

INSTITUTO FEDERAL

Goiano

Campus Rio Verde

ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO
DA LAPIDAÇÃO DO GRANILITE EM CONCRETO
PERMEÁVEL**

IGOR SOARES DOS SANTOS

Rio Verde, GO

2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA
LAPIDAÇÃO DO GRANILITE EM CONCRETO PERMEÁVEL**

IGOR SOARES DOS SANTOS

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime

Rio Verde - GO

Fevereiro, 2020

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

SS237a Santos, Igor Soares dos
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO
DA LAPIDAÇÃO DO GRANILITE EM CONCRETO PERMEÁVEL /
Igor Soares dos Santos; orientador Bacus de Oliveira
Nahime. -- Rio Verde, 2020.
44 p.

Monografia (em Engenharia Civil) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1. Durabilidade. 2. Resíduo de Construção. 3.
Pavimento Permeável. I. Nahime, Bacus de Oliveira,
orient. II. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia - Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: *Igor Soares dos Santos*

Matrícula: *2015102200549*

Título do Trabalho: *Análise da viabilidade de utilização do resíduo da produção do granito em concreto permeável*

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: *12/02/2020*

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, GO, 12/02/2020
Local Data

Igor Soares dos Santos
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

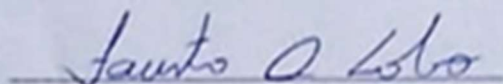
Ciente e de acordo:

[Assinatura]
Assinatura do(a) orientador(a)

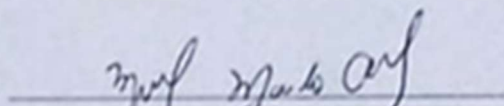
IGOR SOARES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA
LAPIDAÇÃO DO GRANILITE EM CONCRETO PERMEÁVEL**

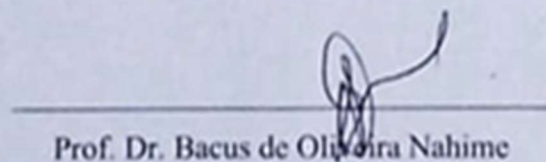
Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 11 de fevereiro de 2020, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Me. Fausto Arantes Lobo
Universidade de Rio Verde – UniRV



Prof. Dr. Michell Macedo Alves
Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde



Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime
Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde

Rio Verde, GO
Fevereiro, 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, capacitação e forças que me foi dada para buscar meus objetivos e alcançar meus sonhos.

Aos meus pais por todo o amparo e confiança que me deram ao longo de toda minha caminhada, fornecendo suporte e incentivo para sempre perseverar sobre todas as adversidades encontradas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime por me auxiliar e guiar pelo durante todos esses anos de pesquisa, cooperando com a escolha do tema e fornecendo também a referência para o desenvolvimento técnico desse estudo. Agradeço ainda à todo apoio, conselhos e ensinamentos passados que me proporcionaram um crescimento acadêmico e profissional.

A todos os meus amigos que me receberam e apoiaram com grande atenção e boa vontade, com conselhos, ajuda e informações que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho e minha vida acadêmica.

Aos demais professores que passaram pela minha vida acadêmica e contribuíram investindo tempo e esforço em melhor transmitir seus conhecimentos.

A ADITIBRAS pelo fornecimento do aditivo utilizado.

A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento desse estudo.

RESUMO

SANTOS, Igor Soares. **Análise da Viabilidade de Utilização do Resíduo da Lapidação Do Granilite em Concreto Permeável**. 2020. 44 p Monografia (Curso de Bacharelado de Engenharia Civil). Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2020.

Com o aumento da ocorrência das enchentes e inundações nas áreas urbanas, a adoção de pavimentos permeáveis tem se tornado cada vez mais vantajosa. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da adição de resíduo de lapidação de granilite (RLG) no comportamento mecânico e microestrutural do concreto permeável. Três misturas diferentes foram avaliadas: uma amostra referência (T.R) determinada com base na revisão da literatura e dosada com apenas agregados naturais, e outras duas dosadas com a mesma proporção de pasta e agregado graúdo do T.R, no entanto, apenas 2% (T.2RLG) e 4% (T.4RLG) do resíduo foram adicionados. Os resultados indicaram para as amostras T.2RLG e T.4RLG, respectivamente, um aumento de resistência à compressão de 131,4% e 103,6% e a tração por flexão de 104,0% e 160,7% em relação ao traço referência. Foi observado para as amostras T.2RLG e T.4RLG, respectivamente, uma queda da permeabilidade de 51,8% e 20,0% e redução do índice de vazios para 26,56% e 14,8%. Portanto, devido ao acréscimo significativo das resistências mecânicas e cumprimento da exigência mínima de 1 mm/s de permeabilidade as amostras analisadas podem ter sua aplicação recomendadas, em especial a T.4RLG por permitir maior reaproveitamento do resíduo.

Palavras-chave: Durabilidade; Resíduo de Construção; Pavimento Permeável.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais.....	18
Quadro 2 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da caracterização do cimento.....	25
Tabela 2 – Dados da caracterização do agregado graúdo.....	26
Tabela 3 – Traço unitário, proporção em massa, das amostras analisadas.....	27
Tabela 4 – Quantidade de amostras moldadas.....	28
Tabela 5 – Composição química e perda ao fogo do RLG.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escoamento superficial observado em diversas superfícies ensaiadas.	14
Figura 2 – Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total.....	19
Figura 3 – Exemplo de sistema de pavimento permeável com drenos.....	19
Figura 4 – Tipos de poros do concreto permeável.	22
Figura 5 – Procedimento experimental adotado.	24
Figura 6 – Análise táctil e visual do concreto.	27
Figura 7 – Aparato de mediação de permeabilidade em concretos permeáveis.....	29
Figura 8 – MEV do RLG com aproximação de: (a) 20 μm ; (b) 10 μm ; (c) 2 μm e (d) 1 μm ..	30
Figura 9 - Resultados de massa específica.	31
Figura 10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	32
Figura 11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.....	33
Figura 12 – Resultados de (a) permeabilidade e (b) índice de vazios	33
Figura 13 – Imagens por MEV da pasta dos traços: (a) T.R; (b) T.4RLG	34
Figura 14 – Processo de construção da praça: (a) aplicação do concreto poroso;.....	35
Figura 15 – Vistas da praça: (a) antes do início da construção; (b) após conclusão das obras	35
Figura 16 – Resultados de permeabilidade em campo.	36

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

a/c	Relação gua – cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACI	American concrete institute
ARI	Alta resistência inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BH-Tec	Parque Tecnológico de Belo Horizonte
CP	Cimento portland
CP	Corpos-de-prova
CPA	Camada porosa de atrito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	Federal highway administration
FRX	Fluorescência de Raios X
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
NPCA	National Pervious Concrete Association
PF	Perda ao fogo
P_w	Massa especifica da gua
RCD	Resíduos de construção e demolição
RLG	Resíduo da lapidação do granilite
SBS	Estileno-butadieno-estileno
USGBC	United States Green Building Council
V	ndice de vazios
Vol	Volume da amostra
W_1	Peso seco
W_2	Peso submerso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	Urbanização e Impermeabilização do Solo	14
2.2	Pavimentos Permeáveis	15
2.2.1	Evolução Histórica	16
2.2.2	Tipologia dos revestimentos	17
2.2.3	Sistema de infiltração	17
2.2.4	Requisitos.....	20
2.3	Concreto permeável.....	21
2.3.1	Definição e composição	21
2.3.2	Principais propriedades	21
2.3.3	Fatores que afetam suas propriedades.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Caracterização dos materiais	25
3.2	Dosagens das Amostras.....	26
3.3	Preparo e moldagem dos Corpos de prova	28
3.4	Caracterização do concreto permeável	28
4	RESULTADOS.....	30
5	CONCLUSÕES	37
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da sociedade moderna é se desenvolver sem agredir o meio ambiente. Contudo, a ONU estima que a população mundial passou de 2 bilhões em 1930 para 6,908 bilhões o que combinado com o êxodo rural, intensificou o processo de urbanização e sua consequente a impermeabilização do solo e aumento no número de enchentes e inundações. Pode-se citar também como consequência do desenvolvimento humano a grande geração de resíduos de construção e demolição (RCD), uma vez que o volume gerado tem promovido sérios problemas ambientais. Neste contexto, o emprego do concreto permeável em pisos externos poderia solucionar parcialmente estes problemas, através do reaproveitamento de RCDs em sua composição e a infiltração da água pluvial.

A matéria prima da construção civil é majoritariamente composta por recursos naturais não renováveis, estimando-se que 20% a 50% dos recursos extraídos sejam destinados a este setor. Conforme o relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), são geradas aproximadamente 123 mil toneladas de entulho por dia, o que torna a indústria da construção civil responsável por cerca de dois terços do total de resíduos sólidos não industriais produzidos, e apenas 20% a 30% do total dos resíduos são recuperados no processo de reciclagem.

A reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) é um avanço para sustentabilidade, uma vez que este processo permite o reaproveitamento dos resíduos gerados, um menor consumo de matérias-primas e insumos energéticos, uma redução de áreas necessárias para aterros sanitários e um aumento da vida útil dos que estão em operação. Assim, empresas e pesquisadores têm investido em pesquisas de reaproveitamento de materiais descartados (BRAVO et al., 2018; KIM et al., 2017; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016).

Durante o processo construtivo de edificações ao realizar o polimento dos pisos de granilite é gerado o resíduo da lapidação do granilite (RLG), que geralmente é descartado em aterros inadequados. Este material apresenta um potencial de aplicação em concretos, uma vez que possui uma alta finura, podendo atuar como filer em matrizes cimentícias. Contudo, o RLG necessita ainda de estudos quanto a sua composição química e necessita de informações sobre a sua influência nas propriedades mecânicas e microestruturais do concreto.

A drenagem urbana geralmente é composta por medidas estruturais, ou seja, a instalação de tubos de concreto formando bacias subterrâneas com o objetivo de drenar a água o mais rápido possível para jusante. Contudo, este sistema apresenta algumas falhas, como: a

deterioração da qualidade das águas devido a transporte de sedimentos e resíduos, alto custo de implantação e a incapacidade de atender situações emergenciais. Como alternativa ao sistema tradicional de drenagem urbana é possível mencionar os pavimentos permeáveis.

Os pavimentos permeáveis são classificados como medidas não estruturais e apresentam como vantagens: o custo de produção inferior aos demais sistemas de drenagem convencionais, redução do escoamento superficial, minimiza o número de ocorrências de enchentes e inundações, reduz as vazões de pico de corpos d'água e promove o reabastecimento das águas subterrâneas ou reaproveitamento da água da chuva (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000). O pavimento permeável pode ser classificado basicamente em três tipos: pavimento de concreto permeável; pavimento de asfalto permeável; pavimento de blocos vazados preenchidos com material granular.

