-50% de todos os recursos naturais consumidos (PROBERT et al., 2016). Em virtude da extração de jazidas, do consumo de energia elétrica, da geração de resíduos e do desmatamento, a indústria da construção civil é levada ao topo das atividades humanas com maior impacto ambiental, o que causa problemas urbanos, sociais e econômicos (JOHN, 2000).

Em razão do desenvolvimento urbano o cimento tem sido cada vez mais utilizado. Em 2018, foram fabricados 4,1 bilhões de toneladas, segundo a agência United States Geological Survey (USGS). Referente ao volume de produção, nenhum outro material se compara ao cimento. Essa enorme produção faz com que 10% das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> estejam relacionadas com a fabricação de concreto. Destas, 85% advêm da produção de cimento, o que equivale a aproximadamente 8% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> (HERNANDEZ; SCRIVENER, 2018). De acordo com Deboucha et al.(2017), durante o processo de calcinação, a cada tonelada de cimento fabricada, são liberadas em média de 0,8 a 1 tonelada de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

O aumento no interesse nas linhas de pesquisa em tecnologia e inovação referente ao aproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima no setor da construção civil é um reflexo da necessidade da reutilização de materiais. Uma proposta sustentável, na busca pela redução dos impactos ambientais, é a substituição parcial de algumas matérias-primas da fabricação do concreto por resíduos (LOPES et al., 2018).

### **3.1.1. Emprego de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção dos concretos**

Os resíduos de construção e demolição são originados depois de obras e reformas ou desastres naturais – como terremotos e demolição de prédios mais antigos – e levam a problemas ambientais, particularmente em áreas urbanas maiores. Além disso, a escassez de fontes de matérias-primas resultantes do aumento do uso de agregado motivou as partes interessadas na indústria da construção civil sobre a utilização de agregados reciclados (ÖZTÜRK et al. 2007, apud ÖZALP et al., 2016).

A enorme quantidade de detritos gerados na construção, demolição e renovação de estruturas está aumentando a demanda de aterros e induzindo problemas econômicos (STONER; WANKEL, 2008). De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos de 2018, realizado pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), o Brasil gerou no ano de 2017 uma quantidade de 78,4 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Conforme Marques Neto (2005), em cidades brasileiras de médio e grande porte, os

resíduos originados de construções e demolições representam uma alta taxa de geração representando de 51 a 70% de todos os sólidos urbanos coletados, cujo destino incorreto traz prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

Mais de 30 milhões de toneladas de RCD são destinados a aterros nos Emirados Árabes Unidos a cada ano, devido à sua rápida urbanização e seu crescimento econômico e populacional. A reciclagem de resíduos de construção e demolição oferece uma solução sustentável para reduzir a taxa de consumo de aterros e recursos naturais (POON; CHAN, 2007; KONG et al., 2010).

Segundo pesquisas de Morand (2016), apesar dos RCD terem um alto potencial de recuperação, apenas uma pequena parcela é aproveitada. Os países europeus destinam mais de 70% dos resíduos a um alto potencial de recuperação. Apenas pequenos países como Holanda, Bélgica e Dinamarca, atingiram taxas de reaproveitamento superiores a 80%. No Brasil, ainda não há muita informação sobre a quantidade de resíduos reutilizados (MORAND, 2016). No Quadro 2 verifica-se a destinação do RCD nos países europeus.

Quadro 2 – Destinação do RCD nos países europeus

<b>País</b>	<b>Entulho (mil ton/mês)</b>	<b>% Reutilização</b>	<b>% Depositado em aterros</b>
Alemanha	59	17	83
Inglaterra	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	3	< 5	> 95
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Áustria	5	41	59
Portugal	3	< 5	> 95
Dinamarca	3	81	19
Grécia	2	< 5	> 95
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55
Irlanda	1	< 5	> 95
<b>Média Total</b>	<b>18</b>	<b>28</b>	<b>72</b>

Fonte: adaptado de MOTTA e FERNANDES (2003) apud LUCHEZZI, Celso (2014).

Segundo a Comissão Europeia (2019), a atual pressão legislativa referente ao destino dado aos resíduos de construção e demolição na Europa reforça a

necessidade de identificar novos usos com materiais reciclados. Atualmente, o RCD é um dos mais volumosos e pesados fluxos de resíduos gerados, estimado em 25 a 30% e consiste em numerosos materiais incluindo concreto, tijolos, gesso, madeira, vidro, metais, plástico, solventes, amianto e solo escavado, muitos dos quais podem ser reciclados.

Conforme a Pesquisa Setorial 2015 realizada pela ABRECON, o material que chega às usinas de reciclagem brasileiras é predominantemente misto, composto das frações cinza (geradas a partir de insumos que têm o cimento em sua composição, tais como argamassa, concreto, entre outros) e vermelha (tijolos, blocos cerâmicos, entre outros) misturadas, mostrando a importância de serem desenvolvidas tecnologias e políticas públicas para o uso prioritário desse material.

A expansão dos mercados de produtos e materiais para o usuário final continua sendo um desafio para os profissionais de marketing de recicláveis. Isso acontece devido ao entendimento inadequado sobre produtos reciclados, como percepções negativas sobre eles, seu custo alto em relação aos materiais virgens e informações conflitantes sobre sua disponibilidade, durabilidade, qualidade e funcionalidade (FULLER, 1999; OYEDELE et al., 2014).

Em relação ao preço médio cobrado para recebimento do RCD no Brasil, pode-se afirmar que o valor é abaixo do valor cobrado por usinas europeias: em média, 50% delas cobram valores inferiores a R\$ 15,00/m<sup>3</sup>, sendo que o valor mais praticado está entre R\$ 5,00 e R\$ 10,00 por m<sup>3</sup> (ABRECON, 2015).

No que diz respeito às características de engenharia, traduzidas pelas propriedades físico-mecânicas dos RCD, via de regra tais materiais possuem propriedades inferiores aos agregados naturais, como uma menor densidade e quase sempre apresentam valores mais altos de absorção de água (SILVA et al., 2014).

Nas últimas décadas, o resíduo de construção e demolição proveniente de concreto foi reutilizado como agregado. O agregado reciclado de concreto consiste em 65–70% de agregado original e 30–35% de pasta de cimento original em volume (ZHANG et al., 2015). Entretanto, segundo realizado por Akbarnezhad et al. (2011), o concreto obtido com agregado reciclado apresentou menor resistência à compressão e à tração em comparação com o concreto de referência, além de mostrar maior rapidez na secagem e menor durabilidade.

Özalp et al. (2016) utilizaram agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição na produção de elementos de concreto. As propriedades físicas foram determinadas e comparadas com as dos agregados naturais. Também são realizados alguns estudos para determinar as propriedades de durabilidade (íons cloreto), permeabilidade, absorção, resistência à tração, resistência à abrasão e resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Pode-se concluir que o uso de agregados reciclados na produção de vários elementos de concretos é possível com separação e classificação adequadas. Além disso, taxas de substituição mais baixas devem ser aplicadas para obter melhores condições. Segundo os autores, o nível de substituição aceitável de agregados reciclados para o caso analisado ficou na faixa de 30%.

Zaetang et al. (2016) substituíram em diferentes níveis (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%) o agregado natural por agregados reciclados provenientes de RCD. Os concretos com agregados reciclados apresentaram um aumento na resistência à compressão, exceto quando a substituição foi de 100%. Isso deve-se ao aumento da ligação entre as superfícies dos agregados reciclados e a pasta de cimento, em comparação com o agregado natural. Em todos os níveis de substituição também houve aumento na resistência à abrasão do concreto permeável.

Segundo estudo realizado por Özalp et al. (2016), os valores de absorção de água dos agregados reciclados utilizados no concreto foram maiores que os naturais. Os resultados mostraram a existência de uma correlação linear entre as taxas de substituição de agregados e a redução da resistência à compressão (Figura 1). O uso de resíduos reciclados com maior absorção de água afetou negativamente a resistência dos concretos. No entanto, as taxas de substituição não afetaram diretamente a resistência à tração do concreto.

Figura 1 – Resultados ensaios compressão obtidos por Özalp et al. (2016)

Mistura	Resistência média à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	SR (%)	DP
40FC	19	24	67	0.7
40C	19	22	61	0.2
40F	18	22	61	0.9
30FC	22	25	69	0.9
30C	22	29	81	0.8
30F	23	27	75	0.2
20FC	25	31	86	1.1
20C	24	30	83	1.3
20F	22	29	81	0.8
Ref.	29	36	100	1.2

Nota: SR = redução de resistência de acordo com o concreto de referência; Ref = resultado de referência; DP = desvio padrão.

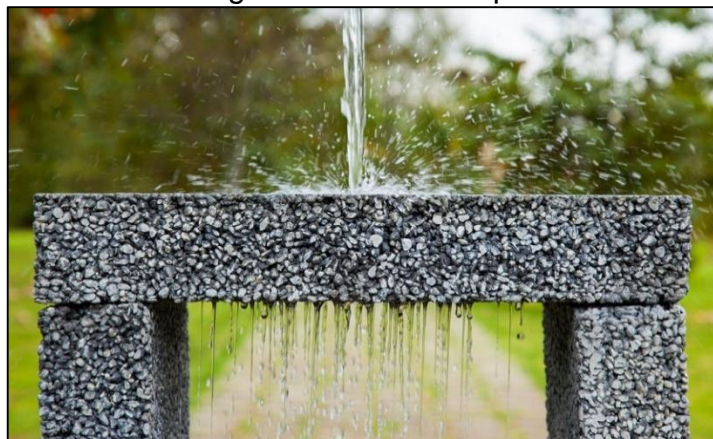
Análises sobre o uso de agregados reciclados em concreto indicam que sua resistência diminui à medida que a quantidade de resíduo aumenta. Os concretos utilizados são normalmente de baixa densidade, alta absorção d'água e porosidade, devido principalmente à presença da argamassa antiga na superfície do agregado (LI, 2008). Assim, devido à sua baixa resistência à compressão e alto grau de variação, o concreto reciclado é recomendado para aplicações não estruturais de concreto ou pavimento, segundo Leite et al. (2011).

### 3.1.2. Concreto permeável

O concreto permeável consiste fundamentalmente por agregados graúdos envoltos por uma fina camada de pasta de cimento. A permeabilidade se dá em função da área de vazios e da sua distribuição, e nem todos os poros são coletores efetivos. Sendo assim, não deve-se afirmar que uma maior porosidade do material garanta uma maior permeabilidade (TORRES et al., 2015). Para se obter uma configuração com maior permeabilidade não é empregado em sua moldagem o agregado miúdo, produzindo-se o material apenas com água, cimento e agregado graúdo. Assim, garante-se que o material obtido tenha um índice de vazios na faixa que varia de 15% a 25% e uma capacidade de percolação na ordem de 200 l/m<sup>2</sup>/min (ACI 522R-06, 2006).

O concreto permeável, como mostra a Figura 2, é usado para aplicações em áreas de parque, áreas com tráfego leve, passagens de pedestres e quadras de tênis (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007).

Figura 2 – Concreto permeável



Fonte: Homy Química, 2017<sup>2</sup>.

### 3.1.2.1 Propriedades Físicas

Alguns aspectos são considerados importantes na definição de um concreto com características de meio de transporte da água, que varia na faixa de 15 a 25% (CHANDRAPPA et al., 2016), com um mínimo de 15%, conforme prescrito pela Norma CIP-38 (2004). Yu et al. (2019), em sua pesquisa relacionada à influência do tamanho do agregado na resistência do concreto permeável, verificaram que os valores de porosidade medidos nos experimentos são aproximadamente de 20,9%. Evidencia-se, assim, o teor médio da porosidade para esse tipo de concreto.

A fim de avaliar as propriedades do concreto permeável, os ensaios de permeabilidade e de taxa de infiltração d'água são muito empregados. As amostras de concreto permeável têm poros interconectados que são responsáveis pelo alto índice de permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A ASTM C-1701 (2009) define os procedimentos para obter a taxa de infiltração, ou seja, determina o quão rápido a água infiltra numa estrutura permeável. A NBR 16416 (ABNT, 2015) adota o valor de permeabilidade de 0,1 cm/s como valor mínimo que o pavimento deve apresentar nos primeiros dias após a sua execução.

---

<sup>2</sup> <http://blog.homyquimica.com.br/5-curiosidades-sobre-o-asfalto/>



A permeabilidade é um parâmetro relevante, considerando as funções para as quais o material é projetado, dependendo das características dos materiais que compõem o concreto permeável e também do modo de aplicação do concreto e seu tratamento. Os valores normalmente encontrados estão entre 0,2 e 0,54 cm/s, porém valores maiores que 1 cm/s já foram encontrados, segundo Tennis, Leming e Akers (2004).

Em sua pesquisa, Aliabdo et al. (2018) encontrou valores de taxa de permeabilidade alinhados com os geralmente obtidos, na faixa de 0,2-1,2 cm/s. Entretanto, Zaetang et al. (2013) encontraram coeficientes que variaram de 0,3-4,7 cm/s. O Quadro 3 apresenta valores de taxa de permeabilidade já encontrados em outras pesquisas.

Quadro 3 – Valores de taxa permeabilidade encontrados em pesquisas

<b>Trabalho</b>	<b>Permeabilidade (cm/s)</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>
<i>Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes</i>	0,139 – 0,197	Gersson F.B. Sandoval, Isaac Galobardes, Raquel S. Teixeira, Berenice M.Toralles	2017
<i>Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete</i>	1,379 – 3,187	Pieralisi, R. Cavalaro, S. H. P. Agudo, A.	2017
<i>Durability of pervious concrete using crushed seashells</i>	0,22 – 0,34	Dang Hanh Nguyen, Mohamed Boutouil, Nassim Sebaibi, Fabienne Baraud, Lydia Leleyter	2017
<i>Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag</i>	0,188 – 2,144	Hilal El-Hassan, Peiman Kianmehr, Souhail Zouaoui	2019

Fonte: A autora, 2019.

A relação água/cimento em concretos permeáveis geralmente fica entre 0,27 a 0,30, chegando, no máximo, a 0,40, dependendo do uso de aditivos, com a intenção de proporcionar um revestimento de cimento suficiente para os agregados. A relação entre resistência e quantidade de água no concreto permeável não é tão clara quanto em um concreto convencional, pois a presença dos poros modifica a resistência geral

da peça. A quantidade correta de água pode ser percebida quando a mistura, no estado fresco, ganha certo brilho de umidade, sem ficar líquida (ACI 522R, 2006). Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010), nos estudos sobre previsão de permeabilidade na caracterização do volume de poros e conectividade em concretos permeáveis definiram uma relação a/c constante de 0,33, conforme previsto pela ACI 522R (2006).

Além disso, Chandrappa et al. (2016) mostram que a relação cimento/agregado varia de 1:4 até 1:6, geralmente sendo o volume de agregados do concreto permeável em torno de 50 a 65% em comparação ao concreto convencional, que é de cerca de 60 a 75%. Vários pesquisadores apresentaram seus estudos nos quais a relação cimento/agregado encontra-se na faixa acima descrita (CROUCH, PITT & HEWITT 2007; HUANG et al., 2010; NEITHALATH, SUMANASOORIYA & DEO, 2010; LIM, TAN & FWA, 2013).

Para manter vazios em teores adequados, o ACI 522R-06 (2006) prevê que a faixa ideal de tamanho de agregados esteja entre 9,5 a 19mm. Yahia e Kabagire (2014) utilizaram agregado graúdo natural de um único tamanho (passando na peneira de 12,5mm e retido na de 10mm) para fornecer a permeabilidade adequada em sua pesquisa acerca do concreto contendo borrachas de resíduos de pneus. No entanto, vários estudos utilizaram agregados de tamanho 2,36-9,5mm com o objetivo principal de aumentar as propriedades de resistência (CROUCH, PITT & HEWITT 2007; HUANG et al. 2010; KEVERN, SCHAEFER & WANG 2009; DEO & NEITHALATH 2011; NGUYEN et al. 2014).

Pesquisas realizadas por Cosic et. al. (2014) evidenciam que a porosidade total da mistura de concreto permeável subdivide-se em poros interconectados, capilares e sem saída. Os vasos sem saída diferem-se do entupimento pelo fato de não terem uma conexão a outros poros.

Estudos recentes analisam o desenvolvimento e o estado da arte referentes a concretos permeáveis. Chandrappa et al. (2016) elaboraram uma revisão das técnicas de reabilitação para aumentar a eficiência hidráulica dos pavimentos de concreto permeável, e também fizeram uma breve análise do ciclo de vida desse concreto.

### 3.1.2.2 Propriedades Mecânicas

As propriedades de concretos permeáveis contendo dois tipos de agregados reciclados, sendo eles resíduos provenientes de bloco de concreto e de concreto foram o tema do estudo de Zaetang et al. (2016). Nesse trabalho foi utilizada substituição do agregado natural nos níveis de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% em massa. A resistência à compressão, a densidade, o índice de vazios total, a permeabilidade à água, a condutividade térmica e a resistência à abrasão superficial do concreto permeável contendo os agregados foram determinados. Ambos os agregados reciclados aumentaram as resistências à compressão de concretos permeáveis, exceto no alto nível de substituição de 100%.

No que tange a outras características, um estudo realizado por Zhang et al. (2017) mostra a utilização de agregados reciclados provenientes de concreto descartado e tijolos de argila para produção de concreto permeável. Grupos de agregados reciclados foram projetados com diferentes índices de esmagamento sob a mesma proporção de mistura de concreto. Foram realizadas experiências sobre resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à flexão, coeficiente de permeabilidade, índice de vazio total, incluindo teste de congelamento/descongelamento. Os resultados mostram que o aumento do índice de esmagamento tem efeitos significativos nas propriedades mecânicas.

Referente à resistência à abrasão do concreto, esta é relacionada ao seu desempenho funcional, portanto a avaliação desta propriedade permite o controle de qualidade do material e sua adequação ao uso. Geralmente, os métodos de ensaio para determinar a resistência à abrasão consistem em provocar o desgaste de um material através da ação mecânica de determinada carga abrasiva e utilizar os resultados de forma comparativa. Ainda, tais métodos não são suficientes para estimar a vida útil, uma vez que em condições reais estão presentes situações agressivas que conduzem os materiais a comportamentos diferentes. Qualquer que seja o ensaio empregado para avaliar a resistência à abrasão, este irá evidenciar ou proporcionar uma capacidade ou habilidade do material. (VITORINO, 2011).

É extremamente complexo prever a durabilidade de superfícies solicitadas ao desgaste devido às incertezas dos materiais, dos processos e das ações de atrito que as áreas estariam sujeitas por um determinado período de tempo. Além disso, tal

previsão de durabilidade seria possível somente com uma grande margem de erro (VIECILI, 2004).

### 3.1.2.3 Entupimento

Um dos problemas associados com o emprego do concreto permeável em vias diz respeito à possibilidade de entupimento (*clogging*), em função do tamponamento da rede de poros pela presença de partículas finas. Os concretos permeáveis em serviço ficam obstruídos devido aos detritos, à poeira e a outras partículas estranhas, o que pode reduzir a capacidade de infiltração da mistura e, portanto, prejudicar sua eficiência no escoamento de águas pluviais (COUGHLIN, CAMPBELL e MAYS, 2012).

O entupimento de pavimentos de concreto permeáveis em serviço foi estudado por Kayhanian et. al. (2011), usando princípios de permeabilidade e imagem. As medidas de permeabilidade indicaram que a idade do pavimento desempenhou um papel significativo na definição do quão permeável o mesmo é em serviço. As análises de imagem mostraram que os 25mm superficiais do material estão mais sujeitos a entupimentos.

