

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE - MESTRADO PROFISSIONAL
CAMPUS RIO VERDE**

**ANÁLISE DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DO
RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO**

Orientador: Bacus de Oliveira Nahime

Discente: Igor Soares dos Santos

RIO VERDE – GO

AGOSTO – 2022

IGOR SOARES DOS SANTOS

**ANÁLISE DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DO
RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Tecnologia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime.

RIO VERDE – GO

AGOSTO – 2022

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

S194a Santos, Igor Soares dos
ANÁLISE DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DO
RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO / Igor
Soares dos Santos; orientador Dr. Bacus de Oliveira
Nahime . -- Rio Verde, 2022.
81 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano,
Campus Rio Verde, 2022.

1. Pavimento Permeável. 2. Permeabilidade. 3.
Entupimento. 4. Agregado reciclado. I. , Dr. Bacus
de Oliveira Nahime, 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, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, 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 (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |
| <input type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo: | <input type="text"/> |

Nome completo do autor:

Igor Soares dos Santos

Matrícula:

2020102331440099

Título do trabalho:

ANÁLISE DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Documento não confidencial

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01 / 10 / 2022

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:

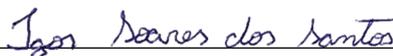
- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto 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;
- Que 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

Local

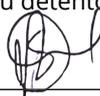
27 / 09 / 2022

Data



Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 86/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 52
Data: 27/08/2022	Hora de início: 08:00h	Hora de encerramento: 11:00h
Matrícula do discente:	2020102331440099	
Nome do discente:	Igor Soares dos Santos	
Título do trabalho:	ANÁLISE DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO	
Orientador:	Bacus de Oliveira Nahime	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e Ciência dos Materiais	
Projeto de pesquisa de vinculação	ANÁLISE DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO	

Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
------------	--

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime (Presidente da banca), Prof. Dr. Elton Carvalho de Lima (Avaliador Externo), Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada por vídeo conferência via Google Meet à distância, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de IGOR SOARES DOS SANTOS, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Bacus de Oliveira Nahime, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Charles Pereira Chaves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/09/2022 15:54:46.
- Elton Carvalho de Lima, Elton Carvalho de Lima - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 26/09/2022 19:29:26.
- Idalci Cruvinel dos Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/09/2022 15:29:59.
- Bacus de Oliveira Nahime, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/09/2022 15:22:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 413708
Código de Autenticação: f05f4808d2



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, capacitação e forças que me foram dadas 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 deste estudo. Agradeço ainda a todo apoio, conselhos e ensinamentos passados que me proporcionaram 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 deste trabalho e minha vida acadêmica.

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

BIOGRAFIA DO AUTOR

Igor Soares dos Santos, natural da cidade de Goiânia, Goiás, nascido em 26 de fevereiro de 1997, filho de Adilson Soares Coimbra e Chyntia Adão dos Santos Rodrigues. Concluiu o ensino médio no Colégio Estadual Frederico Jayme, localizado em Rio Verde, Goiás, no ano de 2015. Graduado em Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano- Campus Rio Verde, em 2020. No ano de 2020 ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade com ênfase em Tecnologia e Ciência dos Materiais, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano- Campus Rio Verde.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2.	PROBLEMA.....	2
3.	HIPÓTESES	3
4.	OBJETIVOS	3
4.1.	Objetivo Geral.....	3
4.2.	Objetivos Específicos.....	3
5.	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
5.1.	Permeabilidade.....	4
5.2.	Índice de Vazios.....	5
5.3.	Resistência à compressão.....	7
5.4.	Resistência à tração na flexão.....	8
5.5.	Durabilidade.....	9
5.6.	Fatores que Influenciam no Desempenho.....	10
5.7.	Processo de colmatação.....	13
5.8.	Métodos de análise da colmatação.....	15
5.9.	Limpeza e Restauração.....	18
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
7.	CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1.....	26
7.1.	Introdução.....	28
7.2.	Material e Métodos.....	30
7.2.1.	Materiais.....	30
7.2.2.	Composição de amostras de concreto.....	31
7.2.3.	Propriedades Avaliadas.....	32
7.2.4.	Tratamento estatístico.....	33
7.3.	Resultados e Discussões.....	33
7.4.	Conclusões.....	45

7.5.	Agradecimentos.....	46
7.6.	Referências (Capítulo 1 – Artigo 1).....	46
8.	CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2.....	51
8.1.	Introdução	54
8.2.	Material e Métodos	54
8.3.	Resultados e Discussões.....	57
8.4.	Conclusões	60
8.5.	Referências (Capítulo 2 – Artigo 2).....	61
9.	CAPÍTULO 3 – SOFTWARE	62
9.1.	Apresentação	63
9.2.	Interface.....	63
9.3.	Conclusão.....	67
10.	CONCLUSÃO GERAL.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Correlação entre permeabilidade e índice de vazios para ampla gama de concretos permeáveis relatados na literatura.	6
Figura 2 – Resistência à compressão e volume de pasta, para misturas de concreto permeável feitas com alto e baixo teor de pasta.	8
Figura 3 – Macrofibras agindo na região da fissura na tração na flexão.	9
Figura 4 – Percentual de mudança de permeabilidade restante com o número de repetições de entupimento em comparação com a permeabilidade inicial antes do teste de entupimento.	13
Figura 5 - Aparato utilizado para medir a colmatação, com as dimensões em milímetros.	17
Figura 6 – MEV da amostra de CFPW ampliação de (a) 5000x e (b) 10000x.	34
Figura 7 – Resistência à compressão e massa específica.	36
Figura 8 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.	37
Figura 9 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.	38
Figura 10 – Resultados de massa específica, permeabilidade e índice de vazios.	39
Figura 11 – Difractogramas de raios-X para CONTROL, 2% CFPW e 4% CFPW	41
Figura 12 – curvas TG/DTG de pastas cimentícias; (a) CONTROL; (b) 2% do CFPW; (c) 4% de CFPW, após 28 dias de cura.	42
Figura 13 – Aumento da carbonatação em relação à composição CONTROL.	44
Figura 14 – Imagens MEV das pastas, aumento de 5000x, 28 dias:	45
Figura 15 – Análise visual do concreto permeável.	56
Figura 16 – Aplicação do concreto permeável nos trechos selecionados.	59
Figura 17 – Emprego do rolo compactador construído com material reciclado.	59
Figura 18 – Vistas da praça: (a) antes e (b) após a conclusão das obras.	60
Figura 19 – Resultados de permeabilidade em campo.	60
Figura 20 – Tela Inicial.	64
Figura 21 – Mensagem de aviso de preenchimento de dados.	65
Figura 22 – Mensagem de aviso de dados incompletos.	65
Figura 23 – Aplicações recomendadas a partir da análise do software.	66
Figura 24 – Indicação dos limites para os componentes do concreto permeável.	66
Figura 25 – Análise das propriedades por meio do processamento do software.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variabilidade do índice de vazios em diferentes pesquisas.	5
Tabela 2 – Dados de caracterização do agregado graúdo.	30
Tabela 3 – Caracterização e tempo de pega do cimento.	31
Tabela 4 – Composição unitária e proporção em massa das amostras analisadas.	31
Tabela 5 – Número de amostras feitas por tempo de cura.	32
Tabela 6 – Composição química e perda ao fogo de CFPW.	35
Tabela 7 – Análise da variância para resistência à compressão.	36
Tabela 8 – Análise da variância para resistência à tração na flexão.	37
Tabela 9 – Análise de variância dos resultados dos testes de permeabilidade e índice de vazios.	39
Tabela 10 – Teste de Tukey para permeabilidade e índice de vazios.	40
Tabela 11 – Teor percentual de produtos de hidratação do cimento das pastas analisadas.	43
Tabela 12 – Resumo dos consumos de materiais e espessuras das camadas.	57
Tabela 13 – Composição de custo por metro quadrado dos materiais para produzir o concreto permeável e concreto convencional com piso de 60 mm de espessura.	58

RESUMO

SANTOS, IGOR SOARES DOS. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto 2022. **Análise do Concreto Permeável com Adição do Resíduo do Polimento de Pisos de Concreto.** Orientador: Bacus de Oliveira Nahime.