A construção de edifícios ecológicos está cada vez mais popular e o concreto permeável é um método mencionado U.S. Green Building Council (USGBC) para gestão de águas pluviais no sistema de classificação LEED (Liderança em Energia e Design Ambiental), sendo que esta organização é uma das principais responsáveis pela certificação de construções sustentáveis (CHEN et al., 2019). No entanto, o concreto permeável apresenta resistência inferior ao concreto convencional e necessita de manutenções periódicas.

Para melhorar a durabilidade e propriedades mecânicas do concreto permeável, alguns autores, como Aliabdo; Abd Elmoaty e Fawzy (2018) e Xie; Akin e Shi (2019), têm indicado que o uso de materiais pozolânicos ou materiais com alta finura em matrizes cimentícias para aumento de resistências mecânicas. O melhor desempenho de amostras contendo esses materiais pode ser atribuído à nucleação dos produtos de hidratação ou ao efeito filer, em que há o preenchimento dos vazios da matriz cimentícia. Tais processos contribuem para que a pasta presente no concreto permeável se torne mais densa e resistente, favorecendo o travamento do esqueleto granular formado, apresentando assim maior resistência à compressão e tração (CASTRO et al., 2009).

O concreto permeável possui um alto índice de vazios interligados e a dosagem sem a adição de agregados miúdos ou em volume reduzido, possibilitando a passagem desobstruída de grandes quantidades de água. Portanto, ao observar as vantagens do emprego de pavimentos permeáveis em centros urbanos e a reutilização e imobilização de resíduos, este estudo visa avaliar a viabilidade de aplicação do RLG no concreto permeável, verificando sua influência nas propriedades mecânicas, microestrutural e na permeabilidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Urbanização e Impermeabilização do Solo

O processo de urbanização intensificou-se após a revolução industrial no século XVIII, através da necessidade de mão de obra nas indústrias, alto crescimento populacional e a redução o número de trabalhadores no campo. No Brasil o desenvolvimento urbano acentuado ocorreu no século XX, influenciado pela grande migração da população rural devido as oportunidades de emprego oferecidas pelas indústrias em desenvolvimento.

Conforme Araújo et al. (2017), o processo de urbanização tem promovido altas taxas de impermeabilização do solo, modificando os processos de escoamento natural da bacia hidrográfica, como por exemplo: o aumento do escoamento superficial das águas pluviais e das vazões de pico dos corpos d'água, redução da capacidade de infiltração, rebaixamento do lençol freático, carreamento de sedimentos e degradação da qualidade das águas. A Figura 1 apresenta o escoamento superficial em diversas superfícies observadas por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).

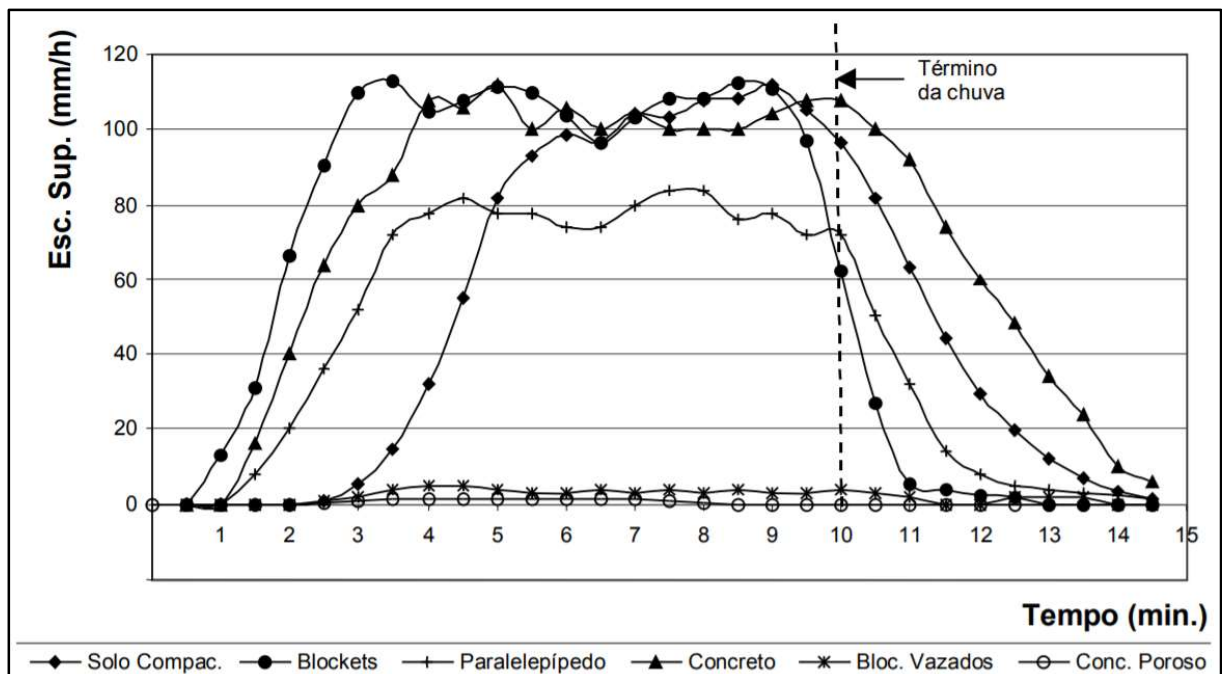


Figura 1 – Escoamento superficial observado em diversas superfícies ensaiadas.
Fonte: Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).

Neste contexto, o escoamento pluvial pode produzir enchentes e alguns impactos em áreas urbanas através de dois processos, sendo as inundações em áreas ribeirinhas e inundações

em razão da urbanização (TUCCI, 2008). Estes fenômenos podem ocorrer isoladamente ou combinadas, porém as inundações em áreas ribeirinhas são consideradas um evento natural que ocorre no leito maior do rio devido a uma alta precipitação pluviométrica em um curto período. As inundações em razão da urbanização, por sua vez não são naturais e aumentam sua magnitude e frequência com a impermeabilização do solo, e são caracterizadas pelo aumento do pico de vazão e escoamento superficial, baixa taxa de infiltração, assoreamento do curso d'água com o maior transporte dos sedimentos e a redução da qualidade da água subterrânea e superficial pelo carreamento de resíduos sólidos (BENINI; MENDIONDO, 2015).

A gestão de águas pluviais e drenagem urbana tem um importante papel nas cidades, uma vez que sua ausência ou mal gerenciamento pode ocasionar enchentes e inundações, colocando a vida dos cidadãos em risco. No Brasil, a drenagem urbana tem se concentrado, na maioria das vezes, em medidas estruturais com o objetivo de drenar as águas pluviais o mais rápido possível para a jusante (TAVARES, 2016). Esse sistema é composto tradicionalmente por tubos de concreto e bacias subterrâneas, desta forma esta metodologia necessita de um alto investimento e tempo para a implantação, não possui flexibilidade suficiente para se adaptar às circunstâncias críticas e não atende aos critérios de sustentabilidade conforme a expansão urbana e as variações climáticas (ZHOU, 2014).

Como alternativa para conter os efeitos dos picos de vazão, reduzir os custos de construção dos sistemas de drenagem pelo método tradicional e minimizar impactos ambientais a jusante promovida pela impermeabilização do solo podem ser aplicadas algumas medidas não estruturais que possibilitem uma maior infiltração da precipitação no solo, como é o caso dos pavimentos permeáveis. Apesar dessas vantagens mencionadas os pavimentos permeáveis apresentam em geral uma resistência inferior e a necessidade de manutenção periódica.

2.2 Pavimentos Permeáveis

Os pavimentos permeáveis são uma categoria de pavimento sustentável que permite a infiltração de um grande volume de água pluvial em um curto período. Devido a sua elevada taxa de infiltração os pavimentos permeáveis são uma solução sustentável e vantajosa no controle de enchentes e inundações, uma vez que reduzem significativamente o escoamento superficial, possibilitam o reabastecimento do lençol freático ou reaproveitamento da água pluvial e minimizam os efeitos das ilhas de calor (ARAÚJO; TUCCI E GOLDENFUM, 2000). Assim, foram desenvolvidos diversos tipos de pavimentos e ainda há estudos que buscam o seu aprimoramento nas propriedades mecânicas e durabilidade, tal como na redução do seu custo de implementação.

2.2.1 Evolução Histórica

O emprego de pavimentos permeáveis não é uma prática recente, uma vez que pavimentação realizada pelos romanos através de misturas de argila, cinzas vulcânicas, cacos cerâmicos e pasta aglomerante de cal não era considerado um pavimento impermeável. Conforme a ACI 522R (ACI, 2010), há registro de aplicações de concreto permeável em 1852 na construção de duas casas no Reino Unido, o qual era constituído de apenas agregado graúdo e cimento.

O uso de pavimentos permeáveis foi bastante difundido na Europa e Austrália durante o século XX, porém nas américas seu uso foi limitado até meados dos anos 70. Em 1974, a Federal Highway Administration (FHWA) realizou uma das primeiras pesquisas sobre misturas asfálticas abertas, contudo, devido à baixa durabilidade das amostras seu uso em larga escala ocorreu somente após 1980, onde neste período foram verificados sua permeabilidade e o potencial de redução do escoamento superficial.

Nos Estados Unidos, os pavimentos permeáveis se tornaram mais comuns através do processo intensificado de urbanização e industrialização com a finalidade de incrementar a permeabilidade e reduzir o escoamento superficial (MULLIGAN, 2005). A alta eficiência dos sistemas de drenagem constituídos de concreto permeável promoveu a disseminação desta tecnologia por meio de pequenos fornecedores e na criação da NPCA (National Pervious Concrete Association). O interesse por este material foi tão alto após a sua aplicação, que o American Concrete Institute (ACI) estabeleceu uma competição para os estudantes de graduação afim de produzirem concretos permeáveis simples ou com adição de fibras, buscando disseminar a tecnologia (HÖLTZ, 2011).

O emprego dos pavimentos permeáveis no Brasil, em especial do concreto permeável, ainda não está completamente desenvolvido, contudo alguns projetos pilotos têm testado aplicação em território nacional e a influência do ambiente neste tipo de concreto. Em 2006, em Belo Horizonte foram iniciadas as construções do Parque ecológico de Belo Horizonte (BH-Tec), com o intuito de ser ecologicamente correto e teve caráter inédito na América Latina, sendo que para a pavimentação foi empregado o concreto permeável, a fim de reduzir os riscos de inundações e reabastecer as nascentes do parque.