Em outra pesquisa realizada por Haselbach (2010), o concreto permeável foi investigado em condições extremas de entupimento usando suspensões de argila de bentonita e caulinita. Após um número repetido de ciclos de entupimento e secagem para simular as condições meteorológicas reais, a maior parte da argila permaneceu perto da superfície, formando uma camada espessa de material.

Em misturas de concreto permeáveis compostas por diferentes tamanhos de agregados, usando areia fina e grossa, verifica-se que as amostras de porosidade similar com tamanhos de poros muito grandes (5-6mm) ou muito pequenos (1-2mm) mostraram-se menos suscetíveis ao entupimento. Além disso, as misturas feitas com agregado de  $D_{m\acute{a}x} = 4,75\text{mm}$  tiveram mais problemas devido às semelhanças no tamanho dos poros (DEO, SUMANASOORIYA, NEITHALATH, 2010).

Chen et al. (2015) verificaram que as partículas com tamanhos na faixa de 0,15-0,3mm e 1,18-2,36mm têm efeito crítico sobre a permeabilidade. A alta temperatura e pressão de carga levam a uma perda de permeabilidade mais severa do que a baixa temperatura e a baixa pressão de carga. Isso pode ser explicado devido à sensibilidade à temperatura do asfalto de alta viscosidade ser menor do que

o ligante modificado com polímero usado na pesquisa relatada. O aumento do teor de vazios de ar e do tamanho máximo de agregado nominal reduz efetivamente a perda de permeabilidade resultante do entupimento relacionado à partícula.

Muitos estudos examinaram o entupimento do concreto permeável pela areia. Haselbach, Valavala e Montes (2006) desenvolveram um modelo para prever a relação entre a permeabilidade efetiva de um bloco de concreto permeável obstruído por areia, a permeabilidade da areia e a porosidade do bloco desobstruído. O estudo usou um bloco de concreto permeável típico que permite que a água passe por vazões superiores a 0,2cm/s e uma areia extrafina típica com uma permeabilidade de aproximadamente 0,02cm/s. O limite do sistema com cobertura completa de areia resultou em uma efetiva permeabilidade à água de aproximadamente 0,004cm/s, que é semelhante à intensidade da chuva de 30 minutos de duração.

McCain, Suozzo e Dewoolkar (2010) descobriram que uma alta taxa de aplicação de uma mistura de areia e sal (2:1 em peso) a 0,24lb/ft<sup>2</sup> (equivalente a 1,17kg/m<sup>2</sup>) reduziu a condutividade hidráulica de amostras de concreto permeável a misturas laboratoriais em cerca de 15%. A agitação e adição de areia nas amostras simulavam o entupimento máximo e reduziam a condutividade hidráulica em cerca de 35%. Limpar as amostras restaurou a condutividade hidráulica para aproximadamente 90% de seus valores iniciais.

Sriravindrarajah et al. (2011) realizaram pesquisas semelhantes para examinar a influência da argila nos fenômenos de entupimento do concreto permeável. Eles descobriram que os materiais argilosos reduziram notavelmente a permeabilidade à água do concreto permeável, que não pôde ser totalmente recuperado pela lavagem a alta pressão. Em face do problema de entupimento, alguns métodos de manutenção estão sendo desenvolvidos com a finalidade de limpeza e restauração do desempenho de infiltração, incluindo a potência de sopro, a pressão de lavagem e aspiração do concreto. Esses métodos podem restaurar substancialmente o seu desempenho no gerenciamento de águas pluviais.

Tendo em vista a limpeza, o uso de um caminhão varredor a vácuo foi ineficaz na remoção de entupimento penetrante profundo, embora tenha removido com sucesso sedimentos superficiais, enquanto a lavagem à pressão tem maior eficiência de rejuvenescimento do que a varredura a vácuo (CHOPRA et al., 2010).

Hein, Dougherty e Hobbs (2013) descobriram que a lavagem com pressão e a aspiração foram eficazes para limpar o entupimento e aumentar a taxa de infiltração em mais de 90%. O efeito de limpeza será consideravelmente aumentado combinando o uso desses métodos.

Um teste rápido de infiltração superficial foi apresentado por Dougherty et al. (2011) para avaliação das necessidades de manutenção do concreto permeável. Tanto a lavagem à pressão como a sopragem de energia melhoraram em 20 vezes as taxas de infiltração da calçada de concreto permeável. O uso combinado dessas duas práticas de manutenção levou a um aumento de quase 200 vezes nos locais de campo.

Henderson e Tighe (2011, 2012) avaliaram os métodos de desempenho e manutenção de cinco locais de campo de concreto permeáveis no Canadá. Eles sugeriram que as atividades de manutenção devem ser realizadas antes do início do gelo/degelo. A lavagem da superfície com uma mangueira de grande diâmetro removeu consideravelmente os detritos em espaços vazios e renovou a permeabilidade a um valor aceitável. No entanto, a lavagem de energia levou ao movimento dos detritos da superfície para os vazios profundos e, assim, diminuiu a permeabilidade. A varredura foi ineficaz na melhoria da condutividade hidráulica, uma vez que só pode remover detritos na superfície.

Coughlin, Campbell e Mays (2012) realizaram um estudo de laboratório para medir o entupimento por areia e argila em um sistema de concreto permeável saturado e o efeito subsequente de limpeza de superfícies por lavagem à pressão, que não reverteu o entupimento mensurável causado pela areia e pela argila. Mesmo depois de entupido, a taxa de infiltração estava bem acima da intensidade média.

Para completar, ressalta-se que a manutenção de rotina não pode superar a construção inadequada (WINSTON et al., 2016b).

### 3.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS)

É frequente durante a pesquisa de um assunto, encontrar resultados contraditórios. Por isso, uma das alternativas coerentes é apoiar-se em publicações relevantes, e uma das formas para a realização de uma pesquisa científica é o emprego da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) (GALVÃO; PEREIRA, 2014).

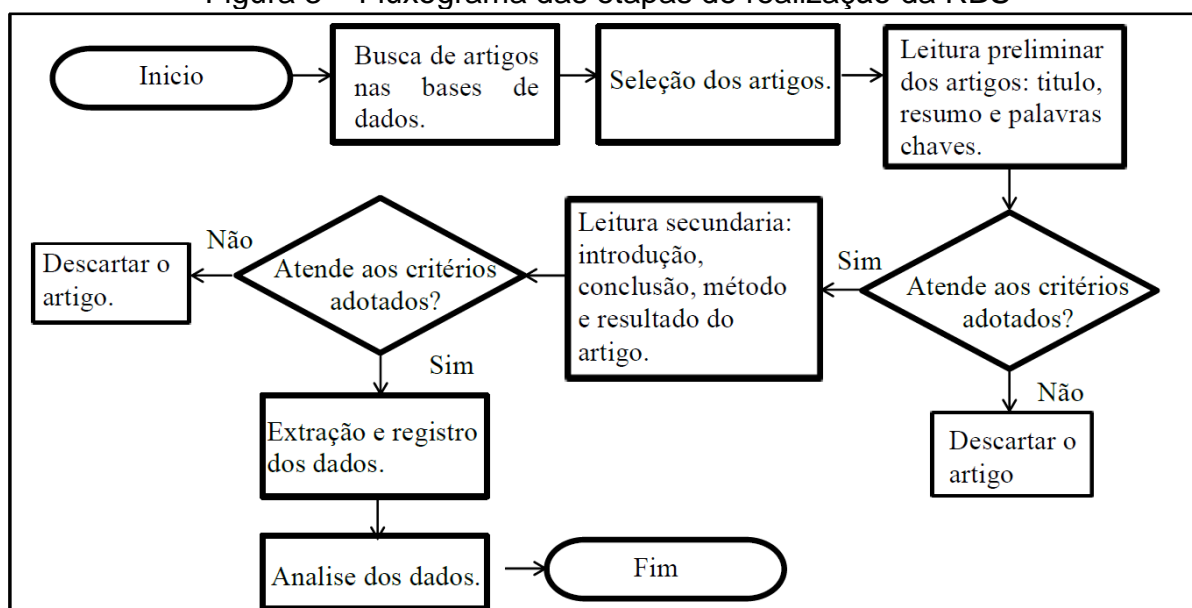
A RBS é uma investigação que tem como objetivo identificar, distinguir, avaliar e sintetizar as evidências pertinentes disponíveis na literatura. Para o seu planejamento foram identificadas as publicações que estudam as propriedades do concreto permeável com agregado reciclado. Então, as perguntas que deveriam ser contempladas por meio da análise dos trabalhos foram:

- Há pesquisas sobre concretos permeáveis com agregados reciclados?
- Quais os principais resíduos estão sendo analisados?

Para a elaboração da RBS é necessário estabelecer algumas delimitações. Sendo assim, não serão analisadas teses e dissertações. Serão verificados artigos publicados nas bases de dados selecionadas para a RBS e com sua data de publicação entre os anos de 2010 a 2019. As bases de dados utilizadas foram: *Science Direct*, *Scopus*, *Web of Science* e *Engineering Village*.

A revisão baseou-se nos idiomas português, por ser a língua de origem do autor do trabalho, e inglês, por ser a língua internacional mais utilizada para publicação de artigos científicos. Utilizou-se as palavras-chaves “*pervious concrete*” AND “*recycled aggregate*” para busca dos artigos. Os periódicos que não possuíam acesso completo para alunos de mestrado da PUCRS foram excluídos. Também foram descartados os trabalhos que não tinham título ou resumo referentes ao assunto estudado. Conforme Meneghetti (2017), a Figura 3, resume o fluxograma das etapas desenvolvidas para realização da RBS.

Figura 3 – Fluxograma das etapas de realização da RBS



Fonte: adaptado Meneghetti (2017).

Para definição dos resultados apresentados a seguir foi feita leitura, coleta, análise e registro dos dados, assim finalizado o processo de busca. As informações obtidas são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultado das buscas

<b>Base de dados</b>	<b><i>Pervious Concrete</i></b>	<b><i>Recycled aggregate</i></b>	<b><i>Pervious Concrete AND Recycled aggregate</i></b>	<b>Seleção Final</b>
<i>Science Direct</i>	1123	45867	204	30
<i>Scopus</i>	806	5971	69	28
<i>Web of Science</i>	590	5884	68	24
<i>Engineering Village</i>	659	6892	64	28
Total	3178	64612	405	110

Fonte: A autora, 2020.

Dos 110 artigos filtrados após a seleção, verificou-se que 56 repetiam-se. Portanto, 54 documentos seguiram para a fase de extração e registro das informações. Foram utilizadas planilhas *Excel* para melhor organização de dados e apresentação de gráficos para facilitar a interpretação dos resultados.

É possível observar, através da Figura 4, a quantidade de publicações relevantes entre os anos de 2010 e 2019. Há uma tendência no aumento das pesquisas realizadas a partir dos últimos anos, mostrando uma grande crescente no ano de 2016 e que seguiu até o ano de 2019, o que significa a importância do desenvolvimento de pesquisas nessa área na atualidade.

Figura 4 – Quantidade de publicações relevantes nos últimos anos



Fonte: A autora, 2020.



É importante saber em quais bases internacionais são encontradas a maioria das publicações selecionadas. Por isso, é feito um levantamento de revistas onde são encontrados os artigos acerca da área de concretos permeáveis contendo agregados reciclados. Observa-se uma forte tendência para abordagem desse assunto na revista *Construction and Building Materials*, seguida pelas revistas *IOP Conf. Series* e *Journal of Cleaner Production* (Quadro 5).

Quadro 5 – Quantidade de publicações relevantes por periódico

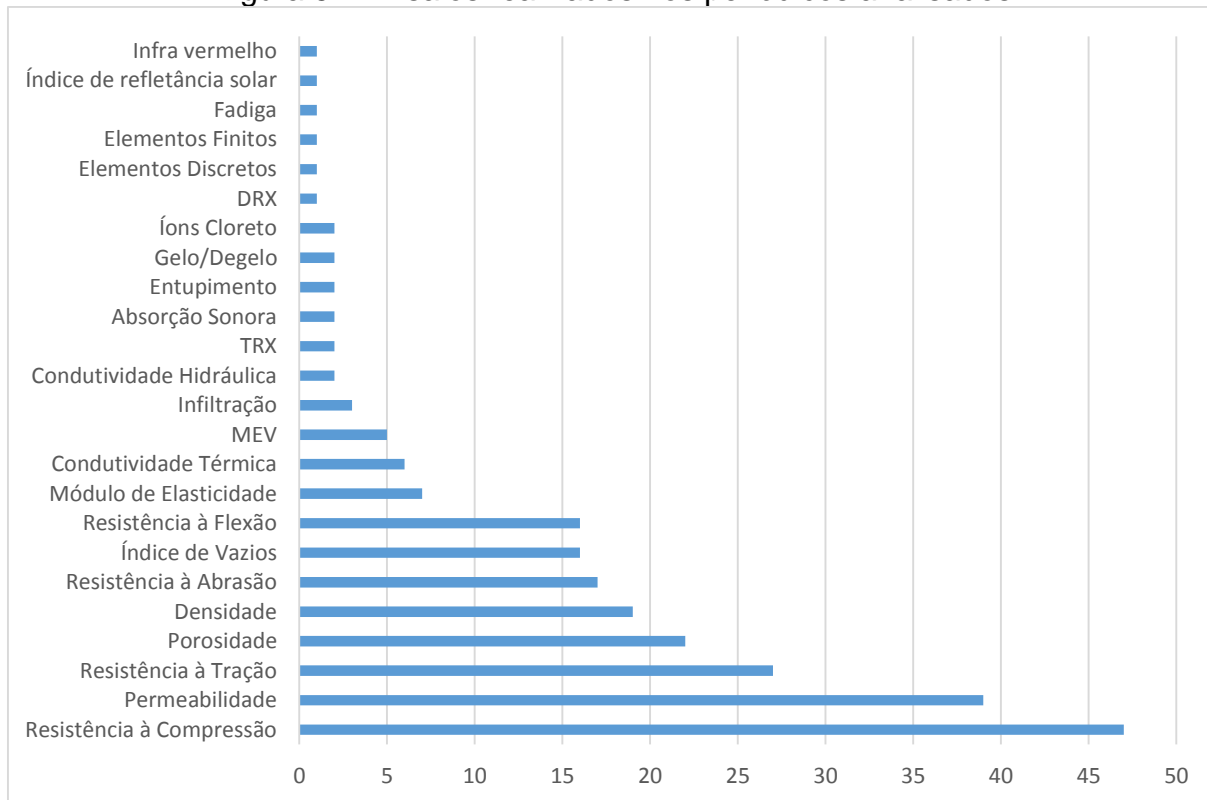
<b>Revista</b>	<b>Publicações relevantes</b>
Construction and Building Materials	20
IOP Conf. Series	7
Journal of Cleaner Production	4
International Journal of Concrete Structures and Materials	2
Journal of Civil Engineering	2
Applied Soft Computing Journal	1
Arabian Journal for Science and Engineering	1
Chemical Engineering Transactions	1
Informes de la Construcción	1
Ingeniería de Construcción	1
International Journal of Transportation Science and Technology	1
Journal of Testing and Evaluation	1
Materials and Design	1
Materials and Structures	1
Procedia - Social and Behavioral Sciences	1
Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering	1
Materials Today: Proceedings	1
Frattura ed Integrità Strutturale	1
International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering	1
Smart Structures and Systems	1
Ingeniería e Investigación	1
Road Materials and Pavement Design	1

Fonte: A autora, 2020.

Uma verificação importante é a análise dos ensaios executados na literatura, já que são eles que indicam o caminho para futuras pesquisas. A Figura 5 apresenta os testes implementados nos trabalhos em questão. Foram desconsiderados os ensaios feitos em função somente da pavimentação, pois eles não são pertinentes ao tema em observação. Nota-se a vasta aplicabilidade dos testes de resistência à compressão e permeabilidade, seguido em menor escala pela resistência à abrasão,

pela porosidade, pela densidade, pelo índice de vazios, pela resistência à flexão e resistência à tração.

Figura 5 – Ensaios realizados nos periódicos analisados



Fonte: A autora, 2020.

Com base nas análises e nos levantamentos realizados na literatura nos últimos anos, é viável buscar respostas específicas sobre substituições, teores, misturas e ensaios para o avanço de um trabalho referente a concreto permeável com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. A pesquisa depende dos critérios estabelecidos na seleção de dados, a mesma não tem a pretensão de abordar todas as utilizações que envolvem o tema. Percebe-se a importância da realização dos ensaios de resistência à compressão, permeabilidade, resistência à abrasão, porosidade, densidade, índice de vazios, resistência à flexão e resistência à tração quando disserta-se sobre concretos permeáveis.

Nota-se através da RBS o desenvolvimento de muitos artigos sobre o assunto, principalmente uma forte tendência a partir do ano de 2016. Isso deve-se à crescente produção de resíduos, aliada a uma gestão que não prevê o descarte adequado, além da possibilidade da implementação de pavimentos permeáveis com capacidade de

auxílio na recarga das águas subterrâneas. Dessa forma, conclui-se que a partir da análise dos artigos selecionados é possível obter um panorama global do uso desse tipo de concreto e as principais vertentes para futuras pesquisas envolvendo o tema.

#### **4. MATERIAS E MÉTODOS: ARTIGO**

O Procedimento experimental desse estudo, os resultados e a discussão estão apresentados neste capítulo em forma de artigo submetido na revista *Journal of Cleaner Production*, submetido no dia 18 de março de 2020, conforme anexo A.

# INFLUENCE OF RECYCLED AGGREGATE REPLACEMENT AND FLY ASH CONTENT IN PERFORMANCE OF PERVIOUS CONCRETE MIXTURES

Gabrieli Lazzari Vieira; Jéssica Zamboni Schiavon; Pietra Moraes Borges; Sérgio Roberto da Silva; Jairo José de Oliveira Andrade\*

*Graduation Program in Materials Engineering and Technology, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PGETEMA/PUCRS)*

*PUCRS – Av. Ipiranga, 6681, Building 30, Office A/228. Porto Alegre – RS – Brazil. ZIP Code:90619-900*

## Highlights

1. The use of different levels of recycled aggregate and fly ash was investigated in pervious concrete.
2. The porosity, permeability, infiltration, clogging and abrasion properties of pervious concrete were analyzed.
3. The addition of recycled aggregate increased the permeability and the rate of infiltration of concrete.
4. Fly ash provided a decrease in compressive strength and an increase in flexural tensile strength.
5. The pervious concrete with recycled aggregate showed a high porosity microstructure from X-ray and SEM microtomography analyzes.

## Abstract

The construction industry is responsible for large volumes of raw material extraction for cement manufacturing, and also disposes of construction and demolition wastes (CDW) in landfills. The pervious concrete is considered a sustainable alternative for pavement, since its main characteristic is to permeate the water, allowing its reuse. In this sense, for an adequate use it is necessary to optimize its properties in its dimensioning and maintenance to avoid the clogging of its voids. In this way, the main purpose of this research was to analyze the use of recycled aggregates (RA) from construction and demolition waste and fly ash in pervious concrete. Thus, concretes with a w/b ratio of 0.25, 0.30 and 0.30 with 10% of cement replacement by fly ash and four contents of recycled aggregate (25, 50, 75 and 100%). Compressive and flexural strength, permeability coefficient, infiltration rate, clogging, surface abrasion, scanning electron microscopy (SEM) and x-ray microtomography were performed. It was verified that the increase of the recycled aggregate content in pervious concrete provided the increase of surface abrasion. In addition, the higher levels of recycled aggregate showed a greater tendency to clogging in samples, where highest tendency was found in the 50% replacement concrete, while the reference concrete was 46% less susceptible to clogging. With the incorporation of 10% fly ash the pervious concrete with 75% recycled aggregate showed an increase of 6% tendency to clogging compared to the reference pervious concrete.