O concreto permeável possui diversas vantagens ambientais e econômicas se avaliadas a longo prazo, tendo a possibilidade da inserção de resíduos fino em baixos teores em sua composição sem queda significativa no seu desempenho. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da adição de resíduo do polimento de piso de concreto (CFPW, sigla em inglês para *concrete floor polishing waste*), determinando sua influência nas propriedades mecânicas, hidráulicas, estrutura química e o potencial de colmatação. As primeiras etapas foram sobre a caracterização química e física do CFPW, sendo realizadas análises por meio da microscopia de varredura eletrônica (MEV), termogravimétrica, difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX). Para alcançar os objetivos foram propostas três dosagens distintas do concreto permeável, sendo uma amostra referência determinada com base na revisão da literatura e dosada com apenas agregados naturais e cimento, e outras duas dosadas com a mesma proporção de pasta e agregado graúdo do traço referência, no entanto, com adições do CFPW em baixos teores para evitar o fechamento dos poros. Foram avaliadas para todas as amostras a permeabilidade, resistência mecânica a compressão e a tração na flexão. Na resistência à tração na flexão, foram notadas diferença nos resultados para todas as composições, sendo que a adição com 4% de CFPW apresentou o melhor resultado, apresentando aumento de 16,3% em relação à amostra CONTROL, seguida da composição de 2% do CFPW com acréscimo de 11,0%. Com o desenvolvimento deste estudo foi possível concluir, ao considerar apenas o preço dos materiais para construção de pavimento de concreto permeável moldado *in loco*, o custo de produção por metro quadrado é inferior em 11,46 % ao de concreto convencional, principalmente pelo baixo teor de cimento na mistura e ausência de agregado finos. Esta pesquisa constatou que o concreto permeável com adições controladas de CFPW é viável atendendo aos requisitos normativos vigentes, como resistência mecânica à compressão, tração na flexão e permeabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento permeável; Permeabilidade; Entupimento; Agregado reciclado;

ABSTRACT

SANTOS, IGOR SOARES DOS. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, August 2022. **Pervious Concrete Analysis with Addition of Concrete Floor Polishing Waste**. Advisor: Bacus de Oliveira Nahime.

Pervious concrete has several environmental and economic advantages if evaluated at long term, having the possibility of inserting fine waste at low levels in its composition without significant decrease in its performance. In this sense, the objective of this study was to evaluate the influence of concrete floor polishing waste (CFPW) addition, determining its influence on mechanical and hydraulic properties, chemical structure and clogging potential. The first steps were about the chemical and physical characterization of CFPW, being analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric, X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF). To achieve this objective, three different dosages of pervious concrete were proposed, being a reference sample determined based on the literature review and dosed with only natural aggregates and cement, and another two doses with the same proportion of paste and coarse aggregate of the reference trace, with CFPW additions in low levels to avoid the pores closing. Permeability, mechanical resistance to compression and flexural tensile strength were evaluated for all samples. In the flexural tensile strength, it was noted that there is a difference in the results for all compositions, and the CFPW addition of 4% had the best result, showing an increase of 16.3% in relation to the CONTROL sample, followed by the composition of 2% with an increase of 11.0%. With the development of this study, it was possible to conclude, when considering the price of materials for construction of pervious concrete pavement molded in loco, the production cost per square meter is reduced by 11.2% than that of conventional concrete, mainly due to the low content of cement in the mixture and absence of fine aggregates. The research carried out found that pervious concrete with controlled additions of CFPW is viable, meeting current regulatory requirements, such as mechanical resistance to compression, tensile strength in bending and permeability.

KEYWORDS: Permeable floor; Mechanical resistance; Permeability; Clogging

1. INTRODUÇÃO GERAL

O processo de urbanização intensificou-se após a revolução industrial no século XVIII, pela 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.

Segundo 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 construção civil é um importante setor para o crescimento econômico, contudo é responsável também pelo alto consumo de recursos naturais em sua cadeia produtiva, a geração de grande volume de resíduos de construção e demolição (RCD) e pela sua disposição indiscriminada deste material (BOHNENBERGER *et al.*, 2018). Nesse aspecto, a geração dos resíduos na fase de acabamento contribui significativamente, como é o caso do resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW), produzido durante o processo de polimento dos pisos de granilite (CAETANO; SELBACH; GOMES, 2016).

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 pode ser aplicada algumas medidas não estruturais que possibilitem maior infiltração da precipitação no solo, como é o caso dos pavimentos permeáveis.

Os pavimentos permeáveis são pavimentos sustentáveis que permitem a infiltração de grande volume de água pluvial em curto período. Devido a sua elevada taxa de infiltração o pavimento permeável é solução sustentável e vantajosa no controle de enchentes e inundações, uma vez que reduz significativamente o escoamento superficial, possibilita o reabastecimento do lençol freático ou reaproveitamento da água pluvial e minimiza os efeitos das ilhas de calor (COSTA JUNIOR; BARBASSA, 2006). Assim, serão desenvolvidos diversos tipos de pavimentos permeáveis e ainda há estudos que

buscam o aprimoramento de suas propriedades mecânicas, durabilidade e a redução do custo de implementação.

Para obter a alta permeabilidade do concreto permeável é necessário que em sua composição não contenha a presença de finos ou esteja em baixos teores, isso garante maior índice de vazios e quantidade de vazios comunicantes, porém essa técnica reduz as resistências mecânicas do concreto. Dessa forma, convencionalmente o concreto permeável é composto por cimento, agregado graúdo, água e aditivos e/ou adições.

Ao longo da vida útil do concreto permeável ocorre o entupimento dos poros e a sua redução de permeabilidade, este fenômeno é conhecido como colmatação (DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010). Os sedimentos responsáveis pelo entupimento podem ter origem na matéria orgânica próxima, nos detritos do pavimento ao ocorrer desgaste por abrasão, na corrosão de elementos próximos e pelo transporte de finos.

A manutenção do concreto permeável deve ocorrer periodicamente, com o objetivo de retirar o material responsável pela obstrução dos poros, sendo que os procedimentos e mais convencionais são a lavagem com pressão, varredura, jatos de ar e vácuo ou a combinação destas metodologias. A frequência que deve ser realizado a limpeza dos poros varia conforme o ambiente que é exposto o concreto permeável, disponibilidade de partículas finas, clima da região e a origem dos sedimentos (OLIVEIRA, 2017).

2. PROBLEMA

A impermeabilização do solo tem provocado diversos fatores adversos em zonas urbanas, como aumento do escoamento superficial, número de ocorrências de inundações e vazões de pico de corpos d'água. O concreto permeável é uma solução sustentável e com maior custo-benefício se comparado ao sistema tradicional de drenagem urbana, contudo ainda há a necessidade de estudos aprofundados sobre a sua aplicação ao longo prazo e a influência do uso de resíduos em sua composição. Assim, qual será a variação do comportamento mecânico e hidráulico do concreto permeável com a adição do resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW, sigla em inglês para *concrete floor polishing waste*)? A adição CFPW, em baixos teores, permite a aplicação do concreto permeável respeitando os limites normativos?

3. HIPÓTESES

Com base no referencial teórico é possível levantar as seguintes hipóteses:

- O CFPW aumenta as resistências mecânicas e reduz a permeabilidade do concreto permeável;
- A aplicação do concreto permeável possui maior viabilidade econômica que o convencional.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Compreender os efeitos da adição do resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW) no concreto permeável.

4.2. Objetivos Específicos

Para atingir objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Preparar amostras;
- Caracterizar as características físicas e químicas do CFPW;
- Avaliar a influência na resistência mecânica e permeabilidade com a adição do CFPW no concreto permeável;
- Analisar o custo e aplicação do concreto permeável com o concreto convencional;

5. REVISÃO DE LITERATURA

Para a composição do concreto permeável utilizam os mesmos componentes do concreto convencional, adotando diferentes proporções (KIA; WONG; CHEESEMAN,

2017). O equilíbrio entre propriedades como permeabilidade, índice de vazios, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e durabilidade constituem o concreto permeável (MIKAMI *et al.*, 2018; FARIA *et al.*, 2019). Conforme Kia, Wong e Cheeseman (2017), a mistura dos elementos varia conforme a finalidade do material, seja pelo desempenho ou design, não havendo restrição do método.