Tanto para o âmbito nacional, quanto no internacional há diversas pesquisas sobre pavimentos permeáveis, principalmente acerca do concreto asfáltico, contudo existe uma quantidade limitada de dados em relação ao concreto permeável com as possíveis adições. Desta

forma, este estudo busca colaborar com dados deste material com a adição do resíduo da lapidação do granilite.

Devido à disponibilidade de matéria prima e condições ambientais, foram desenvolvidos diversos tipos de pavimentos, podendo eles serem caracterizados quanto ao material que é utilizado com revestimento ou como o sistema de infiltração adotado. Para estabelecer um padrão de qualidade mínima diversas normas, como a NBR 16416 (ABNT, 2015) e ACI 522R (ACI, 2010), têm estabelecido requisitos mínimos de algumas propriedades de resistência e permeabilidade.

2.2.2 Tipologia dos revestimentos

Os pavimentos permeáveis de concreto, conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015), possuem três tipologias quanto ao revestimento, sendo denominadas por: revestimento de pavimento intertravado permeável, revestimento de pavimento de placas de concreto permeável e revestimento de pavimento de concreto permeável. De acordo com tal norma, o revestimento de pavimento intertravado permeável pode ser subdividido segundo a sua disposição construtiva, formato da peça e material, assim são três subcategorias: peças de concreto com juntas alargadas, peças de concreto com áreas vazadas e peças de concreto permeável.

Dentre os três tipos de pavimentos mencionados, somente o revestimento de pavimento de concreto permeável é moldado *in loco*. Desta forma, não há um grande custo com o transporte de peças, uma vez que pode ser executado com os materiais no local da obra. Outra vantagem para esse tipo de pavimento é a capacidade de ser produzido sem a necessidade de tecnologias avançadas e mão de obras especializada, sendo necessário apenas um treinamento básico adequado.

Ainda é possível citar como pavimento permeável, segundo DNER-ES 386 (1999), o asfalto poroso como camada porosa de atrito (CPA), o qual pode ser definido como uma mistura executada em usina, com características definidas nesta norma, constituída de agregado, material de enchimento (filer) e cimento asfáltico de petróleo modificado ou não por polímero do tipo SBS (estileno-butadieno-estileno), espalhada e comprimida a quente.

2.2.3 Sistema de infiltração

Ao verificar os sistemas de drenagem dos pavimentos permeáveis é possível observar três diferentes tipos de sistemas de infiltração de água precipitada: infiltração total, infiltração parcial ou sem sistema de infiltração. A metodologia a ser adota depende das condições

ambientais, da capacidade de percolação das camadas subjacentes e da presença de contaminantes, devendo ser adotado conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais.

Condições locais		Infiltração Total	Infiltração Parcial	Sem Infiltração
Permeabilidade do subleito definida pelo coeficiente de permeabilidade k (m/s)	$> 10^{-3}$	✓	✓	✓
	10^{-3} a 10^{-5}	X	✓	✓
	10^{-5} a 10^{-7}	X	X	✓
Máximo registro do lençol freático a pelo Máximo registro do lençol freático a pelo menos 1,0 m da camada inferior da base		X	X	✓
Presença de contaminantes no subleito		X	X	✓

Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

Todos os sistemas de drenagem adotados devem prever uma camada de base com a função de reservatório de água do pavimento permeável e não exclui a necessidade do dimensionamento mecânico conforme o tipo de pavimento escolhido, devendo ser adotado o maior valor da altura encontrado pelos métodos de dimensionamento mecânico e hidráulico.

No sistema de infiltração total, toda a água precipitada alcança o subleito e se infiltra. Este tipo de pavimento normalmente é composto por uma camada de revestimento permeável (peças, placas ou concreto permeável), uma base permeável (brita graduada) e o subleito, conforme a Figura 2. Em alguns casos é utilizada também uma camada de assentamento entre a base e o revestimento, quando os pisos são constituídos de revestimento de peças e placas.

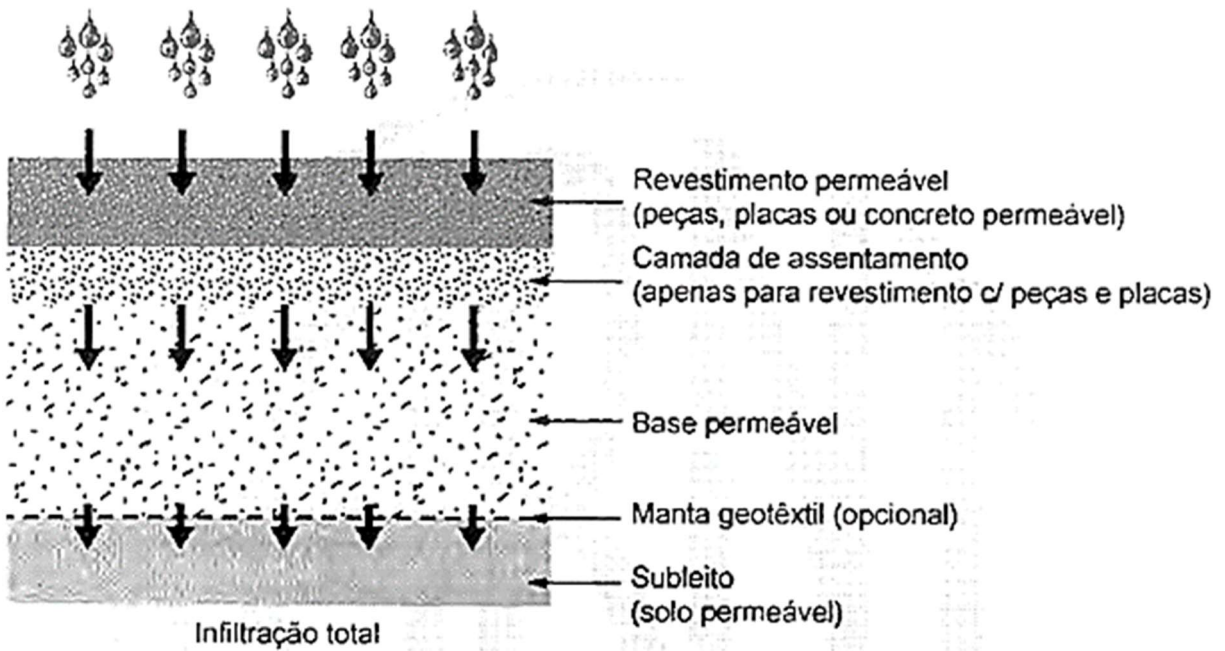


Figura 2 – Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total
 Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

Para os sistemas de drenagem, com infiltração parcial ou sem sistema de infiltração, é necessário o uso drenos (Figura 3), uma vez que o subleito não possui permeabilidade suficiente ou há uma presença de contaminantes com risco de ir para o subleito. Como vantagens para os drenos pode-se citar o reaproveitamento da água pluvial, sendo que a camada de revestimento e base efetua filtração, purificando a água.

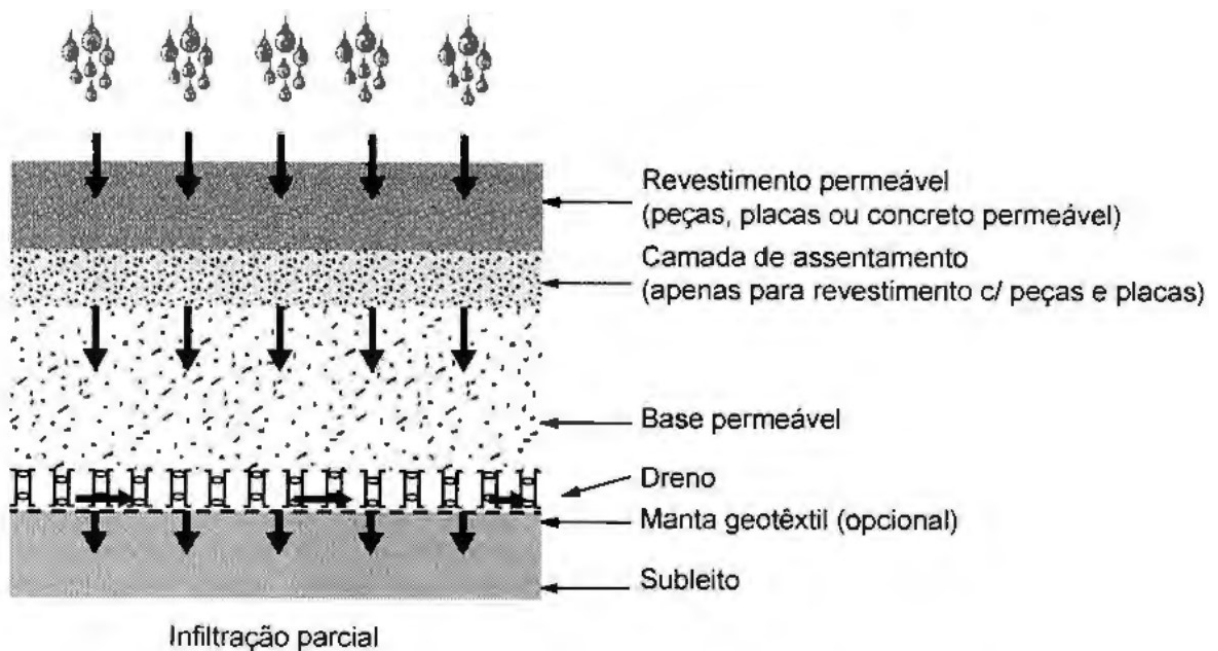


Figura 3 – Exemplo de sistema de pavimento permeável com drenos
 Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

2.2.4 Requisitos

Ao se projetar um pavimento permeável deve-se considerar algumas variáveis, como o local de execução da obra, tipo de uso, quais os materiais serão empregados e quais suas características e quais as solicitações mecânicas e hidráulicas que o pavimento deve atender.

Conforme regulamenta a NBR 16416 (ABNT, 2015) o coeficiente de permeabilidade é recomendado um valor maior que 10^{-3} m/s e de 14^{-3} m/s, de acordo com a ACI 522R (ACI, 2010) para pavimentos recém construídos, sendo que o método de ensaio adotado em campo para pavimentos permeáveis de concreto pode ser conforme o método ASTM C1701 (ASTM, 2017) ou pelo Anexo A da NBR 16416 (ABNT, 2015). Para ensaios em laboratório, além da utilização destas metodologias, pode-se também fazer uso da NBR 13292 (ABNT, 1995) para o caso de ensaio com carga constante ou da NBR 14545 (ABNT, 2000) e pela ACI 522R (ACI, 2010), para carga variável.