Keywords: pervious concrete; recycled aggregates; mechanical properties; X-ray microtomography.

## 1 INTRODUCTION

The increasing generation of waste from various sources, such as urban renewal and inefficient construction processes, usually causes a major environmental problem, mainly through the production of large quantities of construction and demolition waste (CDW). In this context, recycling CDW for use as aggregates in production of new concrete can help to minimize the disposal problem and thus preserve natural resources (Dakwalea and Ralegaonkar, 2014). Currently, three major types of RA are being

1 generated: the concrete recycled aggregate (CRA), the masonry recycled aggregate (MRA) and mixed  
2 recycled aggregate (RA). The RA is a waste results from construction activities and total or partial  
3 demolition of buildings and infrastructure elements and landslide debris. Its composition consists mainly  
4 of concrete, bricks, excavated soil, metals, glass, plaster, wood, plastic and various polymers, many of  
5 which can be recycled (Silva et al., 2017). As a rule, many studies have shown that the use of MA in  
6 concrete indicates a loss of performance in most of the properties analyzed, mainly due to its low density,  
7 poor resistance to abrasion, higher water absorption and porosity, due mainly to the presence of old  
8 mortar on the aggregate surface (Li, 2008). In fact, recycled aggregate is routinely used in most  
9 countries, however, most applications include use in pavement layers of low-traffic roads and non-  
10 structural concrete elements, as their requirements are not as stringent as those of structural elements  
11 (Silva et al., 2019).

12 However, the use of RA in pervious concrete elements presents itself as an interesting alternative to the  
13 use of waste. Pervious concrete is a special concrete with relatively high voids content, presenting high  
14 water permeability compared to conventional concrete (Scholz and Grabowiecki, 2007, Chandrappa and  
15 Biligiri, 2016). Such material has been increasingly used as a low impact development tool, which helps  
16 to manage the impacts of structure construction (Bruinsma et al., 2017) and can replace the use of  
17 conventional concrete, mainly on low-traffic roads or with light vehicle flow, as well as in parking lots  
18 (Weiss et al., 2017). The environment is significantly benefited by pervious concrete, as they can lead  
19 to a reduction in the amount of rainwater runoff and improve water quality in relation to total suspended  
20 solids, phosphorus, nitrogen, and metals (Holmes et al. 2017a, 2017b). The difference from  
21 conventional concrete to pervious concrete is that it contains no fine aggregates and a smaller amount  
22 of cement is used to fill the voids between the aggregate particles. As a result, pores are formed and the  
23 high porosity of pervious concrete provides good internal drainage and consequently higher water  
24 infiltration (Lu et al., 2019).

25 According to Souche et al. (2017), the permeability coefficient is higher for pervious concrete with RA  
26 than for concrete containing natural aggregates. This behavior is influenced by the transfer of water from  
27 aggregates to cement. According to Park et al. (2010), the number of voids and the permeability  
28 coefficient of pervious concrete showed that these properties change as the recycled aggregate content  
29 increases. The result of mechanical strength indicated a tendency to decrease as the rate of recycled  
30 aggregate was increased. In this sense, Özalp et al. (2016) suggest that lower replacement rates are  
31 applied to ensure the mechanical properties required of pervious concrete.

32 El-Hassan et al. (2019) investigated the replacement of natural aggregate by RA and verified the  
33 increase in total voids content, porosity, and permeability. The mechanical properties and abrasion  
34 resistance were negatively affected due to the poor RA interface. In order to minimize the negative effect  
35 on abrasion resistance, the authors suggest a maximum content of 20% in pervious concrete mixtures.  
36 However, Zaetang et al. (2016) found different results, whose authors investigated the behavior of  
37 pervious concrete, replacing the natural aggregate with recycled aggregate in different levels (20%, 40%,  
38 60%, 80%, and 100%). The results showed that the use of RA increased the compressive strength of  
39 pervious concrete, except for the 100% of replacement. For example, the 60% recycled aggregate  
40 replacement level obtained compressive strength of 15 MPa, with an increase of 11.94% compared to  
41 the reference, and the abrasion resistance of pervious concrete increased with all the contents used.  
42 Although RA are weaker than natural aggregate, improvements in compressive strength and abrasion  
43 resistance are achieved by improving the bond between RA and cement paste due to increased porosity  
44 and roughness of recycled aggregates (Zaetang et al., 2016).

45 On the other hand, it should be considered that cement manufacture is a major pollutant of the  
46 environment, mainly due to the high consumption of natural resources and CO<sub>2</sub> emissions to the  
47 atmosphere (Caron e Hoeller, 2014). To reduce the consumption of raw materials incorporated into

1 concrete, Portland cement can be partially replaced by supplementary cementitious materials (SCMs),  
2 such as granulated blast furnace slag (GGBS), fly ash (FA), rice husk ash (RHA) and silica fume (SF)  
3 (Samad and Shah, 2017). According to López-Carrasquillo and Hwang (2017), pervious concrete with  
4 the use of fly ash (24%) and nanosilica (1.9%) obtained a compressive strength of 17.3 MPa and a  
5 permeability of 8.8 mm/s. Besides, the replacement of a high volume of fly ash (60%) was responsible  
6 for low compressive strength and abrasion resistance. The results of pervious concrete presented by Jo  
7 et al. (2015) using fly ash (60%) and nanosilica (0.04%) showed a 7-day compressive strength of 5.0  
8 MPa and permeability of 4.3 mm/s. Soto-Pérez et al (2016) opted for a volume of fly ash (35%) and the  
9 use of NanoFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (6%). The authors obtained a 28-day compressive strength of 22.8 MPa and a  
10 permeability of 5.6 mm/s.

11 As the main intention of using pervious concrete is to permeate rainwater, allowing groundwater to be  
12 recharged, the infiltration and permeability behavior are properties of pervious concrete that need to be  
13 investigated, and consequently, there are few studies related to the void clogging (Sandoval et al., 2020).  
14 Although porous concrete can be an important system for sustainable urban drainage, it presents a  
15 reduction in permeability due to clogging by particles, which severely limits its service life (Kia et al.,  
16 2017). Clogging is when sediments tend to accumulate on the surface of pervious concrete and its  
17 internal pore structure, causing a decrease in permeability (Sandoval et al., 2020). In-service pervious  
18 concrete becomes clogged due to the presence of waste, dust and other foreign particles, which can  
19 reduce the infiltration capacity of the mixture and therefore affect its efficiency in rainwater runoff  
20 (Coughlin et al., 2012). Apparently, once the pervious concrete is clogged, it will gradually lose its  
21 permeability, which will seriously reduce the service life of the permeable pavement and cause  
22 significant ecological and economic losses. The level of clogging is mainly influenced by the proportion  
23 of the clogging particle size to the pore size of the pervious concrete (Zhou et al., 2019). The clogging  
24 can be prevented by cleaning and maintenance activities (Hein et al., 2013). Another effort to avoid  
25 clogging is by optimizing the size of the coarse aggregate in the design of pervious concrete, as it results  
26 in better hydraulic and mechanical properties and consequently less clogging (Grubesa et al., 2018). It  
27 was reported by Kia et al. (2017) that the coarse aggregates should concentrate a single size only, this  
28 size should be in the range of 9.5 and 19 mm in order to facilitate the formation of voids and increase  
29 the permeability of pervious concrete. The use of larger aggregates provides larger and more tortuous  
30 void sizes. (Zhong and Wille, 2018).

31 According to Xie et al. (2019), the great challenge of pervious concrete is to achieve the adequate  
32 balance between the conflicting properties, i.e., to obtain high mechanical properties, permeability and  
33 water infiltration with low clogging. In this way, the main focus of this work is to investigate the  
34 performance of pervious concrete containing recycled aggregate as an alternative to the use of waste  
35 and fly ash, in order to reduce cement consumption in mixtures. The valorization of RA and fly ash use  
36 can contribute to minimizing the environmental impacts, being important for the development of a new  
37 category of construction materials.

## 38 39 **2 EXPERIMENTAL PROCEDURE**

### 40 41 **2.1 Materials characterization**

42  
43 It was used the Brazilian early-age Portland cement CP V, which follows the prescriptions of Brazilian  
44 standard NBR 16697 (ABNT, 2015), similar at ASTM Type III cement, that presents a specific gravity  
45 equal at 3.07 g/cm<sup>3</sup>, density of 0.99 g/cm<sup>3</sup> and compressive strength of 54.2 MPa at 28 days. Fly ash  
46 was used to replace cement in specific mix proportions of pervious concrete, which has a specific gravity  
47 of 1.98 g/cm<sup>3</sup>. Figure 1 shows the results of the x-ray diffraction analysis of the binders used.

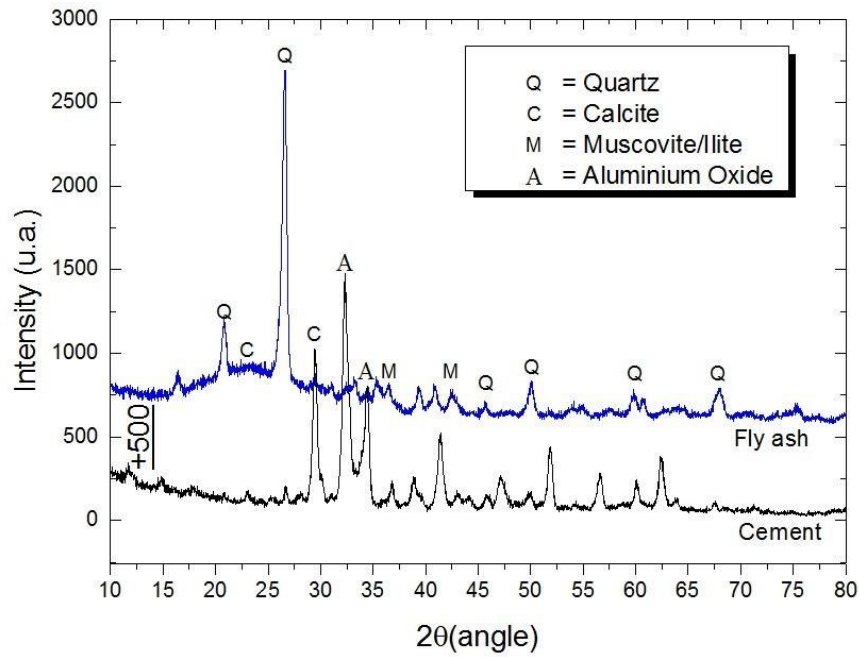


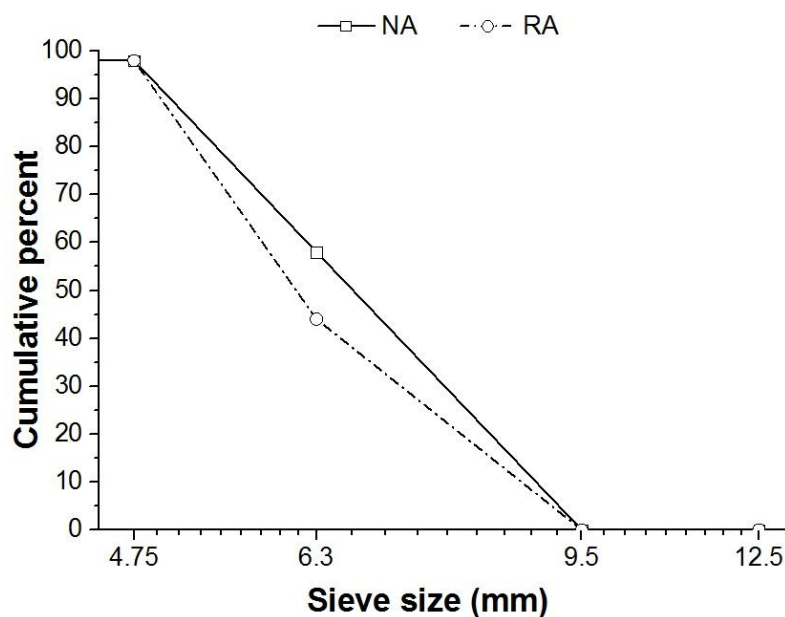
Figure 1: DRX standard of the fly ash and Portland cement

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10

Two types of coarse aggregate were employed, both with a  $D_{max}$  of 9.5 mm: the basaltic natural aggregate (NA) and the recycled aggregate (RA) from a construction and demolition waste. Table 1 shows the data associated with the physical properties of the aggregates, characterized according to the Brazilian standard NBR NM 248 (ABNT, 2003) and Figure 2 shows the particle size distribution of RA and NA.

**Table 1:** Physical properties of materials

	Specific gravity ( $g/cm^3$ )	Bulk density ( $g/cm^3$ )	Fineness modulus
Natural aggregate (NA)	3.09	1.68	5.90
Recycled aggregate (RA)	2.48	1.14	5.98



1

2

Figure 2: Particle size distribution of natural aggregate (NA) and recycled aggregate (RA).

3

The raw RA presented a large variety of sizes and the presence of contaminants, like wood, glass, gypsum, among others. In this way was necessary a manual separation of these materials, before the comminution process. The aggregate size as reduced using a jaw crusher. For the analysis of the composition of the RA, 500 g of the material was previously separated and crushed (Figure 3a) and subsequently manually classified (Figure 3b). The materials were then weighed individually to find out the percentage of each of them in this RA sample.

9

**Table 2:** Mixed recycled aggregate composition

Material	Main composition	Legend	(%)
Concrete	Material composed by cement, sand e gravel which characterization couldn't have any doubt ;	A	1.56
		B	9.28
Ceramics	Made of blocks, bricks, roof tiles, ceramic coating for floor and walls, tiles and others coating materials.	C	5.61
		D	6.49
		E	6.64
Mortars	Material made of cement and/or lime and sand without pebble or coarse aggregate;	F	40.60
Natural stone	Any type of natural stone pieces which were used or not and doesn't have any binder material in it;	G	1.30
		H	19.08
		I	9.19
Others	Material particles such as paper, wood, metal, plastic, textiles, asbestos and others.	J	0.23
Total			100



1



Figure 3: Crushed and mixed residue before (a) and after (b) manual separation.

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

It can be observed that 69.52% of the RA is composed of old mortar and ceramic aggregate, that have great influence in fresh and hardened properties of pervious concrete. These materials presents low mechanical strength and high probability of fragmentation during the mixing process. Ferreira et al., (2019) discuss the difference in the percentage of ceramic materials within the RA, where the greater contribution of ceramics the greater will be the water absorption of the material.

## 2.2 Mix proportions of pervious concrete

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

In mix proportioning of pervious concrete different levels of substitution of natural aggregate for RA were adopted, also used by Zaetang et al., (2016), whose authors used 6 replacement levels ranging from 0 to 100% with intervals of 20%. Where used two water/binder (w/b) ratio in concrete manufacturing (0.25 and 0.30), similar to previous works. Kevern et al. (2009) investigated the use of 4 w/b ratio (0.25; 0.27; 0.29 and 0.31). Lim et al. (2013), who used the levels of 0.20 and 0.30.

In the present study, Portland cement was replaced by fly ash at a content of 10% by mass only for the w/b ratio = 0.30. Ramkrishnan et al. (2018) used the replacement contents of 10, 15 and 20% of fly ash, while Chen et al. (2019) investigated the properties of pervious concrete for 15% of fly ash. Saboo et al. (2019) opted for a range of 0 to 20%, as according to the authors the use of fly ash above 20% adversely affects the mechanical properties of pervious concrete.

In the present study, the RA was used in the saturated surface dry (SSD) to avoid the water absorption during the concrete mixing process, thus changing the workability of the mixture.

In this procedure, the RA was submerged in water for 24 hours and then it was air-dried, as already done by Debnath and Sarkar (2020). Due to the difference between the specific mass of the aggregates, the amount of RA required for each mixture was calculated using Equation

1.

29

$$M_{RA} = M_{NA} * \frac{\gamma_{RA}}{\gamma_{NA}} \quad (1)$$

1 where:  $m_r$  = mass of recycled aggregate, in kg;  $m_n$  = mass of natural aggregate, in (kg);  $\gamma_r$  = specific gravity of  
 2 recycled aggregate, in (kg/dm<sup>3</sup>);  $\gamma_{NA}$  = specific gravity of natural aggregate, in (kg/dm<sup>3</sup>).  
 3 After mixing the concretes were compacted in a vibrating table for approximately 10 seconds,  
 4 avoiding manual densification due to RA possible fragmentation. All the mixtures presented a  
 5 wet metallic appearance after the mixture process, as prescribed by ACI 522R-10 (2010). After  
 6 the molding, the specimens were wrapped in a plastic sheet for 24 hours to avoid water  
 7 evaporation, mainly due to the low w/b ratios adopted. After this time, the samples were  
 8 demolded and placed on a water tank until one day before testing, whose there were removed  
 9 from the water and left in a laboratory environment for elimination of water excess (Debnath e  
 10 Sarkar, 2020). The obtained mixture proportions are shown in Table 3.  
 11

12

**Table 3:** Mix proportions of pervious concrete

Mix design	w/b	Fly ash (%)	Content (kg/m <sup>3</sup> )				
			Binder		Coarse aggregate		Water
			Cement	Fly ash	NA	RA	
REF-A-0	0.25	0	529	0	2117	0	132
PC-A-25	0.25	0	509	0	1528	509	127
PC-A-50	0.25	0	491	0	982	982	123
PC-A-75	0.25	0	474	0	474	1421	118
PC-A-100	0.25	0	458	0	0	1831	114
REF-B-0	0.30	0	516	0	2063	0	155
PC-B-25	0.30	0	497	0	1490	497	149
PC-B-50	0.30	0	479	0	958	958	144
PC-B-75	0.30	0	463	0	463	1389	139
PC-B-100	0.30	0	448	0	0	1790	134
REF-C-0	0.30	10	464	52	2098	0	139
PC-C-25	0.30	10	447	50	1515	505	134
PC-C-50	0.30	10	431	48	974	974	129
PC-C-75	0.30	10	417	46	470	1410	125
PC-C-100	0.30	10	403	45	0	1817	121

13

### 14 2.3 Physical-mechanical investigations

15 The procedures and tests of concrete were defined according to the standards presented in table 4 and  
 16 detailed in sequence.  
 17  
 18  
 19

1  
2

**Table 4:** Test methods used

Properties	Standard	Dimensions	Amount		Age (days)
			without fly ash	with fly ash	
Compressive strength	Brazilian standard NBR 5739 (ABNT, 2018)	Cylinders (10 ×20 cm)	2	4	28 and 63
Flexural strength	Brazilian standard NBR 12142 (ABNT, 2010)	Prismatic (10×10×30 cm)	2	2	28
Infiltration rate	ASTM C1701	Slabs (30×30×5 cm)	2	2	28
Permeability coefficient	Neithalath et al. (2003)	Cylinders (8×15 cm)	2	1	28
Clogging	Deo et al. (2010)	Cylinders (8×15 cm)	2	1	28
Surface abrasion	CIENTEC Procedure	Prisms (4×4×5 cm)	2	-	28

3

4 **2.4 Water infiltration rate**

5 The water infiltration rate test was carried out in accordance with the recommendations presented in  
6 ASTM C1701 (2009) and represented in figure 4.



Figure 4: Infiltration test.

7

8

9

10 Measuring the infiltration time (t) and the infiltrated water mass (M) used in the test, the water  
11 infiltration rate (I) was determined using equation 2.