5.1. Permeabilidade

A permeabilidade ocorre pela composição conter mínima ou nenhuma proporção de agregado miúdo, que possibilita a percolação entre os poros (GOMES *et al.*, 2019), sendo definida pela NBR 16416 (ABNT, 2015) como o processo em que a água percorre os vazios do pavimento. Ao considerar o tempo para verificar a velocidade de percolação do líquido, obtém-se o coeficiente de permeabilidade ou também denominado parâmetro k , que pode ser obtido de forma prévia em laboratório, com ensaios na camada de revestimento, ou em campo, considerando a estrutura do pavimento (GOMES *et al.*, 2019).

Para que o pavimento recém-construído seja considerado permeável, o resultado obtido deve ser maior que 0,1 cm/s de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015). Todavia, o estudo de Kia, Wong e Cheeseman (2017) aponta larga variação de 0,003 a 3,3 cm/s, enquanto na pesquisa de Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) os valores de permeabilidade oscilaram entre 0,25 e 3,3 cm/s e Ibrahim *et al.*, (2014) obteve intervalo de 1,5 a 2,82 cm/s.

A divergência, principalmente nos valores apresentados por Kia, Wong e Cheeseman (2017), pode ter relação com a conclusão obtida por Xie, Akin e Shi (2019): a permeabilidade quando testada pode ser até dez vezes menor que a situação real. E, conforme Lin *et al.*, (2016), há redução da permeabilidade do pavimento à medida que o período de serviço aumenta. Por outro lado, Shu *et al.*, (2011) explica que se o concreto permeável for adequadamente projetado e testado em laboratório, é possível que os requisitos de desempenho de permeabilidade, resistência e durabilidade sejam alcançados *in loco*.

5.2. Índice de Vazios

O índice de vazios, conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015), é a relação entre quantidade de sólidos e vazios da amostra, relacionado a permeabilidade e resistência do material. Quanto maior o índice de vazios e conseqüentemente a permeabilidade do material, menor a resistência aos esforços (DEO; NEITHALATH, 2011; BHUTTA; TSURUTA; MIRZA, 2012; IBRAHIM *et al.*, 2014; VIEIRA *et al.*, 2018; TAHERI *et al.*, 2020). Estudos indicam diferentes percentuais de índice de vazios na mistura para cada estudo desenvolvido, como evidencia a Tabela 1.

Tabela 1 – Variabilidade do índice de vazios em diferentes pesquisas.

	Variação de índice de vazios
Tênis, Leming & Akers (2004)	15% a 25%
ACI (2010)	15% a 30%
Bhutta, Tsuruta & Mirza (2012)	15% a 35%
Yahia & Kabagire (2014)	15% a 35%
Eisenberg <i>et al.</i> (2015)	Aproximadamente 20%

Conforme Kia, Wong e Cheeseman (2017), a estrutura dos poros relaciona-se a variáveis, como: quantidade de pasta de cimento, volume e forma geométrica dos agregados, fator água/cimento e resistência à compressão. E, um percentual acima de 35% implica em concreto com alta permeabilidade, mas pouco resistente (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). A Figura 1 apresenta a correlação entre permeabilidade e índice de vazios realizada por Kia, Wong e Cheeseman (2017).

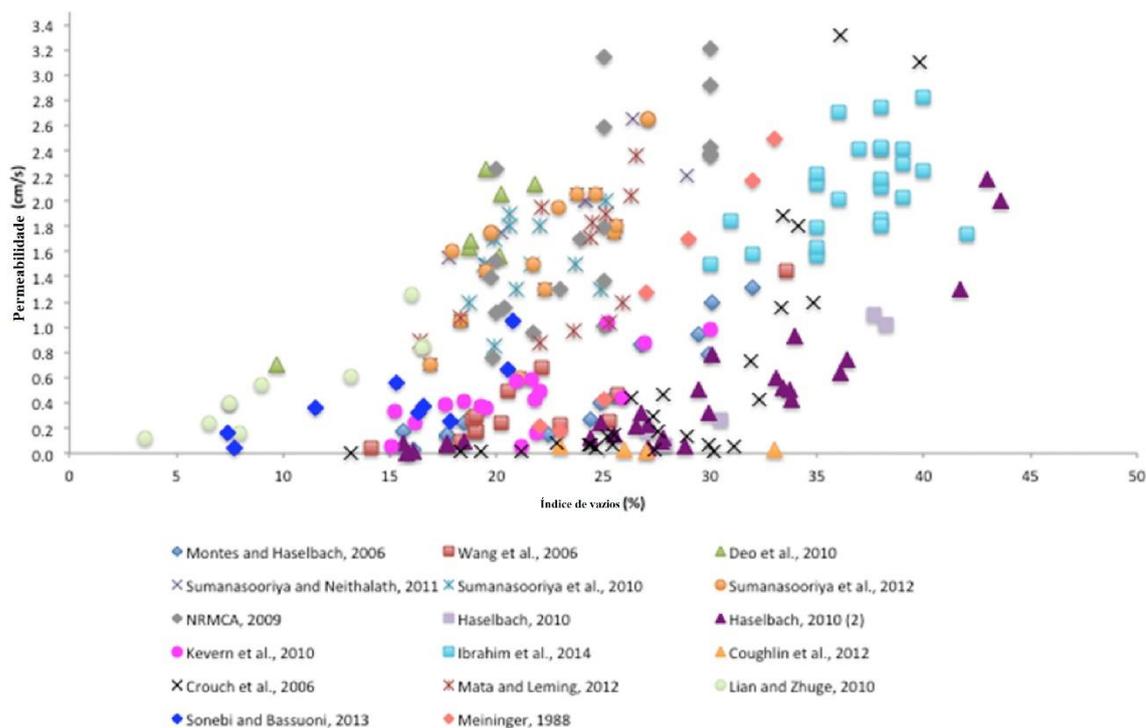


Figura 1 – Correlação entre permeabilidade e índice de vazios para ampla gama de concretos permeáveis relatados na literatura.
Fonte: Adaptado de Kia, Wong e Cheeseman (2017).

Todavia, utilizar o índice de vazios como único parâmetro para estipular o percentual de permeabilidade não é eficaz, pois relações semelhantes na estrutura dos poros não implica necessariamente no mesmo desempenho no fator k (XIE; AKIN; SHI, 2019). O estudo de Xie, Akin e Shi (2019) aponta que a porosidade efetiva é determinante para as propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável – denomina-se porosidade efetiva os vazios que transportam água através do material (IBRAHIM *et al.*, 2014).

Entretanto, segundo Zhong *et al.*, (2016), a porosidade efetiva também é insuficiente para estabelecer as condições do parâmetro k e, portanto, propõe relacionar condutividade hidráulica e tortuosidade dos poros para obter adequadamente trabalhabilidade, tamanho do agregado e ligante. Características também estudadas por Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012), segundo os quais a redução do tamanho do agregado e a adição de agentes coesivos representam aumento da trabalhabilidade pela elevação de viscosidade na pasta de cimento e, conseqüentemente, menores índices de vazios.

5.3. Resistência à compressão

A resistência à compressão tem intrínseca relação com as proporções de agregados e pastas de cimento utilizadas na mistura, pois permitem estimar as capacidades de absorção de energia em concretos permeáveis (DEO; NEITHALATH, 2011; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017; AVINASH; REDDY; VIVEK, 2018). Isso porque a resistência é dependente da porosidade, e esta é vinculada ao tamanho, composição química e forma do agregado (IBRAHIM *et al.*, 2014). Inclusive, conforme Ibrahim *et al.*, (2014), a alta porosidade é o que define a baixa resistência à compressão do concreto permeável em comparação com o concreto convencional.

Elementos alternativos estão sendo estudados e Taheri *et al.*, (2020) substituiu agregado grosso por 8% de areia. O resultado, ao aumentar a relação água/cimento, foi a redução da porosidade e permeabilidade da amostra, mas elevado desempenho quanto a resistência à compressão. A queda de permeabilidade neste estudo pode ser atribuída a menor consistência e conseqüentemente mais fácil a compactação.

A NBR 9781 (ABNT, 2013) estipula que o concreto permeável tenha resistência à compressão superior a 20 MPa e, segundo Ibrahim *et al.*, (2014), para obtenção dessa resistência é essencial otimizar a estrutura de poros, influenciando também a permeabilidade. Como não há restrição do método, conforme Tênis, Leming e Akers (2004), a resistência à compressão varia de 3,4 MPa a 27,5 MPa, de acordo as proporções dos materiais, englobando uma margem que não atende as proposições da NBR 9781 (ABNT, 2013).