As resistências mecânicas e espessuras mínimas exigidas pela NBR 16416 (ABNT, 2015) podem ser observadas no Quadro 2. O concreto permeável moldado no local pode ter sua resistência à tração na flexão ensaiada conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010) e serem moldados em corpos de prova de 10 cm x 10 cm x 40 cm.

Quadro 2 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura a mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0$	NBR 9781 (ABNT, 2013)
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0$	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0$	NBR 15805 (ABNT, 2015)
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0$	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0$	

Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

A massa específica aconselhável para as misturas de concreto permeável moldado do local é que seja superior a 1600 kg/m^3 , sendo tolerável uma variação da aplicação em campo de 80 kg/m^3 .

2.3 Concreto permeável

O emprego do concreto permeável já ocorre desde o século XIX, contudo seu uso como pavimento permeável é recente, assim ainda não há uma metodologia consagrada para o cálculo do seu traço. Desta forma, pesquisadores têm procurado entender melhor suas propriedades com e sem adição de materiais não convencionais, como sílica, cinza da casca de arroz, RCD, dentre outros (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; WU et al., 2016b; ZAETANG et al., 2015).

2.3.1 Definição e composição

O termo concreto permeável é comumente utilizado para o material que tipicamente apresenta slump igual a zero, granulometria aberta e é constituído de cimento portland, agregado graúdo, água e uma quantidade reduzida ou nula de agregado miúdo (ACI, 2010; BATEZINI, 2013). A redução ou eliminação dos finos permite um empacotamento das partículas inferior ao concreto convencional, gerando maior índice de vazios, permeabilidade e a alteração de algumas outras propriedades (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A realização do cálculo de dosagem do concreto permeável, para a definição das proporções dos materiais é mais restrita em comparação ao concreto convencional, devido à necessidade de se atender às necessidades mecânicas, hidráulicas e de durabilidade simultâneas (CASTRO et al., 2009). Outra dificuldade na dosagem do concreto permeável é a necessidade de uma análise visual rigorosa, observando se o material apresenta aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, livres de rebarbas, defeitos, delaminação ou descamação do concreto e se espessura está com medida nominal mínima igual ou maior ao especificado.

Em alguns casos são utilizados também aditivos superplastificantes com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e o tempo de pega das misturas de concreto permeável, como menciona (JIMMA; RANGARAJU, 2015; LI et al., 2017; ZHANG et al., 2017).

2.3.2 Principais propriedades

Permeabilidade, durabilidade, resistência à abrasão, compressão e tração na flexão são umas das principais propriedades do concreto permeável (NA JIN, 2010). O abatimento embora seja uma variável de extrema importância para concretos convencionais, para o concreto

permeável ela não pode ser analisada pelo método convencional da consistência pelo abatimento do tronco de cone pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), uma vez que sua consistência tende a ser baixa ou nula. Portanto, pesquisadores têm optado pela análise da massa unitária e pelo controle visual no estado fresco das amostras.

O índice de vazios é uma importante propriedade concreto permeável, está diretamente ligada a resistência e a permeabilidade, visto que o seu valor deve variar entre 15 e 25% para a obtenção de misturas com resistências à compressão entre 22 a 39 MPa (CHINDAPRASIRT et al., 2008; KHANKHAJE et al., 2016). Existem três tipos de poros existentes no concreto permeável, sendo eles os vazios da pasta de cimento, vazios dos agregados e vazios de ar, como apresentado na Figura 4.

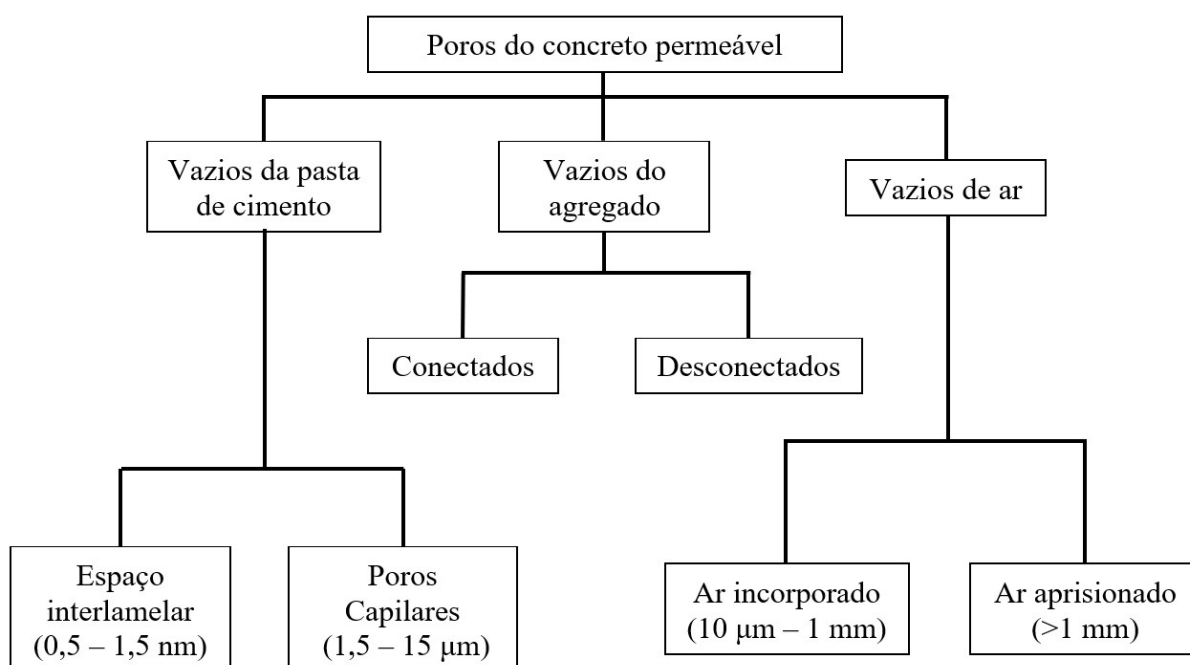


Figura 4 – Tipos de poros do concreto permeável.
Fonte: Adaptado de AOKI (2009).

Ao avaliar os tipos de poros no concreto permeável, verifica-se que os vazios na pasta de cimento são influenciados principalmente pela relação água/cimento da mistura e devido ao seu diâmetro médio apresenta pouca contribuição com a permeabilidade dos pavimentos, contudo contém um papel significativo na resistência mecânica. Os vazios do agregado compreendem todos os vasos capilares com maior diâmetro, podendo serem eles conectados ou não. Os vazios de ar geralmente são esféricos e não aumentam a permeabilidade, mas reduzem a resistência à compressão e ampliam a resistência a ciclos de gelo e degelo (AOKI, 2009).

A resistência aos ciclos gelo e degelo é uma importante propriedade a ser analisada caso o pavimento permeável seja empregado em ambientes de clima frio. O concreto permeável devido à alta permeabilidade da sua estrutura de poros não poderia ser saturada com água, assim, o dano de congelamento e descongelamento seria reduzido (WU et al., 2016a). No entanto, com base nos resultados da pesquisa de Wu et al. (2016a), o concreto permeável sob clima frio é ainda mais suscetível a danos congelamento-descongelamento do que o concreto convencional, mesmo em condições insaturadas ou parcialmente saturadas (KEVERN; WANG; SCHAEFER, 2009).

2.3.3 Fatores que afetam suas propriedades

Estudos têm comprovado que há uma relação entre a permeabilidade e resistência à compressão com o índice de vazios, sendo que quanto maior teor de vazios, maior seria permeabilidade e menor seria a resistência (COSTA et al., 2018). Outros fatores foram encontrados que se correlacionam: relação água/cimento e agregados/cimento, energia de compactação e outros (NA JIN, 2010).

A escolha dos agregados utilizados para a dosagem deve ser feita considerando que sua granulometria, tipo e a porcentagem de finos vão influenciar diretamente nas principais propriedades do concreto permeável (GAEDICKE; MARINES; MIANKODILA, 2014). Agregados com maior dureza e módulo de elasticidade propiciarão melhor ganho de resistência mecânica do que um macio. Ou seja, agregados provenientes de rochas de granitos e quartzo garantirão maior resistência que o calcário (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016b). Uma maior porcentagem de agregados finos resultará também no melhor desempenho mecânico, contudo, seu uso deve ser controlado, uma vez que altos teores ocasionam o fechamento dos poros e a aceleram a velocidade de colmatação (HESAMI; AHMADI; NEMATZADEH, 2014).

Uma alta quantidade de cimento produz uma baixa relação agregado/cimento e um menor volume de vazios e conseqüentemente uma menor permeabilidade. Estudos têm comprovado que baixas relações agregado/cimento geram o fechamento dos poros, enquanto valores altos propiciam queda de resistência. Desta forma, é necessário um cuidado especial nesta relação na dosagem do concreto permeável (GÜNEYISI et al., 2016).

A relação água/cimento deve ser necessária para hidratar completamente o cimento, assim geralmente seu valor tem variado no intervalo entre 0,22 a 0,45, segundo Na Jin (2010). Esta variável deve se ter um alto controle, pois a estabilização e o travamento do esqueleto granular ocorrem por meio da hidratação do cimento. Além disso, há interferência na consistência e seu excesso pode promover o assentamento da pasta no fundo e criar uma camada

impermeável indesejada. De forma semelhante a energia de compactação altera as propriedades do concreto permeável. As principais propriedades influenciadas por essa variável são a permeabilidade, resistência à compressão, a tração na flexão e aos ciclos degelo e degelo (BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foram confeccionadas amostras de concreto permeável prismáticas e cilíndricas para os ensaios mecânicos e hidráulicos. A primeira etapa deste estudo consistiu na caracterização dos materiais, em especial o resíduo da lapidação de granilite, onde foram exploradas as suas características macro e microestruturais. Posteriormente, realizou-se um estudo exploratório com o objetivo de determinação do traço inicial e a dosagem do aditivo superplastificante.

Em sequência foram moldados os corpos de provas para os ensaios mecânicos e iniciado o processo de cura até a data dos seus respectivos rompimentos. Nesta etapa objetivou-se também preparar amostra para os ensaios na nano e microestrutura do concreto permeável. A Figura 5 esquematiza o procedimento experimental adotado na pesquisa.