12

13

$$I = \frac{K \times M}{(D^2 \times T)} \quad (2)$$

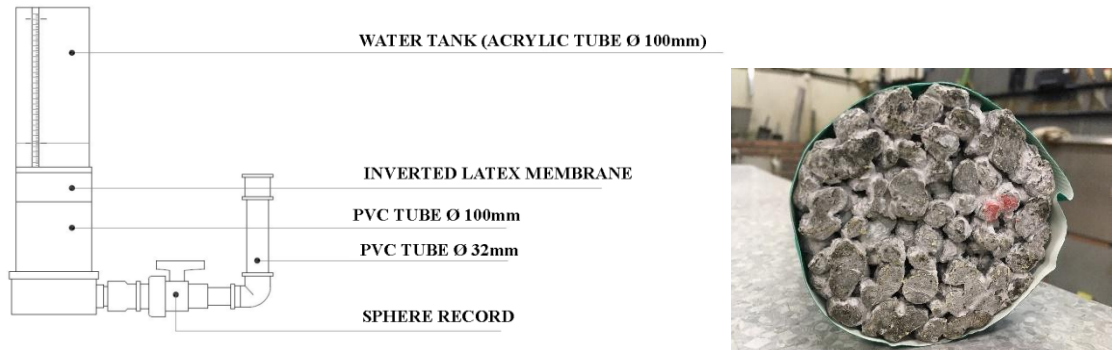
14

1 Where:  $I$  is the water infiltration rate, in mm/h;  $K$  is a constant (4.583.666.000);  $M$  is the infiltrated water  
 2 mass, in kg;  $D$  is the diameter of the tube, equal of 250 mm and;  $T$  is the time that the mass of water  
 3 takes to infiltrate, in seconds.

## 5 2.5 Permeability

6 The permeability test was based in the proposal of Neithalath (2003) which considered a concept  
 7 equivalent to that of the variable load permeameter. The pervious concrete samples were placed inside  
 8 a transparent acrylic cylindrical tube, to allow the visualization of the water flow. The tube was slightly  
 9 larger in diameter than the specimen to ensure a tight fit. To form a reservoir under the sample another  
 10 PVC pipe was used, thus ensuring that there would only be water flow through the same. The concrete  
 11 samples were surrounded by an impermeable latex membrane that aims to prevent the water lateral flow.  
 12 In the test device lower part, a third PVC pipe was attached, which was connected to a horizontal PVC  
 13 pipe of 50 mm in diameter, with a valve that connects to a vertical PVC pipe of 32 mm in diameter with  
 14 the necessary height. for recording the end time of the test. Once, when the water in the reservoir began  
 15 to flow through the pervious concrete already saturated, water depth of 1 mm was equalized. Figure 5a  
 16 illustrates the equipment used.

17 Initially, the specimen was jacketed with the latex membrane (Figure 5b) on its lateral surface. Then the  
 18 assembly was placed inside the PVC intermediate tube of 100 mm in diameter, which was already  
 19 connected with the downstream equipment. Then, water was added until the sample was saturated and  
 20 eliminated all the air that could be inside the set. Then, the transparent acrylic cylindrical tube was fitted  
 21 and the water was added.



24 Figure 5: (a) Scheme of the permeability test equipment (adapted from Lamb); (b): Specimen jacketed by the  
 25 latex membrane.  
 26

27  
 28 When carrying out the method, the time ( $t$ ) necessary for the water slide to percolate the system between  
 29 the previously marked points, 290 mm ( $h_1$ ) and 70 mm ( $h_2$ ), in the acrylic tube must be controlled. This  
 30 procedure must be repeated three times for each sample, the average time being used to calculate the  
 31 permeability coefficient ( $K$ ), determined from Darcy's Law, according to Equation 3.

$$32 \quad 33 \quad K = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \log\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (3)$$

1           Where:

- 2
- 3           a) “ $K$ ” is the permeability coefficient in cm/s;
- 4           b) “ $a$ ” is the area of the load tube in cm<sup>2</sup>;
- 5           c) “ $L$ ” is the height of the sample in cm;
- 6           d) “ $A$ ” is the area of the sample where water flows in cm<sup>2</sup>
- 7           e) “ $t$ ” is the time spent by the water slide in seconds;
- 8           f) “ $h_1$ ” is the height of the initial water depth of the test in mm;
- 9           g) “ $h_2$ ” is the height of the final water depth of the test in mm.

## 11   **2.6 Clogging**

12   The experimental procedure for determining the permeability reduction due to repeated additions of  
13   clogging material together with water is an adaptation of the method used by Deo et al. (2010). The  
14   material used in this study was sand with a maximum particle diameter equal to 0.6 mm.

15   The procedure for determining the permeability reduction due to the clogging effect can be explained  
16   as follows: after measuring the permeability of the unblocked sample, the water in the cylinder has been  
17   drained completely. Twenty-five grams of the clogging material were spread evenly over the sample  
18   surface and the permeability test was conducted allowing water to flow through the sample. This  
19   represents the first part of the experiment, in which part of the sand will pass through the sample and  
20   leave the bottom face, while the rest of the sand will be retained in the pores of the sample. This  
21   procedure was repeated until the time necessary for the water to fall from the initial height ( $h_1$ ) to the  
22   final height ( $h_2$ ). This process was repeated until no noticeable changes in permeability were obtained  
23   between two-time measurements were collected for each sample. It is worth mentioning that it was  
24   sought to avoid the accumulation of sand on the top of the sample surface, to avoid the inhibition of  
25   water flow. Figure 6 shows a cylindrical specimen after the test.



28  
29           Figure 6: Cylindrical specimen after clogging test.

## 31   **2.7 Surface Abrasion**

32   The resistance to superficial abrasion of pervious concretes was determined through the methodology  
33   developed by the Science and Technology Foundation of Rio Grande do Sul (CIENTEC). The method  
34   simulates abrasion wear, where the simulation of a 500 m course covered by two samples ( $4 \times 4 \times 5$  cm)  
35   of each mixture occurs. The samples were prepared by fixing a cardboard paper on the top of each  
36   specimen, and then the 5 points were marked for wear measurement. With the the micrometer,  
37   measurements were obtained before the test. The abrasive material used was silicon carbide where the



1 samples are subjected to wear considering a constant pressure of 0.06 MPa. The final result is obtained  
2 by the average wear of five points established in each sample.

## 5 2.8 Microstructural analysis

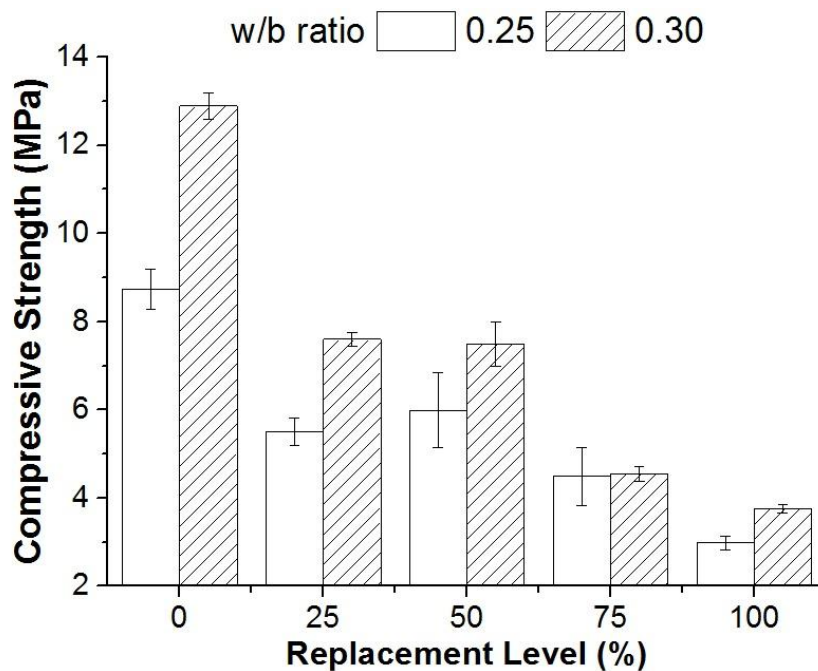
6 Scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the interaction between paste and the recycled  
7 aggregate of pervious concrete. The equipment used for the analyzes was the Inspect F50 - FEI, from  
8 0.3 to 30 kV with a resolution of 1.2 mm. From the central part of the specimen samples were extracted  
9 with dimensions of approximately  $2 \times 2 \times 2$  cm.

10 In the analysis of X-ray microtomography, the aim was to analyze the pervious concrete porosity, as  
11 well as to investigate the existing voids according to the increase in the recycled aggregate content. The  
12 samples analyzed from the x-ray microtomography were performed with a SkyScan 1173 - Bruker  
13 scanner with a resolution of 10  $\mu$ m. Subsequently, the images were reconstructed using the DataViewer,  
14 CTan, and CTvol software.

## 16 3 RESULTS AND DISCUSSION

### 17 3.1 Compressive strength and flexural strength

18 The effect of w/b ratio in compressive strength is presented in Figure 7.

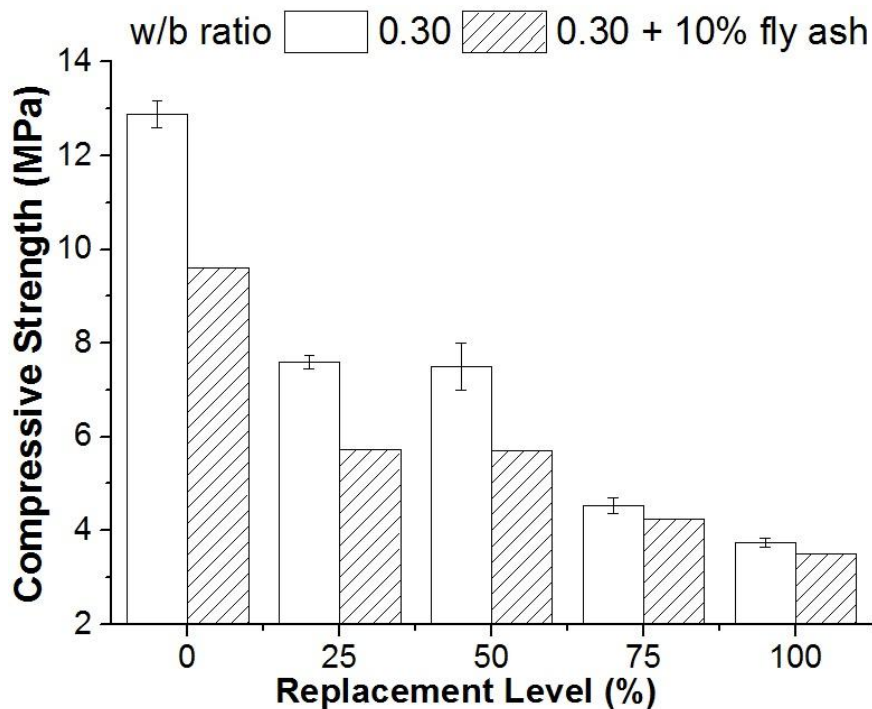


20 Figure 7: Comparison between compressive strength at 28 days at w/b = 0.25 and 0.30.

21  
22  
23 Must be observed the decrease of compressive strength with the increase of RA replacement. The  
24 greatest decrease was observed in PC-A-100 samples, (62.5% smaller than reference concrete), whose  
25 behavior was already reported in the literature. Özalp et al. (2016) obtained a 20% reduction in  
26 compressive strength for a 20% RA replacement. The results of El-Hassan et al. (2019) showed that for  
27 70% and 100% of RA replacement a reduction in compressive of 82 and 87%, respectively. Lu et al.  
28 (2019) replaced the natural aggregate for RA and observed that the compressive strength decreased by  
29 31%. This fact is probably related to the low abrasion resistance and density of the recycled aggregate,

1 increasing the volume of internal voids, making it more fragile to mechanical tensions.  
 2 According to the ACI 522R (2010), the compressive strength results obtained are usually between the  
 3 limits of 3.5 MPa and 28 MPa for pervious concretes with natural aggregates. Therefore, for PC-A-100  
 4 the value is below the limit, and for PC-B-100 it is close to what was expected.  
 5 It was observed that with the increase in the w/b ratio from 0.25 to 0.30, all concretes showed a gain in  
 6 compressive strength between 4% and 7%, which may be related to the greater amount of water available  
 7 for cement hydration reactions. Debnath and Sarkar (2019) reported the need to define an adequate w/b  
 8 ratio, not being too low in order to cause difficulties in paste hydration, but also not exceeding a certain  
 9 limit, as this would not allow the mixture to lose consistency, causing the lack of cohesion between the  
 10 aggregate particles. The use of superplasticizer would contribute to improving the workability  
 11 characteristics, whereas the retarding setting additives would help in the setting of setting time, which  
 12 occurs very quickly in the pervious concrete (NRMCA, 2011). The relationship between strength and  
 13 water content in pervious concrete is not too evident comparing with conventional concretes due to the  
 14 low workability of the material. For lower w/b ratios is very difficult evaluate visually difference in  
 15 consistency of pervious concretes, considering the wet metallic appearance desired, as prescribed by  
 16 ACI 522R-10 (2010).

17 Figure 8 shows the effect of fly ash on the compressive strength of concrete with w/b = 0.30.  
 18

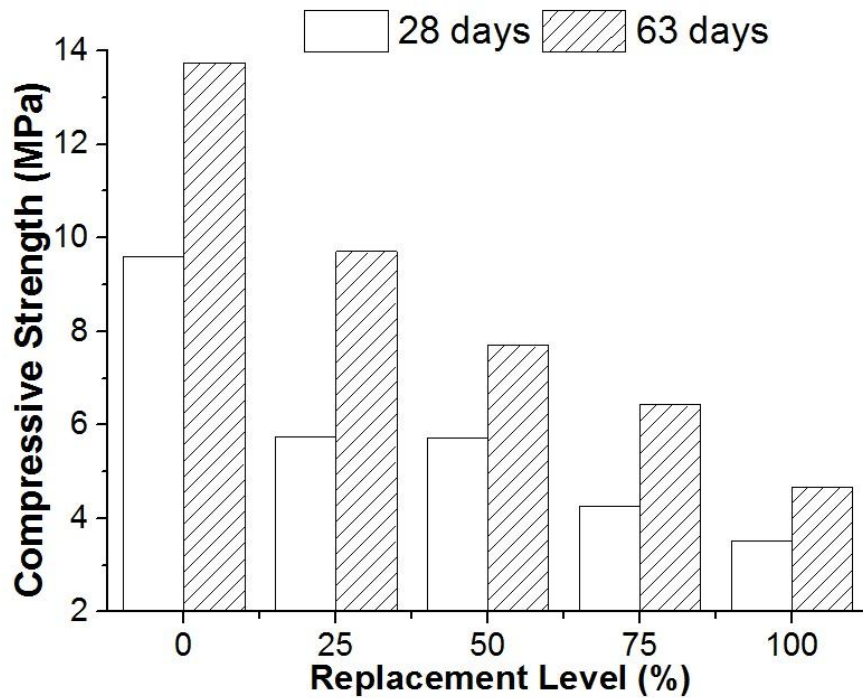


19  
 20 Figure 8: Comparison between compressive strengths at 28 days at w / b = 0.30 and 0.30 with 10% fly ash.  
 21

22 Can be observed an average decrease in compressive strength of 24.5% when compared concretes with  
 23 the same w/b ratio, and same RA replacement content. At lower ages the development of pozzolanic  
 24 reactions are not effective, and the tendency is the increase of strength at later ages. According to  
 25 Magesvari and Sundararajan (2017), pervious concretes containing 20% fly ash showed a decrease in  
 26 compressive strength, ranging from 5.70 to 8.83 MPa at lower ages. Besides, the pervious concrete with  
 27 fly ash meets the minimum required for compressive strength and can be used as base layer in flexible  
 28 pavements, following the standards in India.

29 Figure 9 shows the effect of fly ash in compressive strength evolution.  
 30

1



2

3

Figure 9: Comparison between compressive strengths at 28 days and 63 days for w/b = 0.30 with 10% fly ash.

4

5

Can be observed the increase in compressive strength with time, due to pozzolanic effect of fly ash at older ages. Chen et al., (2019) showed that, in comparison with the pervious reference concrete, at 28 days, concrete with 15% replacement of fly ash has similar compressive strength, but with values below the reference, being close to 14 MPa. According to Pranav et al., (2020) although fly ash is commonly used worldwide in conventional concrete, when it comes to floors, it is not so easily usable, since the increase in compressive strength occurs at older ages. Some measures are already used in conventional concrete and could be used in pervious concrete with fly ash to leverage the development of mechanical strength. According to Xu and Shi (2018) the alkaline pre-treatment helps in the hydration process, acting from the chemical activation of fly ash. In addition, binary mixtures such as the use of fly ash and nanosilica have been used as nano-reinforcement to try to improve the performance, mechanical strength, microstructure and durability of concrete.

10

11

12

13

14

15

16

The splitting tensile strength of concretes considering the w/b evaluated are presented in Figure 10.



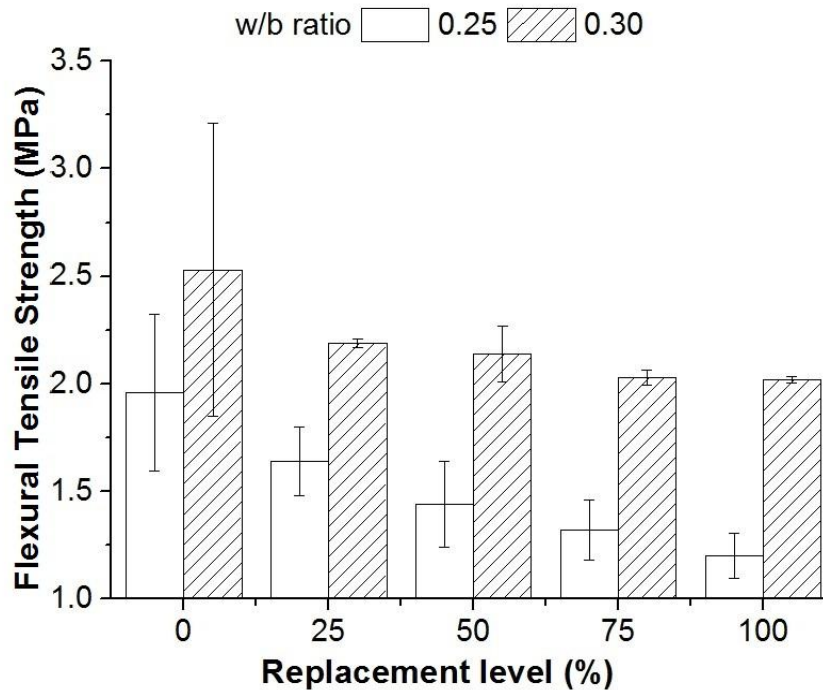


Figure 10: Comparison between flexural tensile strengths at 28 days for w/b = 0.25 and 0.30.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18

It is possible to observe that, as well as in compressive strength, the values of flexural strength are also higher for the w/b ratio = 0.30 due to the greater amount of free water, influencing a better formation of hydrated products. According to Debnath and Sarkar (2020), as the w/b ratio increases, highest the water necessary for cement hydration, improving the cohesion between the aggregates and the strength development, consequently increasing the tensile strength values.