Os resultados podem ser justificáveis pela análise realizada por Kia, Wong e Cheeseman (2017), que relacionam aspectos de porosidade e resistência à compressão do concreto permeável e verificam que a resistência média sofre a redução de 3%, quando o percentual de vazios é elevado em 1%, e dificulta a obtenção de uma estrutura permeável altamente resistente com a utilização de materiais comuns e proporções específicas (YANG; JIANG, 2003).

Como esperado, quanto menor o tamanho do agregado e, conseqüentemente, aumento da área de contato, maior o suporte a carga (DEO; NEITHALATH, 2011; BHUTTA; TSURUTA; MIRZA, 2012). Portanto, a alternativa proposta por Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) é o uso de agentes coesivos e hidratação do cimento que resultam em resistência melhorada. O que corrobora com o resultado do trabalho de Deo e Neithalath (2011): a resistência à compressão é aproximadamente 25% inferior para as

misturas de baixo teor de ligante, em comparação com as misturas de alto teor de pasta submetidas a mesma tensão final, conforme Figura 2.

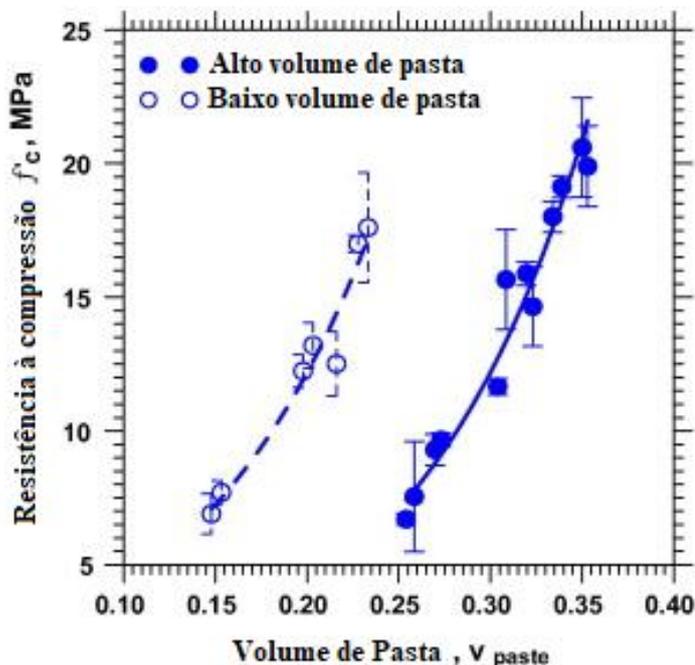


Figura 2 – Resistência à compressão e volume de pasta, para misturas de concreto permeável feitas com alto e baixo teor de pasta.

Fonte: Adaptado de Deo e Neithalath (2011).

No estudo de Khankhaje *et al.*, (2016) a resistência obtida é superior com oscilações que vão de 22 MPa a 39 MPa. E, com a inserção de superplastificante e sílica ativa, uso de agregados de menor tamanho e ajuste do cimento, a pesquisa de Yang e Jiang (2003) apresenta resistência à compressão de 50 MPa.

5.4. Resistência à tração na flexão

A NBR 12142 (ABNT, 2010) estabelece que a resistência à tração na flexão nos concretos permeáveis deve ser maior que 2 MPa, sendo que para alcançar essa resistência, normalmente reforça-se a matriz cimentícia com fibras (PILS *et al.*, 2019). A Figura 3 apresenta como as macrofibras agem nas fissuras na tração na flexão. Devido a sua estrutura porosa o concreto permeável apresenta a resistência à flexão inferior ao concreto convencional. No estudo de Tênis, Leming e Akers (2004), a resistência variou de 1,0 MPa a 3,4 MPa, enquanto na pesquisa de Yang e Jiang (2003), devido aos aditivos, a resistência alcançou 6 MPa.

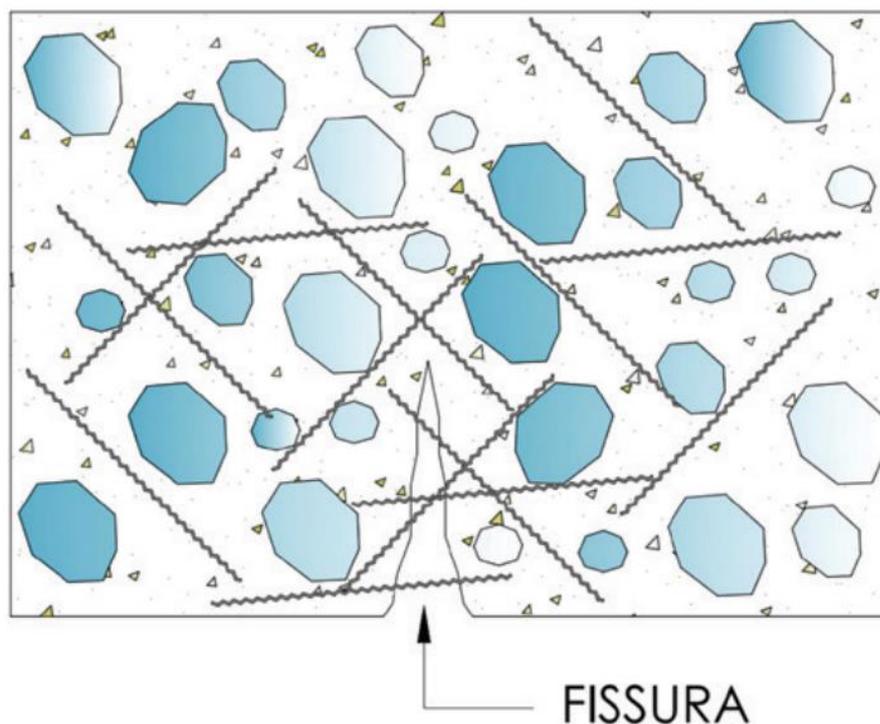


Figura 3 – Macrofibras agindo na região da fissura na tração na flexão.
Fonte: PILS *et al.* (2019).

Pils *et al.* (2019) verificou, após experimentos com fibras de polipropileno, que conforme as fibras eram adicionadas, a amostra aumentava a resistência à tração na flexão. Isso porque as macrofibras agem de forma similar a uma armadura, agindo especificamente na área fissurada. Complementarmente, AlShareedah (2019) concluiu que ao aumentar a dosagem de compósitos de fibra de carbono curada nas amostras de concreto permeável, era perceptível melhor desempenho na resistência à flexão e à tração. Foram relatados também, vantagens na inserção de fibras de celulose na dosagem do concreto permeável, como: acréscimo de resistência à tração, a abrasão e ao congelamento-degelo (AMDE e ROGGE, 2013).

5.5. Durabilidade

A durabilidade é um indicativo de sustentabilidade, independentemente do tipo de pavimento. A durabilidade no concreto permeável depende da adequada finalidade, desde aspectos de design e fabricação, como também manutenção preventiva (XIE; AKIN; SHI, 2019).

Conforme Chopra *et al.* (2010), um pavimento permeável pode ter o tempo de serviço estimado entre 6 e 20 anos, chegando ao fim da vida útil por causa do entupimento dos poros, enrocamento excessivo da superfície e/ou desgaste por congelamento-degelo. No entanto, trabalhando as deficiências do material em relação aos aspectos de durabilidade, estima-se que estes podem alcançar tempo de vida útil de 20 a 30 anos (GOEDE; HASELBACH, 2012).

Como alternativa para ampliar a vida útil do concreto permeável tem-se o uso de Air-Entraining Admixture, acréscimo de ligante, inserção de fibras de polipropileno ou fumaça de sílica na mistura (YANG; JIANG, 2003; SHU *et al.*, 2011). Em contrapartida, apesar das perspectivas favoráveis em relação ao aumento da durabilidade, a busca por alternativas para maximizar a vida útil esbarra na composição de dosagens e aditivos que implicam prejuízos a outras propriedades.

Medidas sustentáveis podem ser tomadas para aumentar a viabilidade econômica do concreto permeável, como a substituição dos agregados por conchas esmagadas para a produção do concreto permeável não é uma opção para diferentes fins, pois implica em estrutura mais porosa e, conseqüentemente, lixiviação do material, podendo ser aplicável somente em pavimentos de baixa carga de tráfego (NGUYEN, 2017). A mesma premissa serve para o estudo de Schackow *et al.*, (2020), o qual substituiu a pasta de cimento por 5 a 10% de resíduos da indústria de papel, aplicando o material somente em locais que permitam a baixa resistência à compressão.