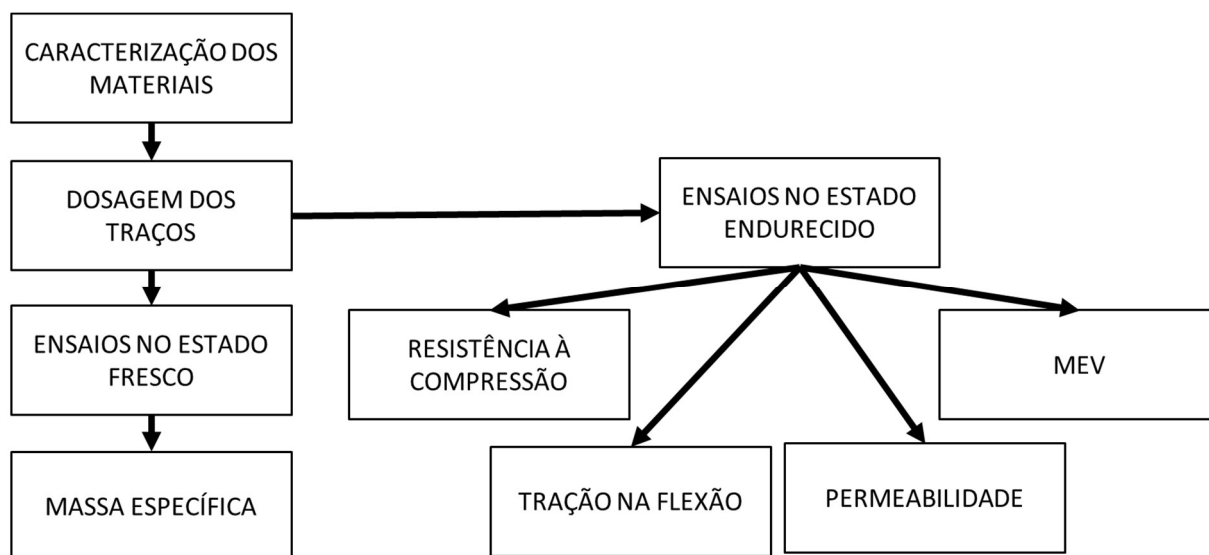


Figura 5 – Procedimento experimental adotado.
Fonte: Autor (2020).

Na etapa final, todos os dados levantados durante o estudo foram comparados com os resultados dos trabalhos encontrados durante o referencial teórico, e assim, feitas as análises e

determinadas as alterações que o RLG proporcionou elencando as suas vantagens e desvantagens no concreto permeável.

3.1 Caracterização dos materiais

A pesquisa foi realizada com o RLG adquirido do polimento dos pisos de concreto de galpões em construção na cidade de Rio Verde (GO) e região. O material coletado estava em estado pastoso, desta forma foi realizada uma prévia preparação com um processo de secagem à 65 °C por 72 horas em estufa e, em seguida, destorroado em um almofariz de porcelana e recolhido o material passante da peneira 150 µm. Tal procedimento foi necessário para reduzir a heterogeneidade, e evitar que a umidade presente no RLG alterasse a relação água/cimento, assim como, para que a sua finura natural fosse totalmente explorada.

A caracterização do RLG foi dividida em duas etapas: física e química. A caracterização física consistiu nos ensaios de massa específica, superfície específica, finura pela peneira 200 e a absorção. Os ensaios foram realizados, respectivamente, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), NBR 16372 (ABNT, 2015), NBR 11579 (ABNT, 2012) e NBR NM 30 (ABNT, 2001). Para a análise química foi avaliado a sua composição, estrutura cristalográfica, perda de massa ao fogo e a variação de massa com a temperatura, por meio dos ensaios de fluorescência de raio X (FRX), perda ao fogo (PF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O cimento empregado é o CP V – ARI, por apresentar alta resistência inicial e permitir a desforma das amostras após um dia de moldagem. As propriedades determinadas para este material foi a massa específica, superfície específica e a finura pela peneira 200, sendo realizadas também conforme as normas NBR 16605 (ABNT, 2017), NBR 16372 (ABNT, 2015) e NBR 11579 (ABNT, 2012). Os dados de caracterização do cimento podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados da caracterização do cimento.

Ensaio	Cimento
Massa específica	3,03 g/cm ³
Superfície específica	3757,32 cm ² /g
Finura pela peneira 200	0,94 %
Pasta de consistência normal	33,4%
Tempo de início de pega	125 minutos
Tempo de fim de pega	170 minutos

Fonte: Autor (2020).

A brita de origem basáltica foi utilizada como agregado graúdo, pois além de ser um material encontrado em abundância na região permitiu também, conforme observado no referencial teórico, maior resistência mecânica do concreto permeável devido a sua elevada dureza e módulo de elasticidade. Sua caracterização consistiu na determinação da massa específica, absorção, índice de vazios, distribuição granulométrica e massa unitária solta e compactada. Os procedimentos adotados para os ensaios de caracterização da brita estarão em conformidade com a NBR NM 26 (ABNT, 2009), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 53 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os dados de caracterização da brita pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados da caracterização do agregado graúdo.

Ensaio	Agregado Graúdo
Dimensão máxima	9,5 mm
Massa específica	2,73 g/cm ³
Massa unitária no estado solto	1,40 g/cm ³
Massa unitária no estado compactado	1,55 g/cm ³

Fonte: Autor (2020).

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade das amostras e seu tempo de pega foi adicionado em baixos teores um aditivo superplastificante tipo II de terceira geração à base de éter policarboxílico e com ausência de cloretos.

3.2 Dosagens das Amostras

Com base na caracterização dos materiais e na revisão bibliográfica foram dosados os traços de concreto permeável, onde ocorreu a dosagem da amostra referência constituída apenas de cimento e agregado graúdo, sendo observado a massa específica e a análise tátil e visual (Figura 6) . Assim, por meio de alguns testes iniciais foi determinado a relação água/cimento e a porcentagem de aditivo superplastificante adicionado.

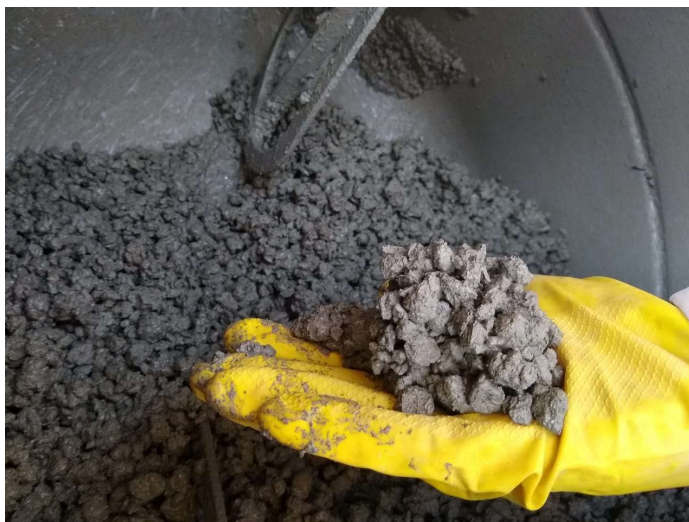


Figura 6 – Análise tátil e visual do concreto.
Fonte: Autor (2020).

Além do traço referência com a adição de aditivo, houve a confecção de outras duas amostras com a adição do RLG em baixos teores. Todas as dosagens tinham o objetivo de contemplar as exigências de permeabilidade e resistência mecânica à compressão e tração fornecidas pela NBR 16416 (ABNT, 2016) e foram obtidas através de testes experimentais. A Tabela 3 apresenta os traços unitários, proporção em massa, das amostras analisadas.

Tabela 3 – Traço unitário, proporção em massa, das amostras analisadas.

Traço	Cimento	RLG	Brita	a/c	Aditivo (%)
T.R	1	----	4	0,3	0,35
T.2RLG	1	0,02	4	0,3	0,35
T.4RLG	1	0,04	4	0,3	0,35

Fonte: Autor (2020).

Após a preparação, caracterização, definição dos traços e separação dos materiais, iniciou-se o processo de mistura e confecção dos corpos de prova. Contudo, como não há um procedimento normatizado para a mistura dos materiais, foi adotada a metodologia empregada por Bechara (2017), Batezini (2013) e Schaefer et al (2006), pois conforme estes autores a ordem de mistura dos componentes altera as propriedades do concreto permeável e, assim, avaliaram e determinaram o procedimento que obteria melhores resistências mecânicas e hidráulicas. A metodologia consiste nos seguintes passos:

- Adicionar todo o agregado com 5% do peso total do cimento na betoneira;
- Misturar por 1 minuto;
- Adicionar o restante dos materiais;

- Misturar por 3 minutos;
- Deixar a mistura em repouso por 3 minutos.
- Realizar a análise tátil e visual

3.3 Preparo e moldagem dos Corpos de prova

No estudo realizado, foram moldados 24 corpos-de-prova cilíndricos por traço para os ensaios de compressão, permeabilidade e índice de vazios, possuindo as seguintes dimensões: 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para os ensaios de flexão foram moldados 9 corpos-de-prova prismáticos nas dimensões 10 cm x 10 cm x 40 cm.

O procedimento de moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos consistiu no adensamento de três camadas com 25 golpes de uma haste de adensamento, para minimizar os efeitos da porosidade vertical analisados por Chindaprasirt et al. (2008) e Martin III; Kaye; Putman (2014). Já para os corpos de prova prismáticos, a compactação foi realizada com um soquete de 4,5 kg em duas camadas com 25 golpes cada. A Tabela 4 apresenta a quantidade de corpos-de-prova (CP) moldados durante o procedimento experimental deste estudo juntamente com seus respectivos ensaios.

Tabela 4 – Quantidade de amostras moldadas.

Ensaio	Idades de cura (dias)		
	3	7	28
Compressão Uniaxial	6	6	6
Tração na Flexão	3	3	3
Permeabilidade*	-	-	6
Índice de Vazios*	-	-	6

* Ensaio realizado sobre os mesmos CP

Fonte: Autor (2020).

Com o objetivo de averiguar quais as alterações na matriz cimentícia do concreto permeável proporcionadas pela adição do RLG, foram confeccionadas amostras cilíndricas de 5 mm de diâmetro e 3 mm de altura, com adensamento em mesa vibratória. Utilizou-se estes corpos de prova moldados apenas com pasta e RLG em ensaios de FRX e MEV.

3.4 Caracterização do concreto permeável

Em todos os traços foram analisadas a massa específica, permeabilidade e a resistência mecânica à compressão e tração na flexão, sendo que os ensaios procederam conforme as

normas NBR 9833 (ABNT, 2008), ACI 522R (ACI, 2010), NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 12142 (ABNT, 2010).