The PC-A-100 concrete showed a reduction of 38.98% in relation to reference concrete for the smallest w/b ratio, while for the w/b ratio = 0.3 there was a smaller decrease (20.56%). El-Hassan et al. (2019) found that the replacement of natural aggregate for RA lead to a decrease in flexural strength. According to the author, concrete mixtures with 10% and 20% of porosity showed losses of 11.3% and 6.6%, respectively.

Figure 11 shows the effect of fly ash on flexural strength. In general, it is observed that the presence of fly ash leads an increase in such property. Concretes with 25% and 50% RCD showed similar results, but with a decrease in flexural strength of 21.56% in relation to the reference concrete.

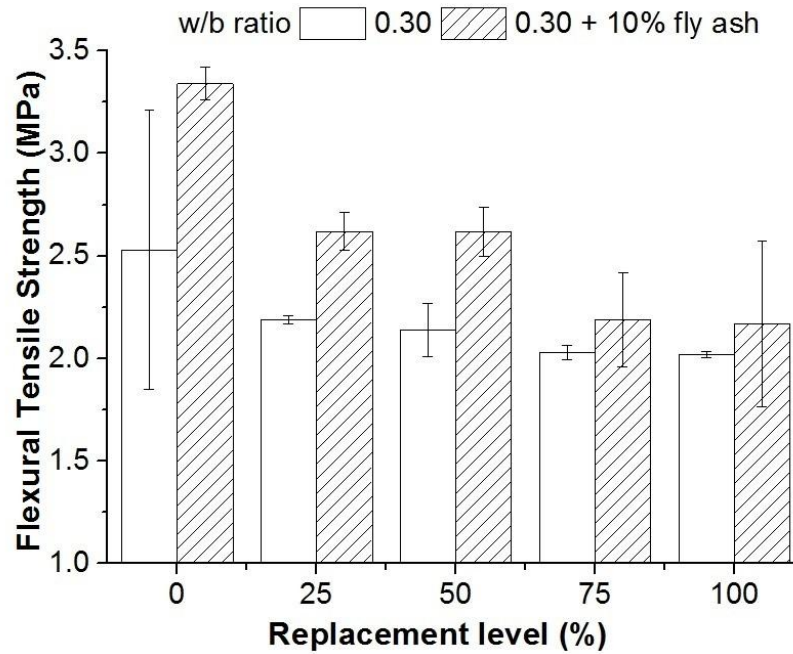


Figure 11: Comparison between tensile strength at 28 days for concretes with w/b = 0.30 and 0.30 +10% fly ash.

The Brazilian standard NBR 16416 (ABNT, 2015) determines that the minimum values of flexural strength in pervious concrete slabs for pedestrian traffic is 1 MPa, while for light traffic it is 2 MPa. Güneysi et al, (2016) found values of flexural strength between 1.0 and 1.29 MPa for pervious concrete with substitution of natural aggregate for recycled aggregate at the levels of 25, 50, 75 and 100%.

### 3.2 Water permeability coefficient

The effect of the w/b ratio and the replacement level in permeability coefficient is shown in figure 12.

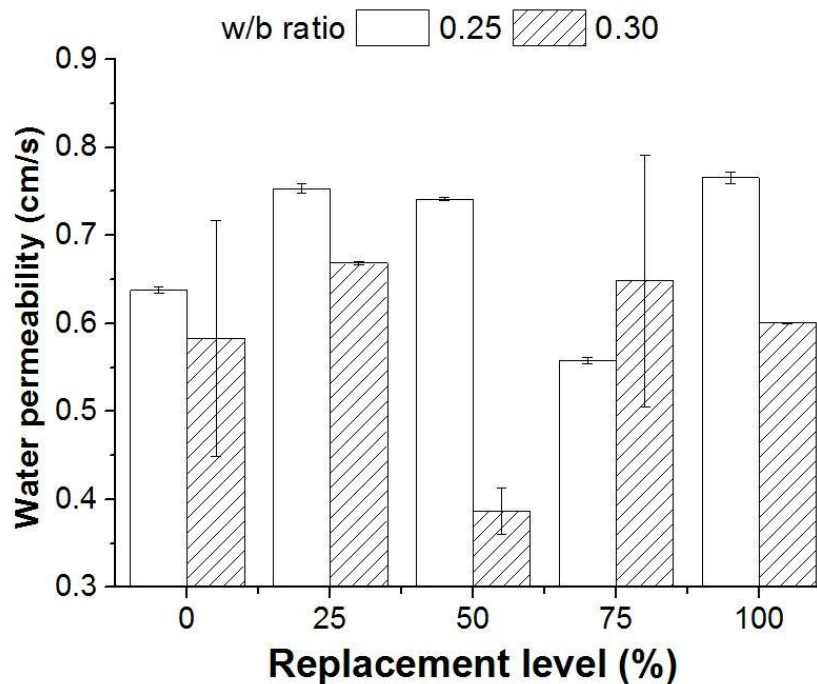


Figure 12: Comparison between permeability coefficient in concretes.

It is possible to verify, in a general tendency, that there is an increase in permeability according to the

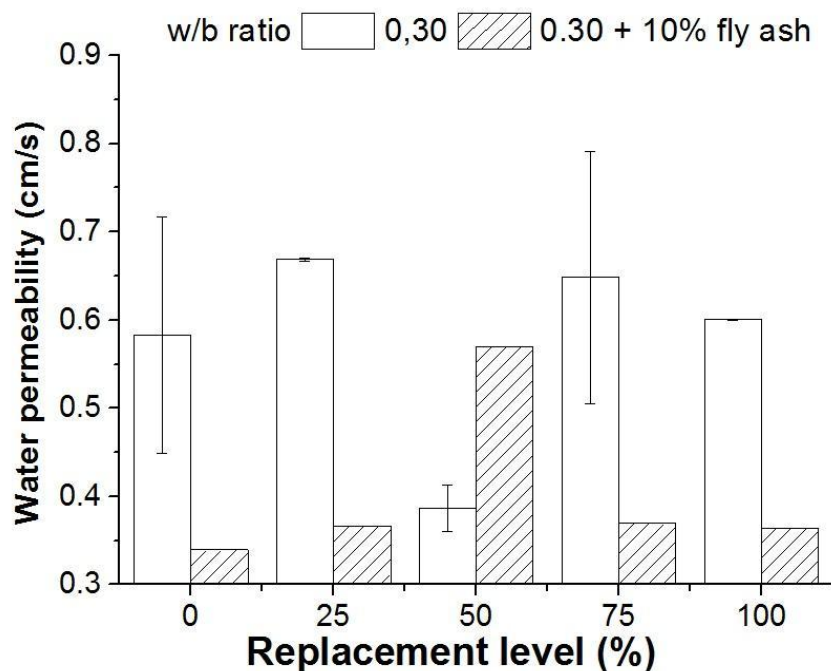
1 increase of RA replacement level for  $w/b = 0.25$ , except for 75% of RA, whose values of permeability  
 2 coefficient presented a slightly decrease. Considering pervious concretes with  $w/b$  ratio 0.30 and 50%  
 3 of RA the decrease was more significant. This can be explained by the characteristic of the RA, whose  
 4 composition consists in particles with low abrasion resistance, such mortars and ceramic particles, which  
 5 may presented a certain degree of fragmentation during the mixing process. In this way, the path taken  
 6 by the water can be affected and, consequently, its permeability coefficient does not increase as the RA  
 7 content is increased.

8 Zaetang et al. (2013) found coefficients that varied from 0.3 to 4.7 cm/s for pervious concretes with  
 9 diatomite aggregate, pumice aggregate and recycled cellular concrete aggregate. The highest value was  
 10 found when using stone aggregate pumice. Nguyen et al. (2017) obtained permeability coefficients in  
 11 the range of 0.22 - 0.34 cm/s for pervious concrete with RA from crushed sea shells.

12 The Brazilian standard NBR 16416 (ABNT, 2015) specifies the permeability value of 0.1 cm/s as the  
 13 minimum criteria that pavement must present in the first days after its execution. The ACI 522R (2010)  
 14 establishes a minimum value of 0.14 cm/s for the permeability coefficient in pervious concretes. Thus,  
 15 it can be seen in Figure 12, although they have variations associated with the values found, all  
 16 investigated mixtures showed permeability values above the minimum specified by normalization.

17 In figure 13 it is possible to observe the effect of the substitution of fly ash in permeability coefficient.  
 18 Must be verified that, in general, there is a reduction of such property, except for concrete PC-C-50,  
 19 which presented a higher water permeability than PC-B-50 without substitution of fly ash. When  
 20 investigating the effect of granulated blast furnace slag on the permeability of pervious concrete, El-  
 21 Hassan et al. (2019) found a reduction between 15% and 23% for this parameter. According to the  
 22 authors, the occurrence of the pozzolanic reaction was one of the factors that led to such minimization,  
 23 due to the formation of nucleation points of hydrated calcium silicates, with consumption of calcium  
 24 hydroxide from cement hydration.

25  
 26



27  
 28 Figure 13: Comparison between permeability coefficient in the  $w/b = 0.30$  and  $0.30$  ratios with 10% fly ash  
 29 replacement.  
 30  
 31

### 3.3 Water infiltration rate

Figures 14 and 15 show the infiltration rate results for pervious concrete investigated.

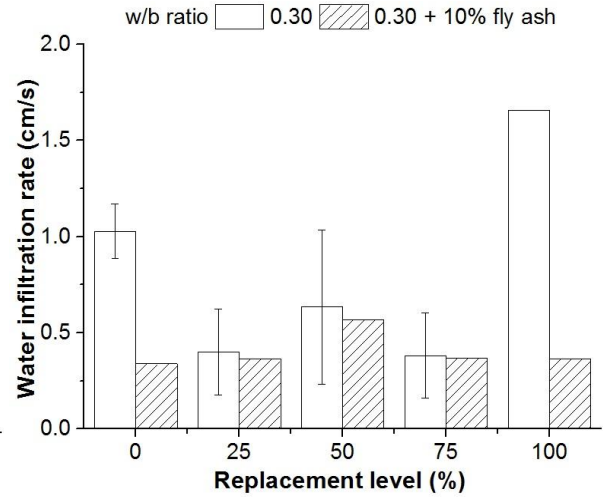
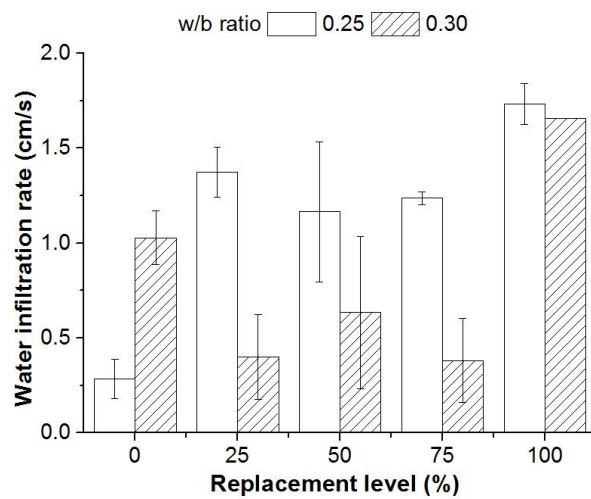


Figure 14: Effect of w/b ratio on the infiltration rate

Figure 15: Influence of fly ash in infiltration rate

Must be observed that the infiltration rate increases with the increase in the amount of RA for w/b = 0.25, as can be seen in Figure 14. With the increase in the w/b ratio, in general, there was a decrease in the infiltration rate, which can be associated with the slabs thickening, which is one relevant parameter that influenced the behavior in the infiltration rate. For higher w/b ratios must occur the segregation of cement paste to the bottom of the concrete slab, leading to a decrease in intercommunication between the concrete voids in slabs due to clogging.

Similar behavior was observed for fly ash concretes (Figure 15), with a significant decrease of infiltration rate. The spherical form of fly ash contributes to an increase in workability (Silva e Andrade, 2017). In this way, during the vibration process, some permeable voids may have been blocked by a cement paste, negatively affecting the infiltration rate.

Infiltration rates ranged from 0.28cm/s and 1.73cm/s for the w/b 0.25 ratio, showing a 617.85% increase in concrete infiltration with 100% RA when compared to the reference. For the w/b ratio 0.30, the infiltration rates ranged from 0.38 cm/s and 1.65 cm/s, showing an increase of 434.21%, considering the variation between the reference concrete and the one with 100% replacement. For the w/b 0.30 ratio with 10% fly ash replacement, the increase in the infiltration rate was lower than the other mix proportions but still maintained an increase of 185.24% between the reference concrete and the pervious concrete with 100% of RA.

### 3.4 Clogging

The results obtained through the clogging test are shown in figures 16, 17 and 18.

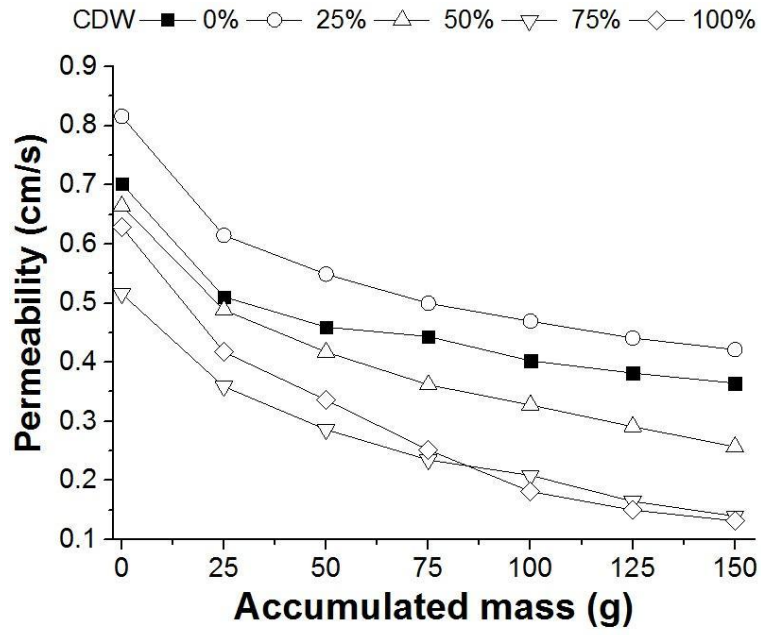


Figure 16: Clogging in pervious concrete specimens with w/b = 0.25.

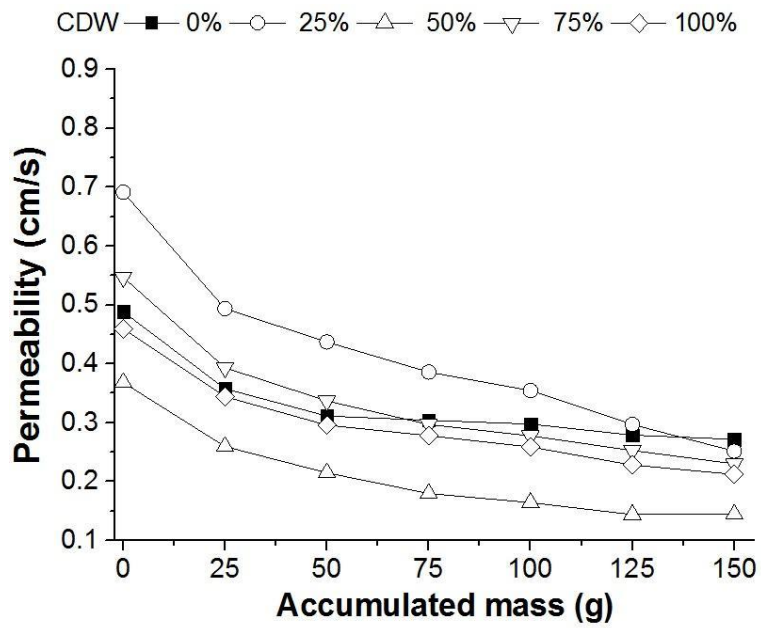


Figure 17: Clogging in pervious concrete specimens with w/b = 0.30.

1  
2  
3

4  
5  
6

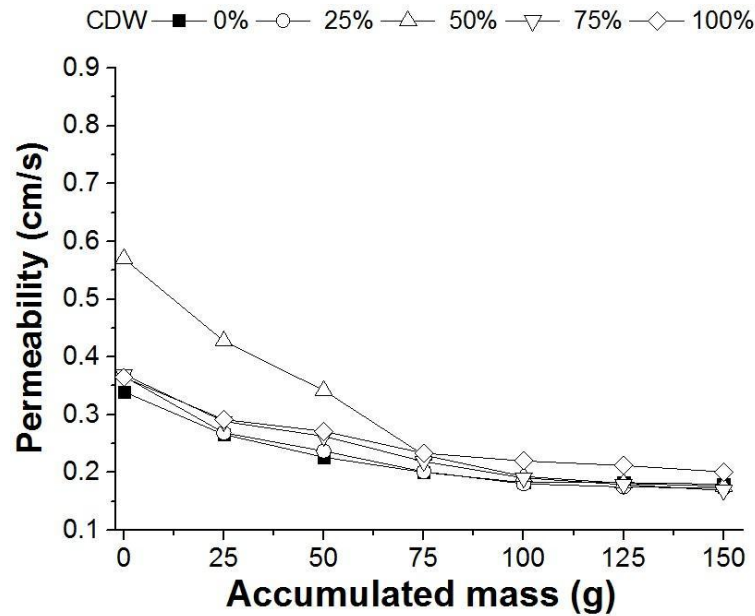


Figure 18: Clogging in pervious concrete specimens with a w / b = 0.30 ratio and 10% fly ash replacement.

In general, it can be seen that the increase in substitution levels of natural aggregate for RA presented a significant influence in clogging. Considering both w/b ratios analyzed concretes with 75% and 100% substitution showed a greater tendency to clog, while the specimens with 25% AR had a greater permeability. In concrete with fly ash (Fig. 18), it was observed that all samples showed the same behavior, except for concrete with 50% RA. However, the permeability coefficients values remained at levels much lower than those without fly ash, whose behavior is consistent with the values obtained for the infiltration rate (Fig. 15).

Deo et al. (2010) used fine sand and observed significant reductions in permeability with the addition of material in casting concrete with aggregate with grains sizes between 9.5mm and 4.75 mm while presenting an insignificant loss of permeability for concrete with aggregate between 12.5 mm and 9.5 mm sieve. In the use of coarser sand, the permeability reduction was not significant. Sandoval et al. (2020), tested sand, clay and the mixture of the two materials and found that the thinner the sediment, the more influence it will have on clogging pervious concrete. In the use of clay and clay with sand, the permeability coefficient was reduced by 95%.

### 3.5 Surface abrasion resistance

Tests of resistance to surface abrasion of pervious concrete containing only recycled aggregate were carried out with the pervious concretes without fly ash, whose results are shown in figure 19.