5.6. Fatores que Influenciam no Desempenho

O controle de qualidade na fabricação do concreto permeável deve ser rigoroso, a fim de manter a proporção da mistura ao ponto de a pasta ser capaz de agregar todas as partículas e, ao mesmo tempo, formar uma estrutura aberta com propriedades adequadas de resistência e permeabilidade (XIE; AKIN; SHI, 2019) – problemática como o alto teor de cimento na mistura pode ocasionar obstrução na camada inferior (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

Por outro lado, deve ocorrer o monitoramento da inserção de água porque a umidade absorvida pelo agregado ou o excesso desta na mistura afeta o desempenho final do concreto permeável (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017; XIE; AKIN; SHI, 2019).

Kia, Wong e Cheeseman (2017) explicam que o teor de umidade agregada deve ser contabilizado no projeto e, ao realizar o procedimento de fabricação do concreto permeável, ajustes devem ser feitos para compensar a variabilidade da umidade.

Conforme o ACI (2010), quando o agregado está seco, o problema está relacionado a sua trabalhabilidade nos processos de montagem da estrutura, como na compactação. E, quando úmido pode obstruir os vazios do concreto, uma vez que contribui para a drenagem da pasta – fatores que relacionam a porosidade e permeabilidade como reflexo da relação água/cimento (SAHDEO *et al.*, 2020).

Por se tratar de um material permeável, a pasta de cimento não pode preencher a área total entre as partículas, pois descaracterizaria uma das principais funcionalidades do concreto permeável: a percolação da água nos espaços vazios da estrutura (YANG; JIANG, 2003). Portanto, a relação agregado/cimento é o que propicia tal porosidade e, apesar de ser proposta pelo ACI (2010) na proporção 4 a 4,5:1 (kg/m³), depende da finalidade e comportamento esperado, com a realização de ensaios para estabelecer proporções adequadas (ACI, 2010).

Yahia e Kabagire (2014) desenvolveram uma metodologia que considera o índice de vazios entre partículas o elemento chave para determinar a quantidade de pasta de cimento que deve ser utilizada, a fim de atender propriedades específicas. Uma relação obtida como ideal, considerando aspectos mecânicos e hidráulicos, foi utilizar um volume de pasta correspondente a 50% do índice de vazios. Analisando os extremos, tem-se que: um volume de pasta maior que 60% dos poros implica em permeabilidade muito baixa, enquanto um volume de pasta menor que 20% é insuficiente para garantir coesão.

A estrutura do concreto permeável constituída por poros abertos atua de forma relevante no desempenho do material (WEN *et al.*, 2020). Isso porque o controle de permeabilidade tem relação com a fração volumétrica, a estrutura topológica dos poros e a distribuição de tamanhos (SANSALONE *et al.*, 2008). Complementarmente, conforme Yahia e Kabagire (2014), a estrutura dos poros e a sua interconectividade é influenciada pelo tipo, tamanho e graduação do agregado, volume de pasta e energia de compactação.

O tamanho das partículas utilizadas na composição do concreto permeável determina as propriedades do material, seja porosidade, índice de vazios, resistência etc., e influencia outras características, como absorção de ruído (XIE; AKIN; SHI, 2019). Kia, Wong e Cheeseman (2017) descrevem que o uso de agregados graúdos implica em maiores poros e considerável permeabilidade. Por sua vez, o uso de agregados menores na mistura contribuiria para o aumento do número de partículas agregadas em um dado

volume de concreto, resultando em maior área de ligação e alta resistência do material (YANG; JIANG, 2003; ACI, 2010; YAHIA; KABAGIRE, 2014).

No entanto, conforme Sahdeo *et al.*, (2020), o concreto permeável caracteriza-se pelo uso de partículas de maiores dimensões e essas apresentam deficiências frente a determinadas propriedades, por isso, Kevern *et al.*, (2005) desenvolveram um estudo no qual adicionaram porção de látex ou areia no processo de fabricação para que, em conjunto com os agregados, resultassem na manutenção da permeabilidade e potencialização da resistência.

Conforme o estudo de Lins e Barreto (2019), através da mesma composição é possível a produção de concreto permeável para diferentes aplicações, alterando somente o tipo de aditivo. O uso de aditivos químicos contribui para a maximização do desempenho das propriedades do concreto permeável, seja para retardar ou estabilizar a hidratação. Além desses, utilizam-se materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes e escórias (ACI, 2010) – e nesse sentido, diversas pesquisas se desenvolvem. Por exemplo, a adição de agente coesivo à mistura do concreto poroso de alto desempenho reduz o índice de vazios e, conseqüentemente, a permeabilidade, mas eleva consideravelmente a resistência à compressão e flexão (BHUTTA; TSURUTA; MIRZA, 2012).

O relato de Yang e Jiang (2003) é similar. Os autores desenvolveram uma mistura mineral fina com a inserção de intensificador orgânico (polímeros com boas propriedades de ligação), que resultaram em melhora na microestrutura e na resistência do ligante pela aglutinação da pasta de cimento ao agregado.

O processo de fabricação do concreto permeável engloba um conjunto de fatores que influenciam no desempenho do material: transporte, compactação e cura. O transporte do material, por possuir quantidade menor de água em comparação ao concreto convencional, deve ser rápido e não pode exceder 60 minutos entre o local de fabricação e o local que será utilizado para pavimentação (TÊNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A energia de compactação determina a durabilidade, resistência e permeabilidade do concreto permeável, evitando fissuras no pavimento (TÊNIS; LEMING; AKERS, 2004; XIE; AKIN; SHI, 2019; TAHERI *et al.*, 2020). O equilíbrio deve existir, pois, a compactação excessiva pode implodir a estrutura de vazios (YANG; JIANG, 2003). E, na etapa de cura, Tênis, Leming e Akers (2004) explicam que se deve evitar a perda de água em excessos, utilizando uma lona plástica sobre o material. A estrutura aberta do concreto permeável apresenta maior susceptibilidade a danos provenientes da cura

inadequada, em comparação com o concreto convencional (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

Gupta (2014) conduziu um estudo com 2 baías que foram liberadas prematuramente ao tráfego aos 7 dias e aos 14 dias. Os resultados consistiram na perda uniforme de agregados, deslocamento do material e algumas partes do pavimento tiveram redução na capacidade de percolação por causa do entupimento.

5.7. Processo de colmatação

Conforme Boogaard, Lucke e Beecham (2014), as taxas de infiltração de sistemas de pavimentos permeáveis recém-instalados são extremamente altas. Contudo, os pavimentos permeáveis sofrem naturalmente com o entupimento dos poros pela deposição de partículas sólidas, reduzindo ou eliminando a sua capacidade drenante. Esse processo é denominado de colmatação e ocorre principalmente pela obstrução dos poros por sedimentos provenientes da abrasão da superfície do pavimento permeável, matéria orgânica e o transporte de materiais pelo tráfego (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). A Figura 4 apresenta como o ciclo de obstrução dos poros e limpeza afeta a permeabilidade do concreto permeável.

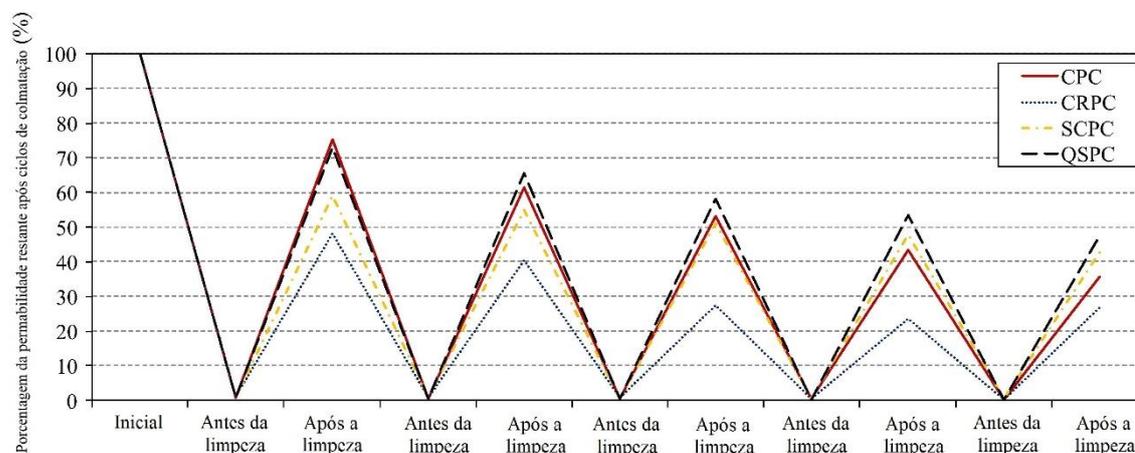


Figura 4 – Percentual de mudança de permeabilidade restante com o número de repetições de entupimento em comparação com a permeabilidade inicial antes do teste de entupimento.