O ensaio de permeabilidade se procedeu pelo método de carga variável com o equipamento proposto pela ACI 522R (ACI, 2010), conforme a Figura 7. O uso deste equipamento ocorreu devido a sua facilidade construtiva e precisão dos dados, sendo ele também utilizado por vários outros pesquisadores (QIN et al., 2015). Para avaliar a permeabilidade da pista de teste foi empregado a metodologia proposta pela NBR 16416 (ABNT, 2015) no anexo A.



Figura 7 – Aparato de medição de permeabilidade em concretos permeáveis.
Fonte: Autor (2020).

Ainda no estado endurecido do concreto permeável foi realizado o ensaio de índice de vazios. O ensaio teve como procedimento submergir o corpo de prova por 24 horas, com o objetivo de saturar a amostra, e assim determinar o seu peso submerso. Realizado a pesagem hidrostática, o corpo de prova foi seco em estufa a 60 °C e determinada a sua massa seca. Para determinar o índice de vazios (V) fez-se uso da equação 1.

$$V = 1 - \left(\frac{W_2 + W_1}{P_w * Vol} \right) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

V : Índice de vazios

W_2 : Peso submerso (kg)

W_1 : Peso seco (kg)

P_w : Massa específica da água (kg/m³)

Vol : Volume da amostra (m³)

4 RESULTADOS

Os ensaios de caracterização do RLG resultaram em um módulo de finura de 0,69, dimensão máxima de 0,6 mm, massa específica de 2,58 g/cm³ e superfície específica 11447,03 cm²/g. As análises de morfologias do RLG podem ser observadas na Figura 8, onde nota-se que o material apresenta forma irregular. Sua superfície apresenta em determinados pontos uma alta rugosidade, indicando a alta absorção que este agregado reciclado possui e a influência que o processo de lapidação do resíduo possa ter gerado, uma vez que este procedimento é baseado em um processo abrasivo. Como indicado por Cordeiro et al. (2019), que ao avaliar a moagem de um resíduo por um meio abrasivo teve sua rugosidade aumentada.

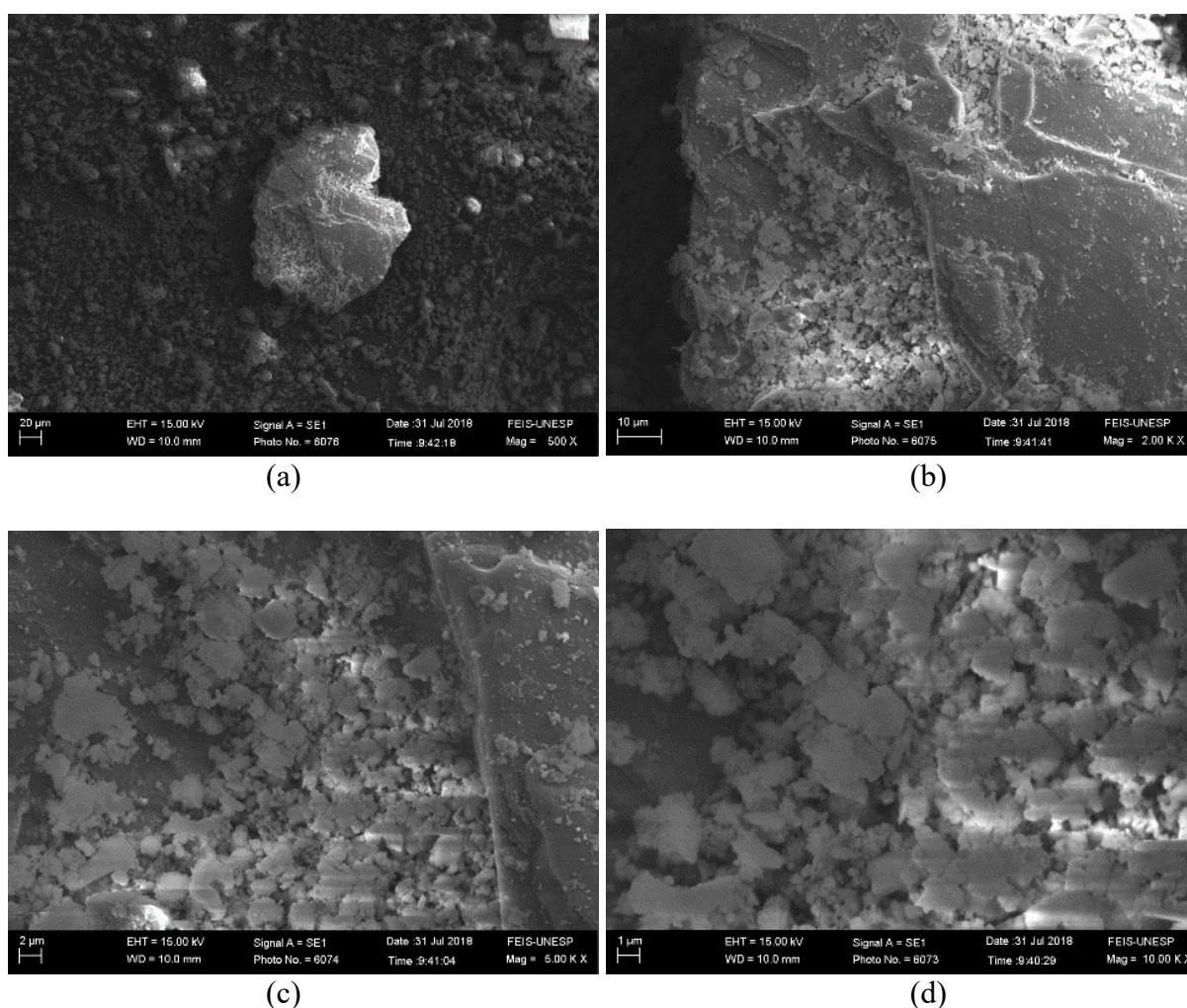


Figura 8 – MEV do RLG com aproximação de: (a) 20 µm; (b) 10 µm; (c) 2 µm e (d) 1 µm.

Fonte: Autor (2020)

A composição química do RLG determinada por meio da fluorescência de raios X e a perda ao fogo (PF) estão apresentados na Tabela 5. Através destes ensaios constatou que este material possui o teor de sílica de 10,29% e teores de elementos reativos de 13,51% indicando que o resíduo não possui atividade pozolânica, sendo que, de acordo com a NBR 12653 (ABNT,

2014) o requisito o mínimo é de 50% para o somatório das porcentagens de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Ao analisar a composição química do RLG percebe-se que CaO é o mineral com maior presença e o SiO_2 o segundo. Tais valores já eram esperados uma vez que o material é proveniente de pisos de concreto e conforme Neville (2013) estes são os principais constituintes do cimento e dos seus produtos de hidratação.

Tabela 5 – Composição química e perda ao fogo do RLG.

Material	Constituinte (%)								
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	SO_3	PF
RLG	10,29	0,12	1,88	1,34	8,26	41,00	0,22	1,24	36,03

Fonte: Autor (2020).

A perda ao fogo de 36,03% é superior aos requisitos de material pozolânico da NBR 12653 (ABNT, 2014). Ao observar as porcentagens do álcali K_2O verifica-se que está relativamente baixa se comparada a outros agregados reciclados (TANG; FLOREA; BROUWERS, 2017; MALKAWI et al, 2017; VINCO, 2017). Para a confecção dos pisos de granilite é utilizado rochas britadas de origem calcária, assim foi encontrado porcentagens de perda ao fogo e óxido de cálcio do resíduo semelhantes os valores encontrados por Mariani et al. (2019), o qual obteve para o calcário os valores de 37,8% para PF e 47,09% de CaO , indicando que o RLG herdou algumas de suas propriedades.

Os ensaios de massa específica (**Figura 9**) obtiveram o valor de 1986,44 kg/m^3 , 2127,26 kg/m^3 e 2197,56 kg/m^3 para os traços T.R, T.2RLG e T.4RLG, respectivamente, demonstrando que conforme ocorre o aumento da adição do resíduo no concreto a massa específica aumenta, principalmente, devido aos fechamentos dos poros. Assim os resultados de massa específica está conforme o trabalho Antunes (2017), onde o concreto permeável com a granulometria com o maior número de finos apresentou a maior massa específica.

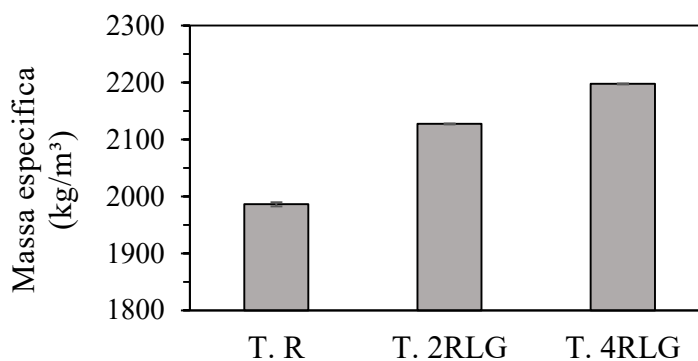


Figura 9 - Resultados de massa específica.

Fonte: Autor (2020).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão (Figura 10) demonstraram que a adição do resíduo no concreto promoveu um incremento significativo da resistência mecânica à compressão. Ao analisar a resistência à compressão dos traços com RLG aos 28 dias de cura, foi possível observar que as dosagens T.2RLG e o T.4RLG apresentou, respectivamente, 131,4% e 103,6% de aumento da resistência em relação ao traço T.R.

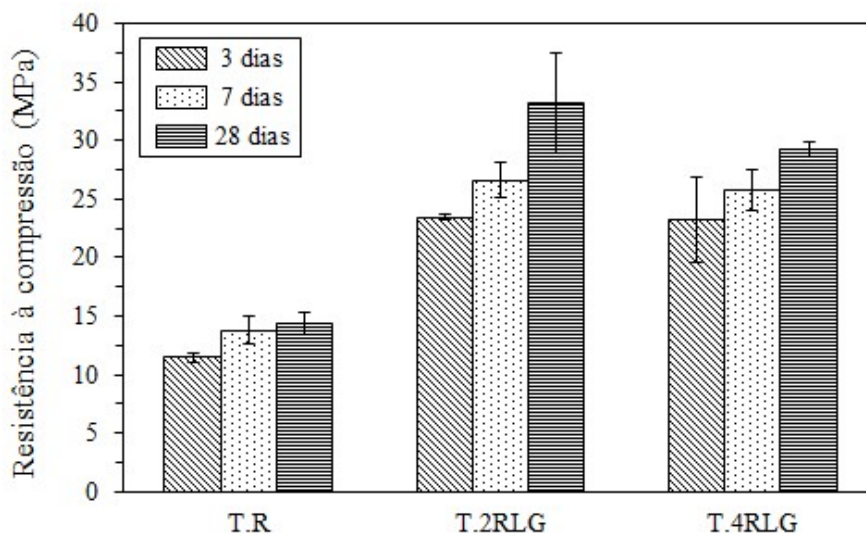


Figura 10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Fonte: Autor (2020).