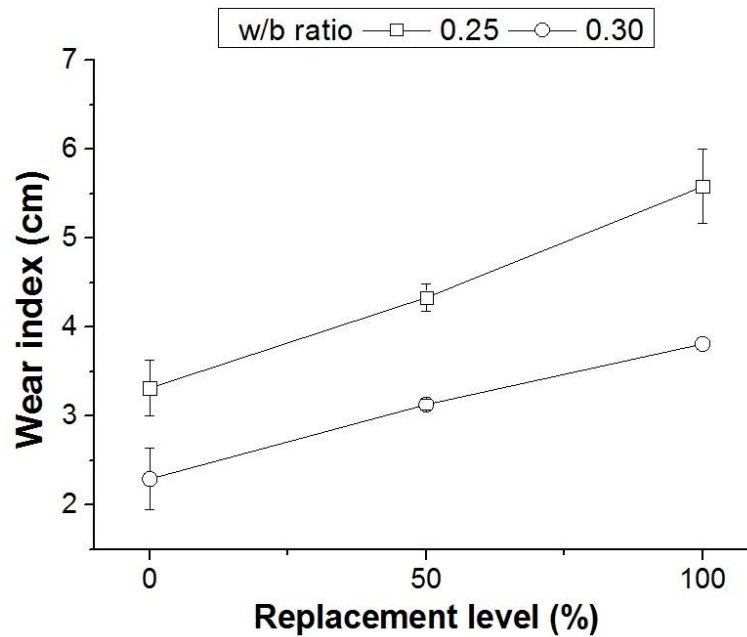


Figure 18: Influence of w/b and replacement level in surface abrasion

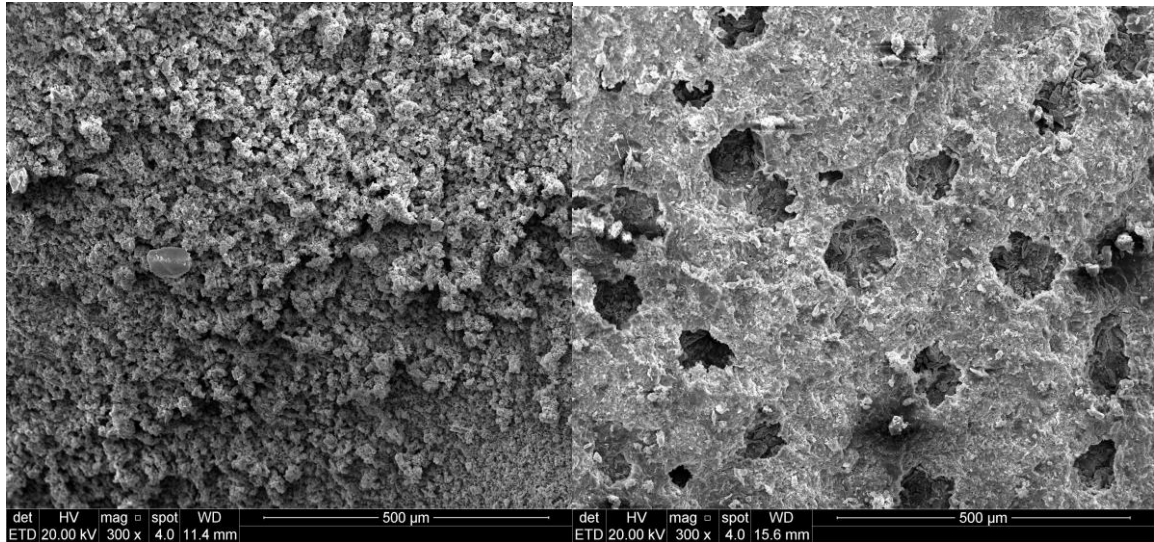
It is possible to observe that the ratio w/b 0.25 presents a greater tendency to surface wear than the ratio w/b 0.30. This fact occurred mainly due to the better hydration of the concretes with w/b = 0.30, following the same trend found in the results of compressive strength and tensile strength. In this way, the interrelation between mechanical properties is evidenced, whose pervious concrete behavior is related to the dispersion capacity of the mixing water.

It was found that the higher the content of substitution of natural aggregate for recycled aggregate, the greater the abrasion suffered by pervious concrete. Decreasing effects on mechanical strength in pavements may occur due to the RA often presents mortar, ceramic material, and cement paste from the original concrete adhered to the surface of the RA. Consequently, there is an increase in porosity, mainly due to the presence of two interfacial transition zones, cracks and pores in the adhered mortar of recycled aggregates (Kumar, 2017).

### 3.6 Scanning electron microscopy (SEM)

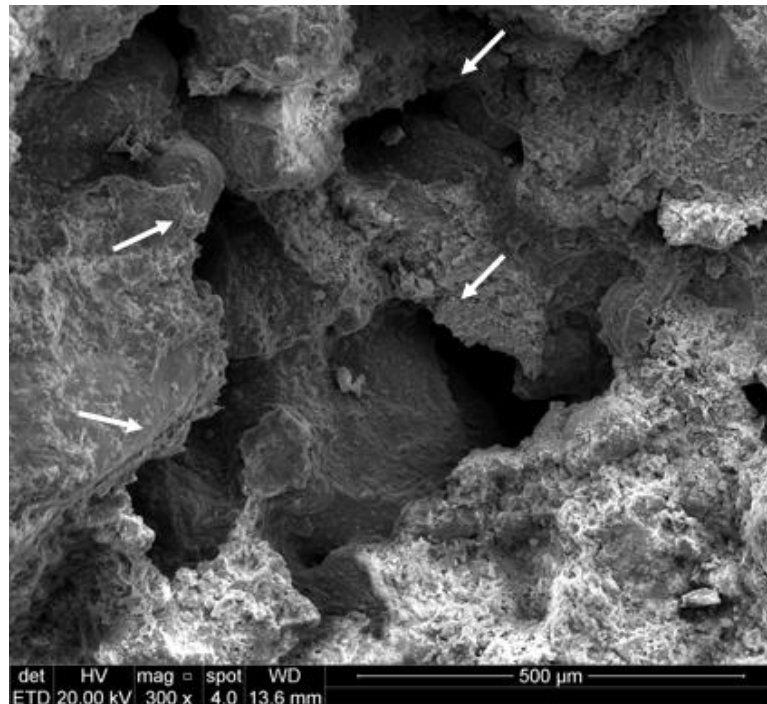
Figure 20 shows a comparison of the sample surface of the reference concrete (a) and the concrete with 100% recycled aggregate (b), both with a w/b ratio of 0.30. As expected, as the RA replacement increases, can be noted an increase of concrete porosity.





1  
2  
3 Figure 20: SEM images for reference concrete (a); pervious concrete with 100% replacement and w/b ratio =  
4 0.30 (b)  
5  
6

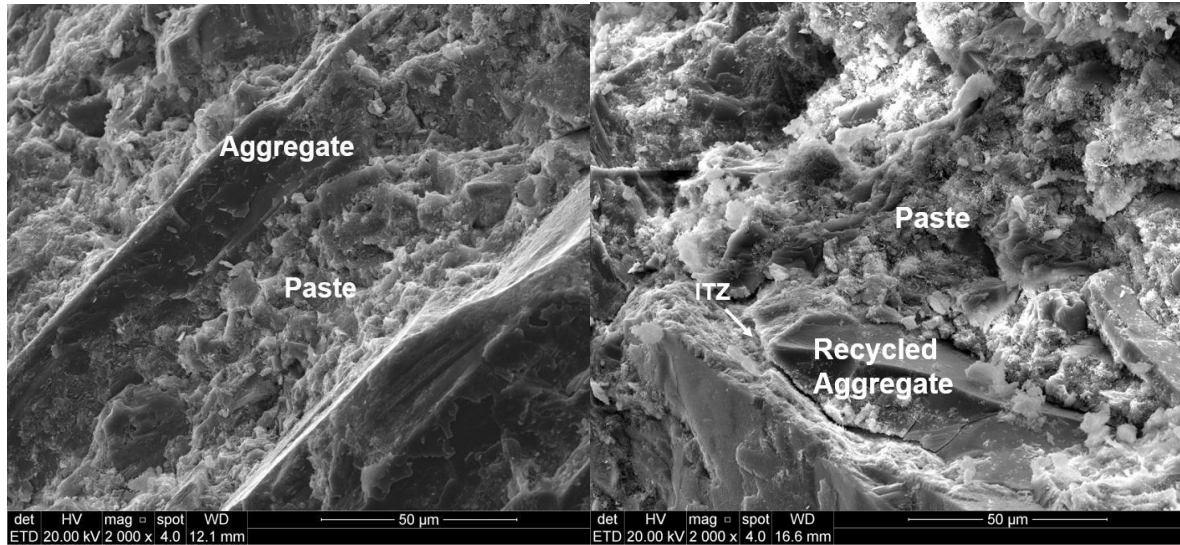
7 Figure 21 shows the voids inside the sample with 25% of RA, which is evident with a 300×  
8 magnification. The performance of pervious concrete depends on the cement paste, aggregates, cement  
9 content, water/cement ratio and mainly on the pore structure (Ahmaruzzaman, 2010). The pervious  
10 concrete with 25% replacement by recycled aggregate presented the porous cement paste and with large  
11 interconnected voids.  
12  
13  
14



15  
16 Figure 21: Pervious concrete with 25% replacement  
17



1 In Figure 22 (a) it is possible to observe the microstructure of the reference pervious concrete and (b)  
2 the microstructure of the pervious concrete with 75% replacement.



3

4

(a) (b)

5

Figure 22: pervious concrete reference (a) and pervious concrete with 75% replacement (b)

6

7 The phase variations of the pervious concrete (paste with high porosity and consequently interfacial  
8 transition zone) are in evidence with an increase in the replacement content. According to Yang et al.  
9 (2020), the pervious reference concrete presents a more dense paste, whose pores are not less significant,  
10 considering that the presence of ITZ is not visible. The recycled aggregate has trapped and permeable  
11 pores, while the natural aggregate does not have permeable pores. In addition, the presence of cracks  
12 also makes the RA structure weaker (Singh et al., 2019). According to Wang et al. (2020) due to the  
13 processing of RA (crushing and sieving), the concrete microstructure has several disadvantages, such as  
14 porosity increase and weak ITZ. In this way, the porosity of RA in the pervious concrete is beneficial  
15 considering the permeability and infiltration criteria. On the other hand, the RA presents a fragile  
16 microstructure, with a great number of microcracks in ITZ, that have a significant impact on physical-  
17 mechanical properties.

18

19

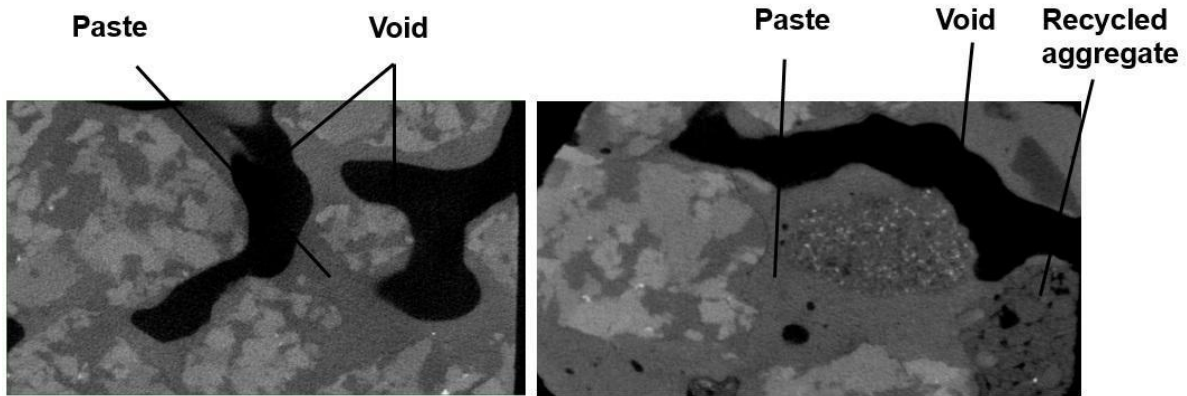
20

### 3.7 X-ray microtomography

21

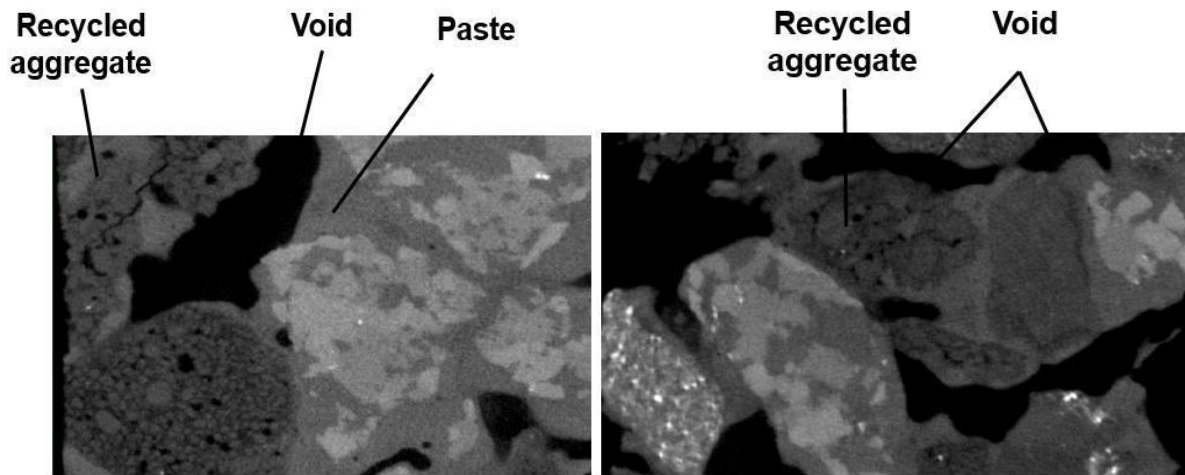
X-ray microtomography was used to analyze the pervious concrete porosity. The same dimension of  
22 VOI was selected for all samples ( $1000 \times 660 \times 2000$  pixels). Figure 23 shows a section of pervious  
23 reference concrete and with 25% of RA, both with a w/b ratio of 0.25.

23



(a) (b)  
 Figure 23: pervious reference concrete (a) and pervious concrete with 25% replacement (b)

Figure 24 shows the pervious concrete with 50 and 75% replacement of RA.



(a) (b)  
 Figure 24: pervious concrete with 50% replacement (a) and with 75% replacement (b)

The reference concrete Figure 23(a) has large voids and the cement paste. While concretes with 25% of RA (Figure 23(b)) it is possible to verify the difference of the porous recycled aggregate, and the voids (large spaces between the aggregates) there are small pores (present in the concrete paste). In concretes with 50% of RA (Figure 24a) presents voids, paste and high porosity of the cracked RA, and concrete with 75% of RA (Figure 24b) shows the different phases of pervious concrete: RA, paste and irregular voids. According to Kia et al. (2017) the pore network in pervious concrete is highly complex and heterogeneous, and its pore channels are tortuous, with variable cross section and random interconnectivity. Leite and Monteiro (2016) observed the connectivity and tortuosity of the pores of the concrete with recycled aggregate, and the formation of large pores around the interface of the recycled aggregate. In addition, it was pointed out that the cracked recycled aggregate can generate large pores in its proximity. The direction of cracks in the recycled aggregate follow the old mortar adhered to the aggregate (YAP et al., 2018).

Figure 25 shows the pervious concrete with 100% of RA with high porosity (the aggregate contains small to medium pores) in addition to the cement paste.

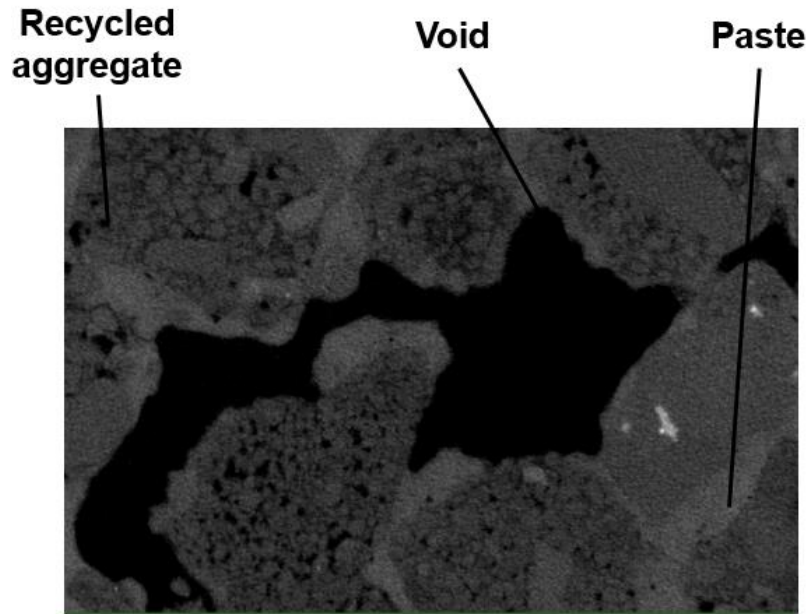


Figure 25: Pervious concrete with 100% replacement

Figure 26 shows the reconstruction of a section ( $500 \times 500 \times 500$  pixels) of the central part of the reference sample (a) and with 100% replacement of NA by RA (b).

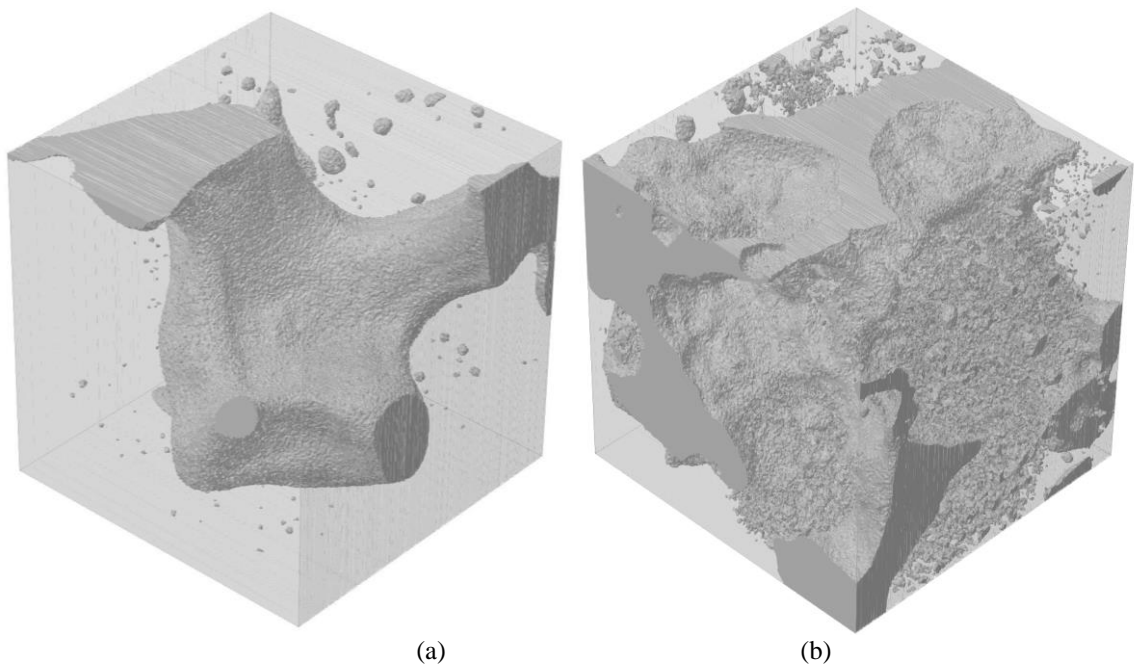
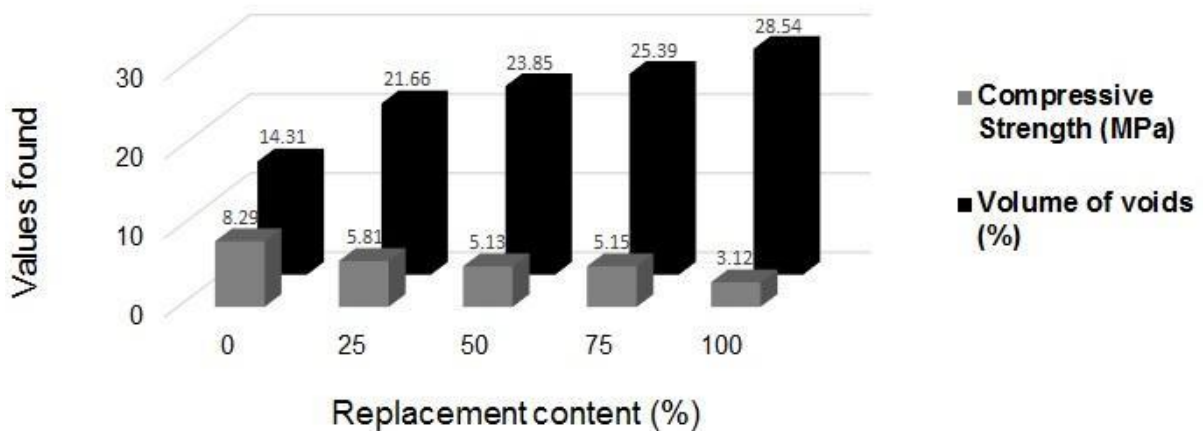


Figure 26: Reconstructed images of reference concrete (a) and concrete with 100% of RA (b)

The pervious reference concrete (a) has large interconnected voids and some pores. The pervious concrete with 100% replacement has larger voids due to its high porosity. As a result of the high porosity of the pervious concrete together with the use of RA some points can be observed. According to Manzi et al. (2017), the microstructure of the concrete is influenced by the content and variety of recycled aggregates, promoting different pore size distributions (i.e., the content of macropores and mesopores),

1 which in turn influence the mechanical properties in the short and long term. The recycled aggregate  
 2 when it comes from ceramics has good resistance to compression, however, they are brittle and appear  
 3 to vary in size and roughness (Anderson et al., 2016). As shown, the recycled aggregate proved to be  
 4 fragile due to its fragmentation. On the other hand, due to the use of mixed recycled aggregate, its  
 5 composition also consists of residues of natural aggregate. This factor can influence significantly the  
 6 water percolation in pervious concrete, and the permeability coefficient does not increase due to the  
 7 clogging caused by fragmentation of RA, minimizing the tortuosity and the voids between the RA  
 8 particles, as shown in Figure 26b.