Fonte: Adaptado de Nguyen (2017).

O processo de colmatação no concreto permeável acontece com o entupimento dos vazios comunicantes e queda de permeabilidade, sendo que o padrão de deposição das partículas varia conforme a natureza do material sedimentado e as propriedades do

pavimento (SANDOVAL, 2020). Conforme Scholz e Grabowiecki (2007), os pavimentos de asfalto permeável ou pavimento de concreto permeável são susceptíveis a colmatação completa a um período de 3 anos após a instalação, caso não seja realizado o procedimento de limpeza.

As principais partículas responsáveis pelo processo de colmatação são: lodo, areia e argila provenientes de áreas próximas; desgaste superficial da camada superior ou pavimentos próximos; detritos presentes ou transportados e depositados pelos veículos. A colmatação causada pela infiltração de material particulado com a água da chuva, segundo alguns autores, apresentam um padrão de deposição conforme a sua granulometria do sedimento, velocidade de escoamento horizontal e velocidade de escoamento vertical (HASELBACH; VALAVALA, 2006; NGUYEN *et al.*, 2017).

Zhang *et al.*, (2018a) realizaram um estudo para avaliar o mesomecanismo de entupimento interno do concreto permeável provocado por areia de diferentes granulometrias. Para a realização dos ensaios utilizaram esferas transparentes de poliacrilato de sódio no lugar dos agregados convencionais do concreto permeável. Assim, com o uso de uma câmera foi possível observar e determinar diretamente os efeitos da porosidade do concreto poroso, velocidade do escoamento horizontal, velocidade de infiltração e distribuição do tamanho de partículas no desenvolvimento de entupimentos com o tempo, taxa de desenvolvimento de obstrução e distribuição de partículas no estado de obstrução. Os resultados da pesquisa demonstraram quatro estágios da colmatação, sendo o entupimento rápido, recuperação parcial, entupimento lento e estabilidade de entupimento e que a maior parte da profundidade de entupimento é limitada aos 30 mm superiores, e em casos mais raros pode atingir até 100 mm abaixo da superfície.

Uma pesquisa recente realizada por Razzaghmanesh e Borst (2018), buscou avaliar o pavimento permeável intertravado de concreto permeável de um estacionamento com 80 vagas em uma escola. O pavimento foi monitorado com doze refletômetros de conteúdo de água e três pluviômetros enterrados, com isso foi possível observar uma metodologia capaz de determinar o tempo de infiltração da precipitação e a velocidade de colmatação dos pisos em escala não acelerada. Os resultados indicaram que a cada 6 mm de chuva, o entupimento avançava 1 mm na superfície. Assim, os autores recomendaram que o procedimento de limpeza ocorra quando a frente de colmatação atingir 75% ou quando o estágio de transição começar, visto que potencialmente a colmatação progredirá

mais rapidamente após esse ponto. Portanto, o concreto permeável tende a reduzir a sua capacidade de infiltração, mas é possível restaurar as altas taxas de infiltração usando aspiração, viabilizando a sua aplicação com boa condutividade hidráulica, mesmo após anos de serviço (BOOGAARD; LUCKE; BEECHAM, 2014).

A redução da capacidade de infiltração do concreto permeável é uma das principais barreiras para ampliar a sua aplicação (XIE; AKIN; SHI, 2019). A vida útil do concreto permeável está diretamente relacionada com sua capacidade drenante e, conseqüentemente, o tempo até a colmatação completa.

Ao descrever numericamente o mecanismo de colmatação considerando a porosidade, a distribuição do tamanho dos sedimentos, a velocidade de escoamento superficial e a velocidade de infiltração, Zhang *et al.* (2018b) observaram que o movimento secundário dos sedimentos de areias bem graduadas são capazes de percorrer a profundidade de 30 mm, areias grossas tendem a se fixar na superfície rasa, com profundidade estimada de 20 mm, e areias finas aprestaram a possibilidade de percorrer de 60 a 100 mm de profundidade em pavimentos permeáveis.

5.8. Métodos de análise da colmatação

A colmatação do concreto permeável é um processo gradual que ocorre ao longo de vários anos e provoca a redução da capacidade de infiltração de água, podendo ser o fator limitante para a vida útil do pavimento permeável. Atualmente não há uma metodologia normatizada específica para avaliar o entupimento dos poros, seja em campo ou em laboratório. Contudo, alguns autores têm proposto a avaliação da colmatação em campo por meio de dados históricos da permeabilidade, ou ensaios acelerados com amostras sobre condições extremas de entupimento.

A permeabilidade em campo pode ser determinada através de ensaios que definem o coeficiente de permeabilidade por meio de testes de infiltração, geralmente expressados em $m\ s^{-1}$ ou $mm\ s^{-1}$. Dentre os principais métodos de ensaios de permeabilidade em campo normatizados e empregados em pavimentos permeáveis estão a NBR 16416 (ABNT, 2015), o método C1701 da Sociedade Americana de Ensaios e Materiais (ASTM), o método ASTM D3385 e o método desenvolvido pelo National Center for Asphalt Technology (NCAT). Ao comparar as diferentes metodologias dos ensaios de permeabilidade, Zhao *et al.* (2019) observaram diferença máxima de até 23% na taxa aparente de infiltração e indicaram que as amostragens *in situ* devem ser feitas

preferencialmente com dois anéis de infiltração, em especial para pavimentos parcialmente entupidos, pois o uso de um único anel pode superestimar a infiltração vertical por causa da percolação horizontal e, assim, o uso do segundo anel justificaria com a saturação do solo circundante (DOUGHERTY, 2011).

Os ensaios em campo permitem avaliar em escala de tempo real quais são os processos de colmatção. Assim, os estudos geralmente têm tempo maior de duração do que os realizados em laboratórios e são feitos com base em ensaios periódicos de permeabilidade. Contudo, as medições em campo apresentam grande variação da permeabilidade dentro de um mesmo estacionamento, se comparados a outros. Como relata Kayhanian *et al.* (2012), após mensurar as características físicas, hidrológicas e permeabilidade de 20 pavimentos na Califórnia (Estados Unidos), a variabilidade do coeficiente de permeabilidade em áreas de tráfego pode ser atribuída ao fluxo de trânsito presente em cada região, a massa de partículas finas inferiores a 38 μm , a quantidade de vegetação próxima e o número de dias com temperatura superior a 30°C, pois influenciam na deposição da borracha dos pneus.

O processo de colmatção ocorre em taxas diferentes dentro de uma mesma pista de testes (ZHAO *et al.*, 2020). Com o objetivo de quantificar a essa redução de permeabilidade nas diferentes zonas de um estacionamento provocadas pelas variações do fluxo de veículos e cargas estáticas dos pneus, Sañudo-Fontaneda *et al.* (2014) realizaram a divisão de nove vagas em quatro pontos sob as rodas de um veículo padrão e cinco pontos intermediários, para verificar esta hipótese. A redução da capacidade de infiltração após cinco anos de uso do estacionamento variou entre 65,62 % e 87,62 % com média de 79,43% confirmando a hipótese, sendo que a zona 2 obteve a menor perda de permeabilidade e a região 6 a maior. No entanto, a permeabilidade continuou suficientemente alta para ser considerado ainda no estágio inicial da sua vida útil.

O estudo elaborado por Boogaard, Lucke e Beecham (2013), na avaliação de 55 pavimentos permeáveis com idade de 1 a 12 anos, localizados na Holanda e Austrália, usando um infiltrômetro de anel único ou duplo modificado para avaliar a variação de permeabilidade, observou que os pavimentos tendem a seguir uma curva hipotética de decaimento da taxa de infiltração com a idade do pavimento. Este estudo indica que a queda de infiltração foi ocasionada pela combinação ainda indeterminada de práticas de construção, periodicidade da manutenção e entupimento gradual por sedimentos. A pesquisa reconheceu também a possibilidade de restauração de altas taxas de permeabilidade empregando a técnica de aspiração na limpeza do pavimento.