Os resultados encontrados de resistência à compressão estão de acordo com o trabalho de Chen et al. (2013), visto que em seu estudo os traços que continham a inserção de finos (cinza volante e sílica ativa) na dosagem do concreto permeável apresentou uma resistência superior aos 28 dias em cura de 14,6 MPa ao ser comparada com a amostra sem estes finos. Sendo assim, a o ganho de resistência mecânica de 18,89 e 14,89 MPa para as amostras T.2RLG e T.4RLG, respectivamente, pode ser atribuída ao efeito de nucleação e efeito filer promovido pelo agregado reciclado.

A resistência à flexão do concreto permeável, Figura 11, evidenciaram uma significativa influência do resíduo nesta propriedade. Houve um aumento expressivo de 104,0% na resistência aos 28 dias da amostra T.4RLG se comparada a T.R. O traço T.2RLG não obteve acréscimo significativo da resistência à flexão após 7 dias, contudo sua resistência permaneceu superior em 160,7% se comparada com a do traço T.R.

Os resultados de ensaio de permeabilidade (Figura 12-a) e índice de vazios (Figura 12-b) indicaram que a adição do resíduo promoveu a redução da permeabilidade e o índice de vazios, contudo atendendo ainda as exigências mínimas estabelecidas na NBR 16416 (ABNT,

2015). A NBR 16416 (ABNT, 2015) apresenta como exigência, para o concreto ser classificado como pavimento permeável, o coeficiente de permeabilidade igual ou superior a 1 mm/s, massa específica superior a 1600 kg/m³, resistência à tração na flexão de 2 MPa e resistência à compressão de no mínimo 20 MPa, assim verifica-se que todos traços analisados, inclusive os com adição de RLG, atenderam a esta norma.

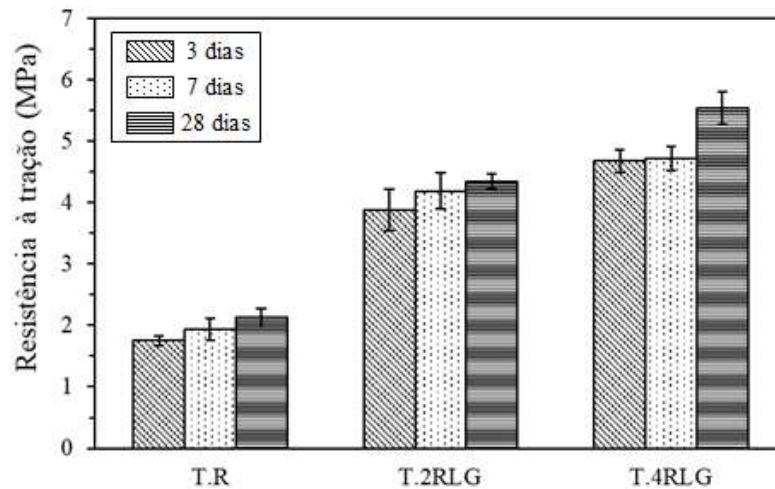


Figura 11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.
Fonte: Autor (2020).

Ao comparar as misturas T.2RLG e T.4RLG verifica-se que a amostra com 4% de RLG apresentou maior permeabilidade, embora possua o maior número de finos. Tal resultado pode ser explicado pela maior dificuldade de adensamento de amostra com 4% adição de resíduo, pois uma vez que a relação água/cimento foi fixada o emprego do RLG reduziu a consistência através da absorção da água de amassamento, gerando assim maior índice de vazios e, conseqüentemente, uma maior permeabilidade.

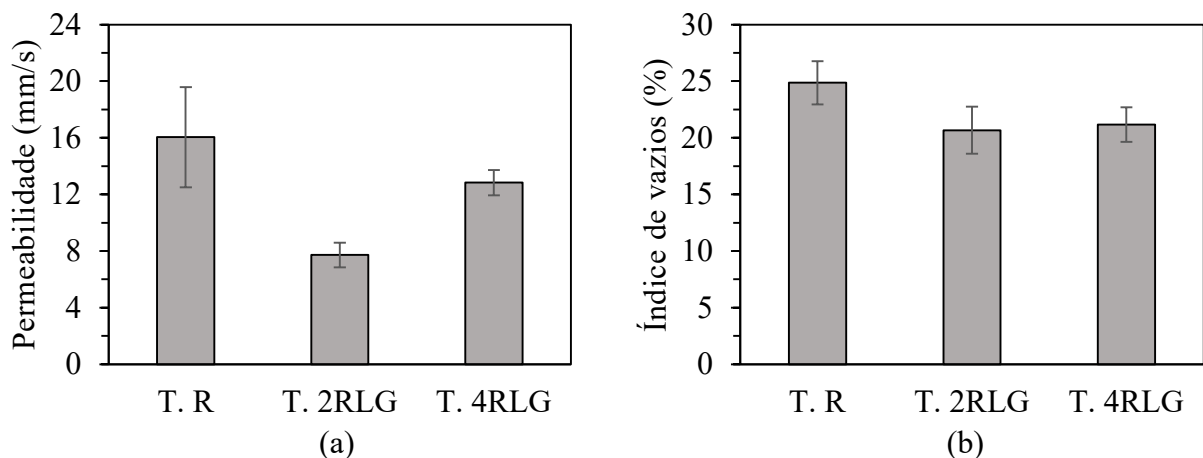
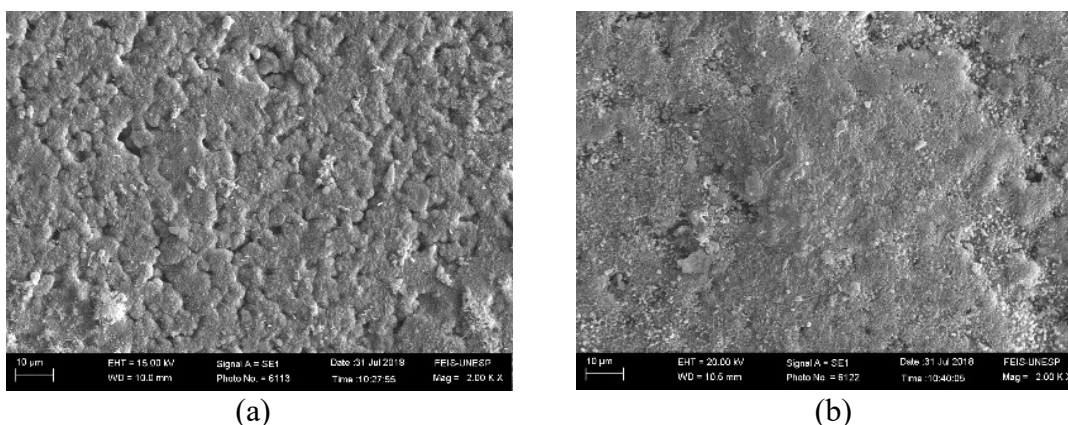


Figura 12 – Resultados de (a) permeabilidade e (b) índice de vazios
Fonte: Autor (2020).

Quando analisado a microestrutura do concreto, conforme Mehta e Monteiro (2014), é perceptível a formação de três fases: os agregados, a matriz cimentícia e as zona de transição (zona formada entre a matriz cimentícia e os agregados). Ao analisar a Figura 13, extraídas dos ensaios de microscopia de varredura eletrônica (MEV), verifica-se que os traços com adição de RLG apresentaram uma matriz cimentícia mais densa devido a menor quantidade de poros presente na pasta, resultando assim, na maior resistência dos pontos de contato do esqueleto granular do concreto permeável. Tais fatores, são responsáveis por grande parte do aumento da resistência dos concretos dosados na pesquisa com as adições do resíduo. Resultados similares foram encontrados por Bosiljkov (2003), Esping (2008) e Wang et al. (2019).



(a) (b)
Figura 13 – Imagens por MEV da pasta dos traços: (a) T.R; (b) T.4RLG
 Fonte: Autor (2020).

Comparando-se os dados de caracterização do RLG é possível observar que sua superfície específica corresponde a quase três vezes ao valor do cimento, indicando que o acréscimo na resistência mecânica à compressão de concretos fabricados com este resíduo é devido ao efeito filer, ao qual permite reduzir a porosidade total do sistema através do preenchimento dos vazios de empacotamento e poros capilares. Resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro (2012), em que foi estudado a adição de material com alta finura e promoveu o desempenho de algumas propriedades do concreto.

Ao analisar novamente a composição química do RLG, verifica-se um elevado valor de CaO, indicando que o aumento de resistência pode também ser atribuído ao efeito de nucleação gerado pelo resíduo, uma vez que a maior concentração de íons Ca^{2+} aumenta a frequência de choques das partículas acelerando o processo de hidratação, que combinado com a baixa relação água/cimento forma majoritariamente o composto C_3AH_6 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Este composto formado possui uma alta densidade de $2,52 \text{ g/cm}^3$ e é menos solúvel (GARCIA, OLIVEIRA, PANDOLFELLI, 2007; GENG *et al*, 2017).

Após a análise do desempenho do material, e comprovada a eficiência do RLG na composição, foi aplicado o material em obra de praça pública conforme a Figura 14-a, optando-se por uma camada de base sobre o solo de brita basáltica com dimensão máxima de 19 mm, tal substrato com espessura de 5 cm foi dimensionado para atuar como reservatório de água do pavimento permeável, sendo considerado uma precipitação máxima com período de retorno de 10 anos e 1 hora de duração. Para a confecção do pavimento de concreto permeável foram definidos três trechos, sendo um para cada traço, uma vez que a adição do material estudado não afeta as propriedades visuais do concreto. Para realizar a compactação do concreto foi empregado um rolo compactador (Figura 14-b) de 1 metro de comprimento e 20 cm de diâmetro confeccionado na própria obra em concreto convencional. A Figura 15 apresenta a praça antes e após o período de construção.