9 Figure 27 shows a correlation between the porosity values obtained by x-ray microtomography and t  
 10 compressive strength.



15 Figure 27: Void volume and compressive strength of pervious concrete

16 The concrete with 100% substitution presented a porosity of 28.54% while the reference 14.31%. The  
 17 results are in accordance with that found by Yap et al. (2018), where the projected porosity of pervious  
 18 concrete was in the range of 20%. According to Kia et al. (2017), pervious concrete is characterized by  
 19 highly interconnected porosity, typically in the range of 15 to 35% which allows water to flow quickly  
 20 through the pore structure. Higher porosity and absorption values are associated with an increase in the  
 21 content of recycled aggregate in concrete (Kim et al., 2019). However, it is noticed that the increase in  
 22 porosity causes a decrease in the compressive strength. In general, it is difficult to simultaneously  
 23 optimize mechanical and durability properties and infiltration, as the good performance of pervious  
 24 concrete is governed by porosity (Xie et al., 2019).

## 28 4 CONCLUSIONS

29 The main objective of this work was to analyze the use of RA from construction and demolition residues  
 30 and fly ash in pervious concretes. Based on the results obtained, it is possible to draw some relevant  
 31 conclusions:

- 32 • It was found that mechanical properties decreases with smaller w/b ratio. This fact must be  
 33 associated with the difficulty of water dispersion considering the paste hydration. So, the use of  
 34 highest w/b ratio or superplasticizers is recommended for pervious concrete mixtures.
- 35 • There was an increase in the permeability and the infiltration rate in pervious concretes with  
 36 RA. The greatest tendency to clogging was found in pervious concrete with 50% RA of RA,

1 while the reference concrete obtained 46% less tendency to clogging. Due to the replacement  
2 of 10% fly ash and 75% recycled aggregate, there was an increase of 6% in the tendency to  
3 clogging compared to reference concrete.

- 4 ● It was observed that the w/b 0.25 ratio has a greater tendency to surface wear than the w/b 0.30  
5 ratio, due to the lack of cohesion between the aggregates. Besides, the replacement of NA by  
6 RA increase the surface abrasion of pervious concrete;
- 7 ● The analysis using scanning electron microscopy showed many pores in the pervious concrete  
8 paste. X-ray microtomography provided an understanding of pervious concrete through the  
9 presence of interconnected pores and pores within the recycled aggregate, which explains a high  
10 porosity value (28.54%) for concrete with 100% replacement.
- 11 ● The pervious concretes containing recycled aggregates managed to reach the minimum required  
12 permeability, as requested by brazilian standard NBR 16416 (ABNT, 2015). However, as they  
13 present a low tensile flexural strength, and their use must be adequate only in areas for  
14 pedestrian traffic. However, for its use in light traffic and as pervious concrete slabs, it is  
15 essential to analyze new mix proportioning, in order to achieve the performance requirements  
16 prescribed in project.

## 17

## 18 **ACKNOWLEDGMENTS**

19 The authors would like to thank to Prof. R. Girardi from PUCRS and Foundation Science and  
20 Technology (CIENTEC) of Rio Grande do Sul; A. H. Augustin from the IPR/PUCRS; D. T. Rodeghiero  
21 and J. E. Cruz from the Construction Materials Laboratory; the Interdisciplinary Center for Nanoscience  
22 and Micro Nanotechnology and the undergraduate students P. P. Novello, G. D. de Souza, V. S.  
23 Bocchese and J. V. C. Del Pino. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento  
24 de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

## 25

## 26 **REFERENCES**

- 27 AHMARUZZAMAN, M.. A review on the utilization of fly ash. Progress In Energy And Combustion Science, v.  
28 36, n. 3, p.327-363, jun. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- 29  
30 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2010. Pervious concrete. ACI 522R-10. Farmington Hills, MI: ACI.
- 31  
32 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1701/C1701M: Standard test method for  
33 infiltration rate of in place pervious concrete. West Conshohocken, 2009.
- 34  
35 ANDERSON, Derrick J.; SMITH, Scott T.; AU, Francis T.k.. Mechanical properties of concrete utilising waste  
36 ceramic as coarse aggregate. Construction And Building Materials, v. 117, p.20-28, ago. 2016.  
37 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>
- 38  
39 ASTM C1754 National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, 2011).
- 40  
41 BARNHOUSE, Patrick W.; SRUBAR, Wil V.. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of  
42 macroporous recycled-aggregate pervious concrete. Construction And Building Materials, v. 110, p.89-97, maio  
43 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.014>
- 44  
45 BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS - ABNT. NBR 12142: Concrete - Determination  
46 of tension strength in flexure of prismatic specimens . Rio de Janeiro: ABNT; 2010. (in Portuguese)
- 47  
48 BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS - ABNT. NBR 16416: Pervious concrete  
49 pavement - Requirements and procedures. Rio de Janeiro: ABNT; 2015. (in Portuguese)

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS - ABNT. NBR 16697: Portland Cement - Requirements. Rio de Janeiro: ABNT; 2018. (in Portuguese)

BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS - ABNT. NBR 5739: Concrete: compression test of cylindrical specimens. Rio de Janeiro: ABNT; 2018. (in Portuguese)

BRUINSMA, J. SMITH, K. PESHKIN, D. BALLOU, L. EISENBERG, B. LURIE, C. et al. Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports (ACRP Project No. 02-64). 2017. National Academies Press, Washington, D.C.

CARON, R., HOELLER S. C. Análise ambiental e especial a partir da extração e beneficiamento do calcário no município de Colombo, 2014.

CHANDRAPPA, A. K., & BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>

CHEN, Xiaodan; WANG, Hao; NAJM, Husam; VENKITEELA, Giri; HENCKEN, John. Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. Journal Of Cleaner Production, v. 237, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117714>

COUGHLIN, J. P. CAMPBELL, C.D. MAYS, D. C. Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system J. Hydrol. Eng., 17, pp. 68-73. (American Society of Civil Engineers), 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000424)

DAKWALE, V. A.; RALEGAONKAR, R. V. Development of sustainable construction material using construction and demolition waste. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, v. 21, n. 4, p. 451-457, 2014.

DEBNATH, Barnali; SARKAR, Partha Pratim. Characterization of pervious concrete using over burnt brick as coarse aggregate. Construction And Building Materials, v. 242, p.118-130, maio 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118154>

DEBNATH, B. SARKAR, P.P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. Construction and Building Materials, 213, 643-651, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.099>

DEO, O. SUMANASOORIYA, M. NEITHALATH, N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling. J. Mater. Civ. Eng., 22, pp. 741-751. (American Society of Civil Engineers), 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000079](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000079)

EL-HASSAN, H. KIANMEHR, P. ZOUAOUI, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. Construction and Building Materials, 212, 164-175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325>

GRUBESA, Ivanka Netinger; BARIŁIĆ, Ivana; DUCMAN, Vilma; KORAT, Lidija. Draining capability of single-sized pervious concrete. Construction And Building Materials, v. 169, p.252-260, abr. 2018.

GÜNEYİSİ, Erhan; GESOĞLU, Mehmet; KAREEM, Qays; İPEK, Süleyman. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. Materials And Structures, v. 49, n. 1-2, p.521-536, 27 dez. 2016.

HEIN, Michael F.; DOUGHERTY, Mark; HOBBS, Turner. Cleaning Methods for Pervious Concrete Pavements. International Journal Of Construction Education And Research, v. 9, n. 2, p.102-116, abr. 2013. <https://doi.org/10.1080/15578771.2011.649886>

HOLMES, R. R. HART, M. L. KEVERN, J. T. Enhancing the ability of pervious concrete to remove heavy metals from stormwater. J. Sustain. Water Built Environ., 3 (2), 2017. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000823>



- 1  
2 HOLMES, R. R. HART, M. L. KEVERN, J. T. Heavy metal removal capacity of individual components of  
3 permeable reactive concrete. *J. Contam. Hydrol.*, 196, pp. 52-61, 2017. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000823>  
4
- 5 JO, Minju; SOTO, Linoshka; AROCHO, Marleisa; JOHN, Juliana St; HWANG, Sangchul. Optimum mix design  
6 of fly ash geopolymer paste and its use in pervious concrete for removal of fecal coliforms and phosphorus in  
7 water. *Construction And Building Materials*, v. 93, p.1097-1104, set. 2015.  
8 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.034>  
9
- 10 KEVERN, J. T. SCHAEFER, V. R. WANG, K. Evaluation of pervious concrete workability using gyratory  
11 compaction. *J. Mater. Civ. Eng.*, 21, pp. 764-770, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:12\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:12(764))  
12
- 13 KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R.. Clogging in permeable concrete: A review.  
14 *Journal Of Environmental Management*, v. 193, p.221-233, maio 2017.  
15 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>  
16
- 17 KIM, Yongjae; HANIF, Asad; USMAN, Muhammad; PARK, Wonjun. Influence of bonded mortar of recycled  
18 concrete aggregates on interfacial characteristics – Porosity assessment based on pore segmentation from  
19 backscattered electron image analysis. *Construction And Building Materials*, v. 212, p.149-163, jul. 2019.  
20 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.265>  
21
- 22 KUMAR, Rakesh. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW)  
23 on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction And Building Materials*, v. 142, p.248-255, jul. 2017.  
24 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.077>  
25
- 26 LAMB, G. S. Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto  
27 permeável. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
28 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.  
29
- 30 LEITE, M.b.; MONTEIRO, P.j.m.. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography.  
31 *Cement And Concrete Research*, v. 81, p.38-48, mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.010>  
32
- 33 LIM, E. TAN, K. H. FWA, T. F. Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for  
34 use in pavement. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 9, 2013.  
35 <https://doi.org/10.11175/easts.10.1565>  
36
- 37 LÓPEZ-CARRASQUILLO, Valerie; HWANG, Sangchul. Comparative assessment of pervious concrete mixtures  
38 containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality  
39 performance and production cost. *Construction And Building Materials*, v. 139, p.148-158, maio  
40 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.052>  
41
- 42 LU, J. X. YAN, X. HE, P. POON, C. S. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled  
43 concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1102 -1112, 2019.  
44 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.260>  
45
- 46 MANZI, Stefania; MAZZOTTI, Claudio; BIGNOZZI, Maria Chiara. Self-compacting concrete with recycled  
47 concrete aggregate: Study of the long-term properties. *Construction And Building Materials*, v. 157, p.582-590,  
48 dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129>  
49
- 50 MAGUESVARI, M. THIRUMALAI, Sundararajan. Influence of fly ash and fine aggregates on the characteristics  
51 of pervious concrete, *International Journal of Applied Engineering Research*, volume 12, 1598-1609, 2017.  
52
- 53 MOHAMMED, Bashar S.; LIEW, Mohd Shahir; ALALOUL, Wesam S.; KHED, Veerendrakumar C.; HOONG,  
54 Cheah Yit; ADAMU, Musa. Properties of nano-silica modified pervious concrete. *Case Studies In Construction*  
55 *Materials*, v. 8, p.409-422, jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.009>  
56
- 57 NEITHALATH, N., OLEK, J., WEISS, J., MAROLF, A., SELL, E., THORNTON, W. Development of quiet and  
58 durable porous portland cement concrete paving materials. Final Report: The Institute for Safe, Quiet, and Durable  
59 Highways. 179 p., Sep. 2003.  
60

- 1  
2 NGUYEN, D. H. BOUTOUIL, M. SEBAIBI, N. BARAUD, F. LELEYTER, L. Durability of pervious concrete  
3 using crushed seashells. *Construction and Building Materials*, 135, 137– 150, 2017.  
4 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.219>  
5  
6 ÖZALP, F., YILMAZ, H. D., KARA, M., KAYA, Ö. & ŞAHİN, A. Effects of recycled aggregates from  
7 construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete  
8 pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17–23, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>  
9  
10 PARK, Seung Bum; LEE, Byung Jae; LEE, Jun; JANG, Young Il. A study on the seawater purification  
11 characteristics of water-permeable concrete using recycled aggregate. *Resources, Conservation And Recycling*, v.  
12 54, n. 10, p.658-665, ago. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.006>  
13  
14 PRANAV, Shreyas; AGGARWAL, Shubham; YANG, En-hua; SARKAR, Ashoke Kumar; SINGH, Ajit Pratap;  
15 LAHOTI, Mukund. Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review.  
16 *Construction And Building Materials*, v. 236, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117609>  
17  
18 RAMKRISHNAN, R; ABILASH, B; TRIVEDI, Mansi; VARSHA, P; VARUN, P; VISHANTH, S. Effect of  
19 Mineral Admixtures on Pervious Concrete. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 11, p.24014-24023, 2018.  
20 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.194>  
21  
22 SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, v. 42,  
23 n. 11, p. 3830–3836, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>  
24  
25 SABOO, Nikhil; SHIVHARE, Shekhar; KORI, Krishna Kumar; CHANDRAPPA, Anush K.. Effect of fly ash and  
26 metakaolin on pervious concrete properties. *Construction And Building Materials*, v. 223, p.322-328, out. 2019.  
27 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185>  
28  
29 SAMAD, S.; SHAH, A.. Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in  
30 production of environmentally sustainable concrete: A critical review. *International Journal Of Sustainable Built*  
31 *Environment*, v. 6, n. 2, p.663-674, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.07.003>  
32  
33 SANDOVAL, Gersson F.b.; GALO BARDES, Isaac; CAMPOS, André; TORALLES, Berenice.m.. Assessing the  
34 phenomenon of clogging of pervious concrete (Pc): Experimental test and model proposition. *Journal Of Building*  
35 *Engineering*, v. 29, maio 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101203>  
36  
37 SILVA, R.v.; BRITO, J. de; DHIR, R.k.. Availability and processing of recycled aggregates within the  
38 construction and demolition supply chain: A review. *Journal Of Cleaner Production*, v. 143, p.598-614, fev. 2017.  
39 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>  
40  
41 SILVA, R.v.; BRITO, J. de; DHIR, R.k.. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition  
42 waste in new construction applications. *Journal Of Cleaner Production*, v. 236, p.117-130, nov. 2019.  
43 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>  
44  
45 SINGH, Navdeep; KUMAR, Pawan; GOYAL, Paresh. Reviewing the behaviour of high volume fly ash based self  
46 compacting concrete. *Journal Of Building Engineering*, v. 26, nov. 2019.  
47 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100882>  
48  
49 SOTO-PÉREZ, Linoshka; HWANG, Sangchul. Mix design and pollution control potential of pervious concrete  
50 with non-compliant waste fly ash. *Journal Of Environmental Management*, v. 176, p.112-118, jul. 2016.  
51 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.014>  
52  
53 SOUCHE, Jean-claude; DEVILLERS, Philippe; SALGUES, Marie; DIAZ, Eric Garcia. Influence of recycled  
54 coarse aggregates on permeability of fresh concrete. *Cement And Concrete Composites*, v. 83, p.394-404, out.  
55 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.002>  
56  
57 WANG, Aiqin; ZHANG, Chengzhi; SUN, Wei. Fly ash effects. *Cement And Concrete Research*, v. 34, n. 11,  
58 p.2057-2060, nov. 2004.  
59  
60 WANG, Ruijun; YU, Ningning; LI, Yang. Methods for improving the microstructure of recycled concrete



1 aggregate: A review. *Construction And Building Materials*, v. 242, maio 2020.  
2 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>  
3  
4 WEISS, P. T. KAYHANIAN, M. GULLIVER, J. S. KHAZANOVICH, L. Permeable pavement in northern North  
5 American urban areas: research review and knowledge gaps. *Int. J. Pavement Eng.* pp. 1-20, 2017.  
6 <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1279482>  
7  
8 XU, Gang; SHI, Xianming. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A  
9 state-of-the-art review. *Resources, Conservation And Recycling*, v. 136, p.95-109, set. 2018.  
10 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010>  
11  
12 YANG, Xiaojie; LIU, Jiasen; LI, Haoxin; REN, Qiang. Performance and ITZ of pervious concrete modified by  
13 vinyl acetate and ethylene copolymer dispersible powder. *Construction And Building Materials*, v. 235, fev. 2020.  
14 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117532>  
15  
16 YAP, Soon Poh; CHEN, Paul Zhao Chiat; GOH, Yingxin; IBRAHIM, Hussein Adebayo; MO, Kim Hung; YUEN,  
17 Choon Wah. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete  
18 aggregates. *Journal Of Cleaner Production*, v. 181, p.155-165, abr. 2018.  
19 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.205>  
20  
21 ZAETANG, Y., SATA, V., WONGSA, A., & CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing  
22 recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15–  
23 21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060>  
24  
25 ZAETANG, Y., WONGSA, A., SATA, V., & CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious  
26 concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585–591, 2013.  
27 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.077>  
28  
29 ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious  
30 concrete. *Construction And Building Materials*, v. 162, p.132-141, fev. 2018.  
31 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.175>  
32  
33 ZHOU, Haonan; LI, Hui; ABDELHADY, Ahmed; LIANG, Xiao; WANG, Hanbing; YANG, Bing. Experimental  
34 investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning.  
35 *Construction And Building Materials*, v. 212, p.130-139, jul. 2019.  
36 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.31>

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi analisar a utilização de agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição e cinza volante em concretos permeáveis destinados a pavimentação. Mediante os resultados obtidos, é possível realizar algumas conclusões:

- Verificou-se que quanto menor a w/b menores os valores das propriedades mecânicas. Tal fato está associado com a dispersão d'água de amassamento necessária para a total hidratação da pasta. Nestes casos, o uso de superplastificantes é recomendado.