As análises em laboratório do potencial de colmatção são geralmente realizadas através da exposição de amostras a condições extremas de entupimento ou ensaios de Tomografia computadorizada (CT) por raios-X. Um novo método para determinar a colmatção foi desenvolvido recentemente por Kia, Wong e Cheeseman (2018). O ensaio consistiu em utilizar o aparato apresentado na Figura 5 e um fluxo de água com areia e/ou argila em vários ciclos medindo a permeabilidade. Ao relacionar as amostras, verificou redução significativa na permeabilidade em todos os ensaios, em especial quando expostas à areia e argila simultaneamente.

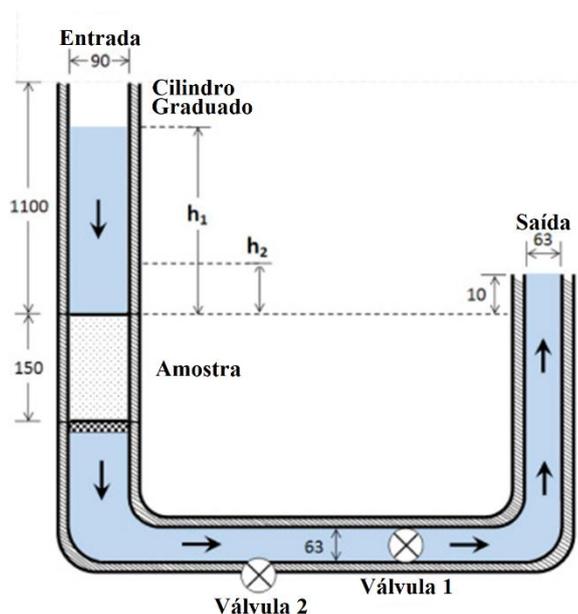


Figura 5 - Aparato utilizado para medir a colmatção, com as dimensões em milímetros.
Fonte: Adaptado de Kia, Wong e Cheeseman (2018).

A velocidade que ocorre a colmatção é influenciada principalmente pela proporção entre o tamanho da partícula e o diâmetro dos poros do concreto permeável. Zhou *et al.* (2019) indica que a proporção crítica está entre 0,6 e 0,8 com sedimentos de granulometria uniforme, conforme os resultados das aplicações da tomografia computadorizada e a análise do processamento da imagem para estudar o processo de colmatção das amostras de concreto permeável.

A possibilidade de entupimento do concreto permeável por eventos catastróficos, como falhas nas medidas de controle de erosão a montante ou inundação levou Haselbach (2010) a estudar e simular as consequências desse fenômeno em laboratório, em que foram extraídas amostras em campo e realizados ciclos de entupimento usando argila

bentonita e caulinita. Após a realização de alguns ciclos de entupimento foi observado a formação de uma camada na superfície e posteriormente rachaduras durante a secagem. Assim, posteriormente com o procedimento de limpeza simples, como varredura, é possível a recuperação da permeabilidade próximo ao valor inicial.

5.9. Limpeza e Restauração

O processo de limpeza do pavimento permeável é normatizado pela NBR 16416 (ABNT, 2015) em 4 (quatro) etapas: utilizar métodos mecânicos ou manuais para retirar resíduos da superfície do pavimento; utilizar jato de água para lavagem da área; remover partículas usando equipamento de sucção; se necessário, realizar o rejuntamento. Além disso, é expressamente proibido o uso de água contaminada e/ou produtos químicos para realizar o procedimento de limpeza.

Uma forma preventiva de limpeza é a instalação de um material geotêxtil entre as camadas da estrutura para evitar o entupimento dos poros devido a movimentação de materiais (ACIOLI, 2005; VIRGILIIS, 2009). Quanto a restauração do pavimento, uma das técnicas utilizadas é a fresagem. Winston *et al.* (2016) testou diferentes profundidades de fresagem e obteve resultados significativos numa determinada estrutura porosa. Identificou que ao se elevar a profundidade da fresagem, restaurava-se a permeabilidade a taxas similares aos pavimentos recém-instalados.

Além das análises, Kia, Wong e Cheeseman (2018) têm estudado um concreto permeável resistente ao entupimento, no qual as amostras com microporos formam condutos verticais, que reduziria a dependência a métodos de manutenção. Além de conter características de permeabilidade e porosidade que o acompanharão durante a vida útil, as amostras apresentam alta resistência à compressão.

Carls, Becker e Pinheiro (2018) analisaram diversos métodos de limpeza do pavimento permeável, indicados pela NBR 16416 (ABNT, 2015), para verificar qual apresentava maior eficiência no processo. As opções com melhores resultados foram a aspiração e a lavagem sob pressão. Sendo que, a junção dos métodos maximiza o desempenho na limpeza. Conforme o estudo de Chopra *et al.* (2010), a lavagem sob pressão apresenta melhor resultado na restauração do pavimento do que a varredura a vácuo e considerou a maneira mais eficiente combinar os dois métodos.

Winston *et al.* (2016) verificaram que a lavagem sob pressão restaurou a infiltração do pavimento de forma mais eficiente que aquelas com apenas aspiração.

Também analisou os varredores de rua e, tanto o mecânico quanto o de ar regenerativo e caminhão a vácuo apresentaram resultados significativos nos testes pós-manutenção, com destaque para as varrições que empregam sucção. E, novamente constatou-se aprimoramento do processo ao utilizar diferentes métodos de varrição em uma mesma área (WINSTON *et al.*, 2016).

Para Hu *et al.* (2020), todos os métodos de manutenção podem restaurar a permeabilidade do pavimento, desde que aplicados especificamente a certas fases de entupimento. E, após análises, verificaram que a eficiência da lavagem sob pressão é superior a da varredura somado a sucção a vácuo. Além da combinação de lavagem sob pressão e sucção a vácuo apresentarem o melhor efeito.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece que sempre que a situação implicar em comprometimento da qualidade mecânica ou hidráulica do pavimento, deve ser submetido a manutenções. O processo deve consistir no uso dos mesmos tipos de materiais formadores do pavimento original. Um dos parâmetros de frequência apresentado pela norma é o desempenho de permeabilidade do pavimento, atendendo aos requisitos de projeto. Ou seja, a partir do momento em que a permeabilidade for menor que 10^{-5} m/s, deve ocorrer limpeza para recuperação do desempenho (ABNT, 2015).

Para Chu e Fwa (2019), a frequência da manutenção é influenciada pelo uso e intensidade do tráfego e uso do solo circundante. Portanto, pode ocorrer a adoção de diferentes estratégias de monitoramento e diferentes critérios de manutenção. As principais abordagens para determinar a frequência de manutenção são: cronograma fixo, até mesmo de forma preventiva, ou baseado no desempenho de permeabilidade (CHU; FWA, 2019).

Para Virgiliis (2009) a manutenção do pavimento deve ocorrer de forma constante e, conforme levantamento, as verificações de permeabilidade devem ter início após um período de 4 a 5 meses da instalação. O estudo de Hu *et al.* (2020) aponta uma frequência de manutenção de 2 a 5 vezes por ano, enquanto Acioli (2005) aborda uma periodicidade de manutenção do pavimento poroso com variabilidade de 6 meses a 2 anos.

Razzaghmanesh e Borst (2018) analisaram a dinâmica de entupimento do pavimento permeável intertravado de concreto permeável utilizando sensores e obtiveram que, a partir do instante em que a obstrução atingir os 75% da largura do pavimento, uma manutenção deve ser agendada devido a rápida progressão da problemática após esse ponto. E, Winston *et al.* (2016) explicam que para manter a taxa de infiltração do concreto

permeável de acordo com o desejado, é provável o aumento na frequência de manutenção no decorrer do tempo.

Conforme Acioli (2005), os custos para manutenção do pavimento permeável variam de médio a alto em comparação com o pavimento convencional. Além disso, segundo Hu *et al.* (2020), deve-se analisar o custo dos métodos de manutenção para escolha do mais adequado. A estimativa de custos do pavimento permeável pode considerar o tipo de equipamento, combustível, mão de obra e tempo disponibilizados para o processo.