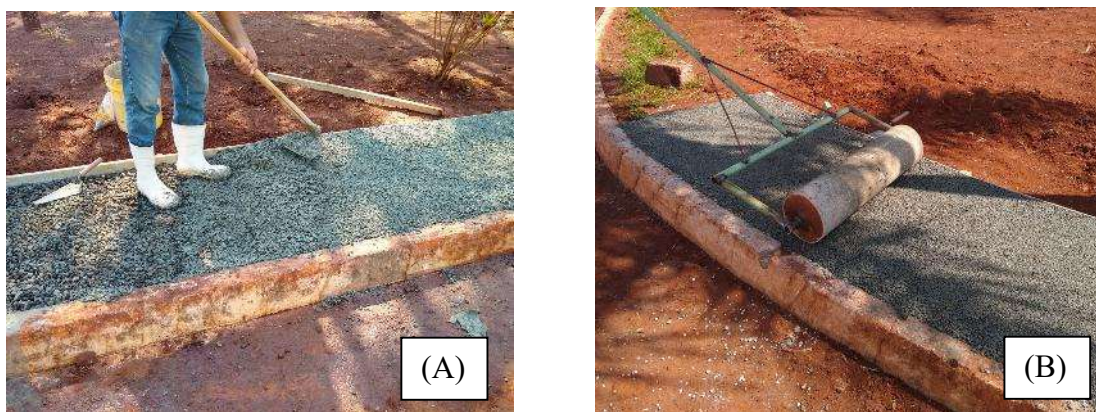


Figura 14 – Processo de construção da praça: (a) aplicação do concreto poroso; (b) utilização do rolo compactador
Fonte: Autor (2020).

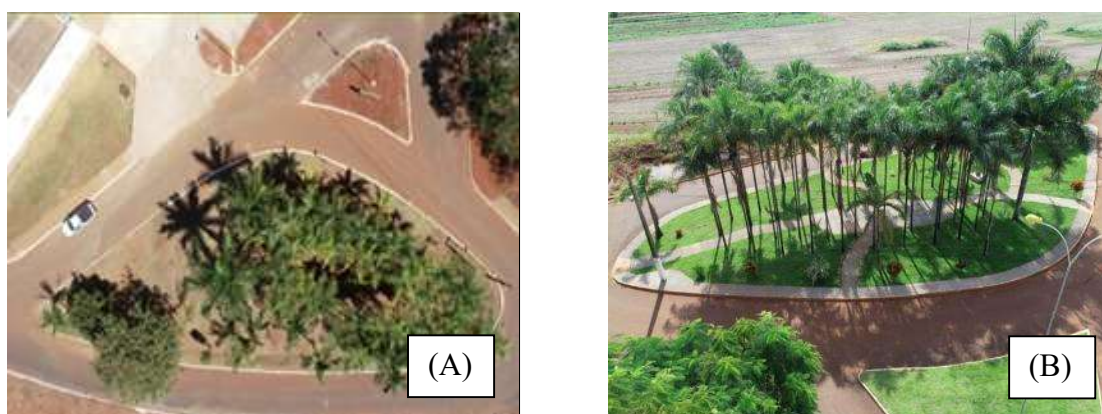


Figura 15 – Vistas da praça: (a) antes do início da construção; (b) após conclusão das obras
Fonte: Autor (2020).

Ao avaliar a permeabilidade da pista de teste construída, foram observadas as permeabilidades obtidas na Figura 16, onde é possível perceber que todas as amostras

apresentaram permeabilidade superior ou igual a 1 mm/s, valor este requerido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015).

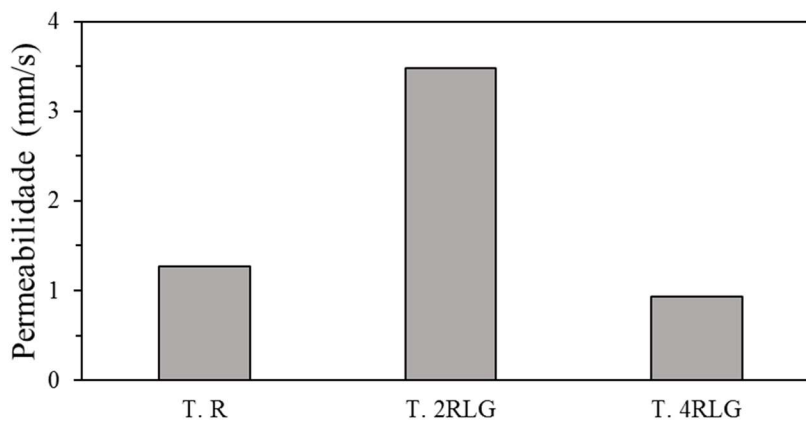


Figura 16 – Resultados de permeabilidade em campo.

Fonte: Autor (2020).

Observa-se também na Figura 16 que a composição com 2% de RLG obteve maior permeabilidade, sendo de aproximadamente 3,5 mm/s. Para as amostras com o traço T.R e T.4RLG foi observado valores de 1,3 mm/s e 1,0 mm/s, mesmo após a jardinagem que contaminou os poros ou processo de desentupimento. A variação dos resultados de permeabilidade em campo para o laboratório, provavelmente foram devido ao controle de materiais na betoneira por volume.

5 CONCLUSÕES

Com o estudo da utilização do RLG na produção do concreto permeável verificou-se que este resíduo apresenta uma alta superfície específica, permitindo que a sua adição em matrizes cimentícias promovesse maior compacidade através do fechamento dos microporos, como observado nas análises de microestrutura.

O emprego do RLG nos teores estudados proporcionou maior desempenho mecânico das misturas. O ganho significativo de resistência mecânica dos traços com adição de RLG, em relação ao T.R, permitiu que essas dosagens tenha a possibilidade de serem aplicadas na moldagem de peças de concreto com juntas alargadas ou áreas vazadas para trechos com tráfego leve.

Desta forma, conclui-se que o aumento de resistência mecânica é devido ao efeito filer, em que há o fechamento dos microporos da matriz cimentícia e uma pequena parcela dos macroporos. Pelas análises realizadas o resíduo foi considerado inerte, porém recomenda-se análises complementares de durabilidade para confirmar esta hipótese. A aplicação do material nos trechos testados da praça em construção não exibiu dificuldades construtivas, devendo ser aplicado apenas o rolo compressor fabricado na própria obra como ferramenta adicional se comparado ao concreto convencional.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no desenvolvimento deste estudo e seu tema, são sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Avaliar a durabilidade de concretos permeáveis com adição de RLG;
- Estudar os efeitos de colmatação;
- Analisar a distribuição de tensão das camadas do pavimento permeável
- Verificar a influência da granulometria nas propriedades do concreto permeável

REFERÊNCIAS

- ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. E. M.; FAWZY, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 105–127, 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete**. ACI Committee 522, Farmington Hills, Michigan, 2010.
- ANTUNES, P. T. S. C. **Uso do Pavimento Permeável de Concreto para Atenuação de Cheias Urbanas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2017.
- AOKI, Yukari. **Development of pervious concrete**. 2009. Tese de Doutorado.
- ARAÚJO, D. C. DE et al. Multicriteria analysis applied to the management of urban pluvial waters. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 18, p. 11, 2017.
- ARAÚJO, P. R. DE; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. January 2000, p. 21–29, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 15805: Placa de concreto para piso - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

_____. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9895:** Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

_____. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASTM C1701, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2017.

BOSILJKOV, V. B.; SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, v. 33, 1279-1286 p. 2003.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BECHARA, L. A. D. C. **Concreto Poroso como Revestimento de Pavimento Permeável: Alternativa de Drenagem Urbana dão Estrutural à Região Metropolitana de Belém**. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Belém, 2017.

BENINI, R. D. M.; MENDIONDO, E. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 211–222, 2015.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102–110, 2015.

BRAVO, M. et al. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 818–830, 2018.

CASTRO, J. et al. Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. **Revista Ingenieria de Construccion**, v. 24, n. 3, p. 271–284, 2009.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 12, p. 5255–5271, 2016a.

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**, v. 111, p. 262–274, 2016b.

CHEN, L.-M. et al. Measurement of Permeability and Comparison of Pavements. **Water**, v. 11, n. 3, p. 444, 2019.

CHEN, Y.; et al. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, 97-104 p. 2013.

CHINDAPRASIRT, P. et al. Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 894–901, 2008.

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro *et al.* Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 45-55, mar. 2019.

COSTA, F. B. P. et al. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1151–1159, 2018.

DNIT (1999) DNER-ES 386 - Pavimento – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, Rio de Janeiro.

ESPING, O. Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of

self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, 938-944 p. 2008.

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**, v. 52, p. 494–503, 2014.

GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I. R. de; PANDOLFELLI, V. C. Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, n. 325, p. 42-56, Mar. 2007.

GENG, G. *et al.* Nanometer-Resolved Spectroscopic Study Reveals the Conversion Mechanism of $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ to $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ and $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ at an Elevated Temperature. **Crystal Growth and Design**. 4246–4253 p. 2017.

GÜNEYISI, E. et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 1–2, p. 521–536, 2016.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 680–691, 2014.

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

JIMMA, B. E.; RANGARAJU, P. R. Chemical admixtures dose optimization in pervious concrete paste selection - A statistical approach. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1047–1058, 2015.

JIN, Na. fly ash Applicability in Pervious Concrete. 2010. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

KEVERN, J. T.; WANG, K.; SCHAEFER, V. R. Effect of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 469–475, 2009.

KHANKHAJE, E. et al. Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 1054–1065, 2016.

KIM, G. M. et al. Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 1–8, 2017.

LI, J. et al. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 479–485, 2017.

MARIANI, B. B. *et al.* Efeito da incorporação de resíduo de TiO_2 (MNR) na formação das

fases mineralógicas de clínquer Portland. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 57-71, Mar. 2019.

MARTIN III, W. D.; KAYE, N. B.; PUTMAN, B. J. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 78–84, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2014.

MULLIGAN, Ann Marie. Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems. 2005.

JIN, Na. **Fly ash applicability in pervious concrete**. 2010. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

NEITHALATH, N. et al. Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials. Purdue University, 2003.

OSSA, A.; GARCÍA, J. L.; BOTERO, E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 379–386, 2016.

QIN, Y. et al. Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, p. 1–6, 2015.

SCHAEFER, V. et al. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. **Final Report, Civil Engineering**, Iowa State University, 2006.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S.. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 75-89, Fev. 2016.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. Pervious Concrete Pavements, EB302, **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois, 36p., 2004.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas: Estudos Avançados. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.

WANG, D.; et al. A quantitative study on physical and chemical effects of limestone powder on properties of cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 204, 58-69 p. 2019.

WU, H. et al. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 63–71, 2016a.

WU, M. H. et al. Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 618–624, 2016b.

XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1605–1621, 2019.

ZAETANG, Y. et al. Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 289–295, 2015.

ZHANG, Z. et al. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 112–118, 2017.

ZHOU, Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. **Water**, v. 6, n. 4, p. 976-992, 2014.