- Ocorreu um acréscimo na permeabilidade e na taxa de infiltração dos concretos à medida que o teor de substituição de RCD aumentou. A maior tendência ao entupimento foi encontrada no concreto permeável com 50% de agregado reciclado. Enquanto que o concreto de referência obteve uma menor probabilidade de entupir (46%). Devido à substituição de 10% de cinza volante e 75% de agregado reciclado ocorreu um acréscimo de 6% de tendência ao entupimento comparado ao concreto de referência.

- Observou-se que a relação a/c 0.25 tem uma maior tendência ao desgaste superficial do que a relação a/c 0.30. Verificou-se que quanto maior o teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado maior seja a abrasão superficial sofrida pelo concreto permeável;

- A análise a partir da microscopia eletrônica de varredura evidenciou muitos poros na pasta do concreto permeável. A microtomografia de raios-x proporcionou a compreensão do concreto permeável através da presença de poros interconectados e poros dentro do agregado reciclado, o que explica um alto valor de porosidade (28.54%) para o concreto com 100% de substituição.

- Os concretos permeáveis contendo agregados reciclados conseguiram atingir o mínimo de permeabilidade necessária, conforme solicitado pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Porém, por apresentarem uma baixa resistência à tração na flexão, sua utilização seria possível apenas em áreas destinadas para o tráfego de pedestres. Entretanto, para seu uso em locais de trânsito leve e como placas de concreto

permeável é imprescindível a análise de novos traços e teores de substituição, no intuito de alcançarem a resistência e permeabilidade necessária.

## **6. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como indicação para trabalhos futuros sobre o tema, sugere-se um estudo mais detalhado no que diz respeito: à correlação entre campo/laboratório; manutenção e desempenho a longo prazo; desenvolvimento de procedimentos padrões para realização de projetos estruturais; aplicação em estradas de alto volume e custos do ciclo de vida.

## 7. Referências Bibliográficas

-----, Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 2 de agosto 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10: pervious concrete**. Farmington Hills, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701/C1701M: Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete**. West Conshohocken, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregado para concreto**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. Pesquisa Setorial 2014/2015. Disponível em: [https://abrecon.org.br/pesquisa\\_setorial/](https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/). Acesso em: 14 de Jun. 2019.

ADEWUMI, A. A., OWOLABI, T. O., ALADE, I. O., & OLATUNJI, S. O. Estimation of physical, mechanical and hydrological properties of permeable concrete using computational intelligence approach. *Applied Soft Computing Journal*, 42, 342–350, 2016.

AKAND, L., YANG, M., & GAO, Z. Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. *Construction and Building Materials*, 114, 547–555, 2016.

AKBARNEZHAD, A. ONG, K. C. G. ZHANG, M. H. TAM, C. T. FOO, T.W.J. Microwaveassisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 25 (8), pp. 3469-3479, 2011.

ALIABDO, A. A. ELMOATY, M. A. AHMED M. FAWZY, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 193, 105–127, 2018.

ABRELPE – Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2017.pdf>> Acesso em: 14 de Jun. 2019.

BARNHOUSE, P. W., & SRUBAR, W. V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 110, 89–97, 2016.

BRAKE, N. A., ALLAHADADI, H., & ADAM, F. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 536–543, 2016.

BRUINSMA, J. SMITH, K. PESHKIN, D. BALLOU, L. EISENBERG, B. LURIE, C. et al. Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports (ACRP Project No. 02-64). National Academies Press, Washington, D.C, 2017.

CARON, R., HOELLER S. C. Análise ambiental e especial a partir da extração e beneficiamento do calcário no município de Colombo, 2014.

CHANDRAPPA, A. K., & BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 2016.

CHEN, J. LI, H. HUANG, X. WU, J. Permeability loss of open-graded friction course mixtures due to deformation-related and particle-related clogging: understanding from a laboratory investigation. *J. Mater. Civ. Eng.* (2015).

CHINDAPRASIRT, P., NUAKLONG, P., ZAETANG, Y., SUJUMNONGTOKUL, P., & SATA, V. Mechanical and Thermal Properties of Recycling Lightweight Pervious Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 443–450, 2014.

CHOPRA, M. KAKUTURU, S. BALLOCK, C. SPENCE, J. WANIELISTA, M. Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of permeable concrete pavements. *J. Hydrol. Eng.*, pp. 426-433, Jun, 2010.

CORRÊA, Lásaro Roberto. Sustentabilidade na Construção Civil. Dissertação (Monografia). Escola de Engenharia UFMG - Curso de Especialização em Construção Civil. 2009.

COUGHLIN, J. P. CAMPBELL, C.D. MAYS, D. C. Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system *J. Hydrol. Eng.*, 17, pp. 68-73. (American Society of Civil Engineers), 2012.

CROUCH, L. K. PITT, J. HEWITT, R. Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19, pp. 561-568, 2007.

DAKWALE, V. A.; RALEGAONKAR, R. V. Development of sustainable construction material using construction and demolition waste. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, v. 21, n. 4, p. 451–457, 2014.

DEBOUCHA, W. LEKLOU, N. KHELIDJ, A. OUDJIT, M. N. Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. *Construction and Building Materials*, v. 146, p. 687–701, 2017.

DEO, O. NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Constr. Build. Mater.*, 25, pp. 4181-4189, 2011.

DEO, O. SUMANASOORIYA, M. NEITHALATH, N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling. *J. Mater. Civ. Eng.*, 22, pp. 741-751. (American Society of Civil Engineers), 2010.

DOUGHERTY, M. HEIN, M. MARTINA, B. A. FERGUSON, B. K. Quick surface infiltration test to assess maintenance needs on small permeable concrete sites. *J. Irrigat. Drain. Eng.*, 137, pp. 553-563, 2011.

EL-HASSAN, H. KIANMEHR, P. ZOUAOUI, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. *Construction and Building Materials*, 212, 164–175, 2019.

ETXEBERRIA, M., & GALINDO, A. Estudio de la aplicación del árido reciclado mixto en hormigón poroso y como relleno de zanjas en la ciudad de Barcelona. *Informes de La Construcción*, 68(542), e142, 2016.

FALLAH, S. NEMATZADEH, M. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 132, p. 170-187, 2017.

FULLER, D. *Sustainable Marketing: Managerial-Ecological Issues*, (1999).

GAEDICKE, C., MARINES, A., MATA, L., & MIANKODILA, F. Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete. *Revista Ingeniería de Construcción RIC* 30, 159–167, 2015.

GAEDICKE, C., MARINES, A., & MIANKODILA, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 494–503, 2014.

GAEDICKE, C., MARINES, A., & MIANKODILA, F. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 701–708, 2014.

GAEDICKE, C., TORRES, A., HUYNH, K. C. T., & MARINES, A. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. *Construction and Building Materials*, 125, 271–278, 2016.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 23, n. 1, p. 183–184, 2014.

GARBER, S. RASMUSSEN, R. O. HARRINGTON, D. *Guide to Cement-based Integrated Pavement Solutions*, Technical Report Prepared for the Portland Cement Association, 2011.

GRANZIERA, M. L. M. *Direito Ambiental*. São Paulo: Atlas, 2009, p.37. p. 15–130, 2009.

GÜNEYİSİ, E., GESOĞLU, M., KAREEM, Q., & İPEK, S. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. *Materials and Structures*, 49(1–2), 521–536, 2016.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 562–574, 2014.

HASELBACH, L. BOYER, M. KEVERN, J.T. SCHAEFER, V.R. Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. *J. Transp. Res. Board*, 2240, pp. 107-115, 2011.

HASELBACH, L. M. Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. *J. Hydrol. Eng.*, 15, pp. 67-69. (American Society of Civil Engineers), 2010.

HASELBACH, L. VALAVALA, S. MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement permeable concrete pavement systems. *J. Environ. Manag.*, 81, pp. 42-49, 2006.

HEIN, M. F. DOUGHERTY, M. HOBBS, T. Cleaning methods for permeable concrete pavements. *Int. J. Construct. Educ. Res.*, 9 (2), pp. 102-116, 2013.

HENDERSON, V. TIGHE, S. Evaluation of permeable concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada. *Can. J. Civ. Eng.*, 38, pp. 1404-1413, 2011.

HENDERSON, V. TIGHE, S. Evaluation of permeable concrete pavement performance in cold weather climates. *Int. J. Pavement Eng.*, 13 (3), pp. 197-208, 2012.

HERNANDEZ, J. F. M. SCRIVENER, K. Calcined Clays for Sustainable Concrete. v. 16, p. 323–324, 2018.

HOLMES, R. R. HART, M. L. KEVERN, J. T. Enhancing the ability of pervious concrete to remove heavy metals from stormwater. *J. Sustain. Water Built Environ.*, 3 (2), 2017.

HOLMES, R. R. HART, M. L. KEVERN, J. T. Heavy metal removal capacity of individual components of permeable reactive concrete. *J. Contam. Hydrol.*, 196, pp. 52-61, 2017.

HÖLTZ, F. da C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HUANG, B. WU, H. SHU, X. BURDETTE, E. G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 24, pp. 818-823, 2010.

Imagem do Concreto Permeável. Disponível em < <http://blog.homyquimica.com.br/5-curiosidades-sobre-o-asfalto/>> Acesso em: 14 jun. 2019.

JOHN, V.M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (Livre Docência) – USP, São Paulo, 2000.

KAYHANIAN, M. ANDERSON, D. HARVEY, J.T. JONES, D. MUHUNTHAN, B. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *J. Environ. Eng.*, 95, pp. 114-123, 2011.

KEVERN, J. T. SCHAEFER, V. R. WANG, K. Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction. *J. Mater. Civ. Eng.*, 21, pp. 764-770, 2009.

KIM, G. M. JANG, J. G. KHALID, H. R. LEE, H. K. Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. *Construct. Build. Mater.*, 136, pp. 1-8, 2017.

KIM, Y. J., GADDAFI, A., & YOSHITAKE, I. Permeable concrete mixed with various admixtures. *Materials and Design*, 100, 110–119, 2016.

LAMB, G. S. Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LI, H. HARVEY, J. T. HOLLAND, T. J. KAYHANIAN, M. Corrigendum: the use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environ. Res. Lett.*, 8, pp. 1-14, 2013.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, n. 1–2, p. 36–44, 2008.

LIAN, C. ZHUGE, Y. BEECHAM, S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 4294–4298, 2011.

LIANG, J., XIKAI, D., LIU, P., & SHI, J. The Effect of Different Chemical Admixtures on Permeability Properties of Concrete. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 59, 355–360, 2017.

LIM, E. TAN, K. H. FWA, T. F. Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for use in pavement. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 9, 2013.

LIN, W., PARK, D. G., RYU, S. W., LEE, B. T., & CHO, Y. H. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction and Building Materials*, 118, 20–26, 2016.

LOPES, J. P., RUDNICK, T., MARTINS, C. H. Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 14, n.2, p. 216-228, 2018.

LU, J. X. YAN, X. HE, P. POON, C. S. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1102 -1112, 2019.

MAGUESVARI, M. U., & NARASIMHA, V. L. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 198–207, 2013.

MARQUES NETO, J. da COSTA. *Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição no Brasil*. São Carlos: Rima, 2005. 162p.



McCAIN, G. N. SUOZZO, M. J. DEWOOLKAR, M. M. A Laboratory Study on the Effects of Winter Surface Applications on the Hydraulic Conductivity of Porous Concrete Pavements”. Transportation Research Board 2010 Annual Meeting CD-ROM, 2010.

Meneghetti, R. M. (2017). Aplicação de resíduos de construção e demolição na construção civil: uma revisão bibliográfica sistemática. 31f. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais- 2ª Edição. Ed.: IBRACON. Português, p. 751, 2014.

Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, 17 de julho de 2002.

MITCHELL, M. R., LINK, R. E., LI, J., & LIU, Z. Microanalysis of Recycled Coarse Aggregate and Properties of No-Fines Pervious Recycled Concrete. Journal of Testing and Evaluation, 39(5), 103417, 2011.

MORAND, Fernanda Guerra. Estudo das Principais Aplicações de Resíduos de Obra como Materiais de Construção. 2016. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

National Ready Mix Concrete Association (NRMCA), 2004.

NEITHALATH, N. SUMANASOORIYA, M. S. DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. Materials Characterization. 61, pp. 802-813, 2010.

NEITHALATH, N., OLEK, J., WEISS, J., MAROLF, A., SELL, E., THORNTON, W. Development of quiet and durable porous portland cement concrete paving materials. Final Report: The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways. 179 p., Sep. 2003.

NGOHPOK C, SATA V, SATIENNAM T, KLUNGBOONKRONG P, CHINDAPRASIRT P. Mechanical Properties, Thermal Conductivity, and Sound Absorption of Pervious Concrete Containing Recycled Concrete and Bottom Ash Aggregates. Journal of Civil Engineering, 1-8, 2017.

NGUYEN, D. H. BOUTOUIL, M. SEBAIBI, N. BARAUD, F. LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. Construction and Building Materials, 135, 137–150, 2017.

NGUYEN, D. H. SEBAIBI, N. BOUTOUIL, M. LELEYTER, L. BAURD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. Constr. Build. Mater., 73, pp. 271-282, 2014.

OYEDELE, L. O.; AJAYI, S. O.; KADIRI, K. O. Use of recycled products in UK construction industry: an empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement. Resour. Conserv. Recycl. (2014).

ÖZALP, F., YILMAZ, H. D., KARA, M., KAYA, Ö. & ŞAHIN, A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. Construction and Building Materials, 110, 17–23, 2016.

PAL, A. Developing Low-Clinker Ternary Blends for Indian Cement Industry. *J. Inst. Eng. Ser. A* 99, 433–447, 2018.

PIERALISI, R. CAVALARO, S. H. P. AGUDO, A. Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. *Cement and Concrete Research*, 102, 149–160, 2017.

PINTO, T. P. Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP. 1999.

POON, C. CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong *Resour. Conserv. Recycl.* 50 (3) (2007), pp. 293-305.

PROBERT, A.J., MILLER, ANDREW, IP, KENNETH, BECKETT, K.P. AND SCHOFIELD, R. (2010). Accounting for the life-cycle carbon emissions of new dwellings in the U.K. In: 12th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, 21-23 September 2010, Cairo, Egypt.

Resíduos de Construção e Demolição da Comissão Europeia (CDW). [http://ec.europa.eu/environment/waste/construction\\_demolition.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm). Acesso em 06 de Jun. de 2019.

RAHMAN, S., NORTHMORE, A. B., HENDERSON, V., & TIGHE, S. L. Developing A Framework for Low-Volume Road Implementation of Pervious Concrete Pavements. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 4(1), 77–92, 2015.

RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I. HUERTAS FERNÁNDEZ, F. MORENO, B. MARTÍNEZ, G. GRINDLAY, A. L. A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: a case study in the south of Spain. *J. Environ. Manag.*, 205, pp. 151-162, 2018.

SANDOVAL, G. F. B. GALOBARDES, I. S. TEIXEIRA, R. S. TORALLES, B. M. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 317–328, 2017.

SANTOS, E. A.; BORJA, E. V. Investigação experimental de traços para blocos de concreto para alvenaria de vedação com adição de resíduos de pneus reciclados. Artigo científico, 2005.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, v. 42, n. 11, p. 3830–3836, 2007.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 201–217, 2014.

SRIRAVINDRARAJAH, R. DO, H. M. NGUYEN, L. D. AOKI, Y. Effect of clogging on the water permeability of permeable concrete. Lam Venkatesan, Setunge (Eds.), *Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials-fragomeni*, pp. 873-876, 2011.

SRIRAVINDRARAJAH, R., WANG, N. D. H., & ERVIN, L. J. W. Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(4), 239–246, 2012.

STONER, J. WANKEL, C. Global Sustainability Initiatives: New Models and New Approaches. Information Age Publishing, USA, 2008.

TAJI, I. GHORBANI, S. BRITO, de JORGE, TAM, V. W. Y. SHARI, S. DAVOODI, A. TAVAKKOLIZADEH, M. Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite wastedust. *Journal of Cleaner Production*, 210, 837–846, 2019.

TENNIS, P. D. LEMING, M. L. AKERS, D. J. Pervious Concrete Pavement. Portland Cement Association, 32p., 2004.

TORRES, A., HU, J., & RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 95, 850–859, 2015.

VIECILI, F. A. Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto. 2004. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado Profissionalizante, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VITORINO, C. da S. Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos. 2011. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WBCSD; IEA. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. Cement Sustainability Initiative, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), p. 36, 2009.

WEISS, P. T. KAYHANIAN, M. GULLIVER, J. S. KHAZANOVICH, L. Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. *Int. J. Pavement Eng.* pp. 1-20, 2017.

WINSTON, R. J. AL-RUBAEI, A. M. BLECKEN, G.T. VIKLANDER, M. HUNT, W. F. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate—The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. *J. Environ. Manag.*, 169, pp. 132-144, 2016.

YAHIA, A. KABAGIRE, D. New approach to proportion pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 62, pp. 38-46, 2014.

YAP, S. P. CHEN, P. Z. C. GOH, Y. IBRAHIM, H. A. MO, K. H. YUEN, C. W. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 181, 155 -165, 2018.

ZAETANG, Y., SATA, V., WONGSA, A., & CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15–21, 2016.

ZAETANG, Y., WONGSA, A., SATA, V., & CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585–591, 2013.

ZHANG, J. SHI, C. LI, Y. PAN, X. POON, C. S. XIE, Z. **Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation** *J. Mater. Civ. Eng.*, 27 (11), 2015.

ZHANG, Z., ZHANG, Y., YAN, C., & LIU, Y. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 112–118, 2017.

## ANEXO A - SUBMISSÃO DO ARTIGO

---

### Thank you for your submission to Journal of Cleaner Production

1 mensagem

---

JCLP <eesserver@eesmail.elsevier.com>

18 de março de 2020 15:44

Responder a: JCLP <jclp@elsevier.com>

Para: gabrieli.vieira@acad.pucrs.br, gabilazzarivieira@gmail.com

\*\*\* Automated email sent by the system \*\*\*

Dear Miss Vieira,

Thank you for sending your manuscript INFLUENCE OF RECYCLED AGGREGATE REPLACEMENT AND FLY ASH CONTENT IN PERFORMANCE OF PERVIOUS CONCRETE MIXTURES for consideration to Journal of Cleaner Production. Please accept this message as confirmation of your submission.

When should I expect to receive the Editor's decision?

For Journal of Cleaner Production, the average editorial time (in weeks) from submission to first decision is: 9.73 and from submission to final decision is: 20.35.

What happens next?

Here are the steps that you can expect as your manuscript progresses through the editorial process in the Elsevier Editorial System (EES).

1. First, your manuscript will be assigned to an Editor and you will be sent a unique reference number that you can use to track it throughout the process. During this stage, the status in EES will be "With Editor".

2. If your manuscript matches the scope and satisfies the criteria of Journal of Cleaner Production, the Editor will identify and contact reviewers who are acknowledged experts in the field. Since peer-review is a voluntary service, it can take some time but please be assured that the Editor will regularly remind reviewers if they do not reply in a timely manner. During this stage, the status will appear as "Under Review".

Once the Editor has received the minimum number of expert reviews, the status will change to "Required Reviews Complete".

3. It is also possible that the Editor may decide that your manuscript does not meet the journal criteria or scope and that it should not be considered further. In this case, the Editor will immediately notify you that the manuscript has been rejected and may recommend a more suitable journal.

For a more detailed description of the editorial process, please see Paper Lifecycle from Submission to Publication: [http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a\\_id/160/p/8045/](http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/160/p/8045/)



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [prograd@pucrs.br](mailto:prograd@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)