Com base no sistema de preços local, Hu *et al.* (2020) verificou que a manutenção de maior preço associava a lavagem sob pressão (20 MPa) e a vácuo, custando 0,31 RMB/m², enquanto o custo somente da lavagem sob pressão (5 MPa) era de 0,14 RMB/m². Apesar do autor indicar alta frequência de manutenções, a utilização dos métodos ainda é viável frente a reconstrução do pavimento que custaria de 120 a 200 RMB/m².

Abreu e Miranda (2020) levantaram em seu estudo os custos para um pavimento permeável ao longo de 15 anos de vida útil e obtiveram o valor de manutenção padrão de R\$ 1,44/m² e, para a manutenção realizada anualmente de forma preventiva, o custo era de R\$ 1,00/m². Quando for o caso de uma restauração, processo que normalmente ocorre a cada 5 anos, tem-se a estimativa de R\$ 10,00/m².

De modo geral, Liu *et al.* (2020) consideraram um volume de tráfego para análise da viabilidade financeira do pavimento permeável e verificaram que este pode ser a solução ideal para alternativas de pavimento a longo prazo, pois, ao considerar um fluxo de 2000 a 10000 pcu, o pavimento permeável irá ter o custo de 26 a 27% maior em comparação com o pavimento convencional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Rafael S. A.; MIRANDA, Thiago V. O uso do pavimento permeável como medida auxiliar na drenagem das cidades. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 05, ed. 04, vol. 03, p. 52-74, 2020.

ACIOLI, Laura A. Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ALSHAREEDAH, Othman; NASSIRI, Somayeh; CHEN, Zhao; ENGLUND, Karl; LI, Hui; FAKRON, Osama. Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 10, 2019.

AMDE, A. M.; ROGGE, S. Development of high quality pervious concrete specifications for Maryland conditions. State Highway Administration, University of Maryland. Project number: SP009B4F, 127 p., 2013.

American Concrete Institute (ACI). Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522. Report number: ACI 522R-10, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete**. ACI Committee 522, Farmington Hills, Michigan, 2010.

ARAÚJO, D. C. DE *et al.* Multicriteria analysis applied to the management of urban pluvial waters. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 0, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 5 p., 2010.

_____. **NBR 12042: Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão**. Rio de Janeiro, 5 p., 2012.

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

_____. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 26 p., 2013.

ASTM C 1701 / C 1701M-09. Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. American Society for Testing and Materials, USA, 2009.

ASTM C 3385-03. Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. American Society for Testing and Materials, USA, 2003.

AVINASH, L.; REDDY, P. A.; VIVEK, S. S. Study on strength characteristics of pervious concrete using mineral admixtures. **International Journal of Engineering & Technology**, vol. 7, nº 3.12, p. 612-615, 2018.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, vol. 31, p. 67-73, 2012.

BOHNENBERGER, J. C. *et al.* Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 299–311, 2018.

BOOGAARD, Floris; LUCKE, Terry; BEECHAM, Simon. Effect of age of permeable pavements on their infiltration function. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 42, n. 2, p. 146-152, 2014.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 51–67, 2016.

CARLS, Bruna; BECKER, Nayara; PINHEIRO, Ivone G. Manejo de águas urbanas com pavimento de concreto permeável: métodos de dosagem e técnicas de manutenção. **Revista Educação Ambiental em Ação**, n. 66, ano XVII, 2018.

CHOPRA, M. A.; KAKUTURU, A. S.; BALLOCK, A. C.; SPENCE, A. J.; WANIELISTA J. Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements. **J. Hydrol. Eng.**, vol. 15, 6 ed, p. 426 – 433, 2010.

CHU, L.; FWA, T. F. Evaluation of surface infiltration performance of permeable pavements. **Journal of Environmental Management**, vol. 238, p. 136-143, 2019.

COSTA JUNIOR, L. L. DA; BARBASSA, A. P. Parâmetros de projeto de microrreservatório, de pavimentos permeáveis e de previsão de enchentes urbanas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 46–54, 2006.

DEO, O.; SUMANASOORIYA, M.; NEITHALATH, N. Permeability Reduction in Pervious Concretes due to Clogging: Experiments and Modeling. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 7, p. 741–751, 2010.

DEO, Omkar; NEITHALATH, Narayanan. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, vol. 25, ed 11, p. 4181-4189, 2011.

DOUGHERTY, Mark *et al.* Quick surface infiltration test to assess maintenance needs on small pervious concrete sites. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 8, p. 553-563, 2011.

EISENBERG, Bethany; LINDOW, Kelly C.; SMITH, David R. Permeable Pavements. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 262 p., 2015

FARIA, Andréia da C.; SANTANA, Juliana G.; BARBOSA, Jairo M.; DONATO, Marina. Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo na resistência. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú – SC, 2019.

GOEDE, Will S.; HASELBACH, Liv M. Investigation into the structural performance of pervious concrete. **J. Transport. Eng.**, vol. 138, p. 98-104, 2012.

GOMES, George W. *et al.* Avaliação do concreto permeável pela relação água/cimento em função da resistência mecânica e permeabilidade. 2º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil, Porto – Portugal, 2019.

GUPTA, Rishi. Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia – A pilot study. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 1, p. 1-9, 2014.

HASELBACH, Liv M. Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. **Journal of hydrologic engineering**, v. 15, n. 1, p. 67-69, 2010.

HASELBACH, Liv M.; VALAVALA, Srinivas; MONTES, Felipe. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of environmental management**, v. 81, n. 1, p. 42-49, 2006.

HU, N.; ZHANG, J.; XIA, S.; HAN, R.; DAI, Z.; ELA, R.; CUI, X.; MENG, B. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, vol. 263, 10 p., 2020.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, vol. 50, p. 524-529, 2014.

KAYHANIAN, Masoud *et al.* Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental management**, v. 95, n. 1, p. 114-123, 2012.

KEVERN, John; WANG, Kejin; SULEIMAN, Muhannad T; SCHAEFER, Vernon R. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. The 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames Iowa, United States, 11 p., 2005.

KHANKHAJE, Elnaz *et al.* Sustainable clean pervious concrete pavement production incorporating palm oil fuel ash as cement replacement. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1476-1485, 2018.

KHANKHAJE, Elnaz; SALIM, Mohd R.; MIRZA, Asma; HUSSIN, Mohd W.; RAFIEIZONOOZ, Mahdi. Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, vol. 126, p. 1054-1065, 2016.

KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

LIN, Wuguang; PARK, Dae-Geun; RYU, Sung W.; LEE, B.; CHO, Y. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. **Construction and Building Materials**, vol. 118, p. 20-26., 2016.

LINS, Luciana N.; BARRETO, Ana G. O. Avaliação da utilização de diferentes aditivos no concreto permeável para permitir mistura e transporte em caminhão betoneira. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 8, p. 12623-12655, 2020.

LIU; HUI; JIAWEN; WANG, L. Y.; ZHANG; HENGJI. Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, vol. 85, 20 p., 2020.

MIKAMI, Rafael J. *et al.* Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável. **Revista Matéria**, ISSN 1517-7076, v. 23, n. 03, 2018.

MOHAMMED, Bashar S. *et al.* Properties of nano-silica modified pervious concrete. **Case studies in construction materials**, v. 8, p. 409-422, 2018.

NCAT 99-1. Permeability of superpave mixtures: evaluation of field permeameters. National Center for Asphalt Technology, USA, 1999.

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

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da Permeabilidade e da Colmatação em Concretos Permeáveis produzidos com Agregado Reciclado de Concreto**. Campinas, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

PILS, S. E.; OLIVEIRA, P.; REGOSO, F.; PAULON, V. A.; COSTELLA, M. F. Concretos drenantes: estudo de dosagem e adição de fibras de polipropileno. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 12, n° 1, São Paulo, p. 101-121, 2019.

RAEESI, Ramin *et al.* Field Performance Monitoring of Waste Tire-Based Permeable Pavements. **Transportation Geotechnics**, p. 100384, 2020.

- RAMKRISHNAN, R.; ABILASH, B.; TRIVEDI, M.; VARSHA, P.; VARUN, P. VISHANTH, S. Effect of mineral admixtures on pervious concrete. **Materials Today: Proceedings**, vol. 5, ed. 11, parte 3, p. 24014-24023, 2018.
- RAZZAGHMANESH, Mostafa; BORST, Michael. Investigation clogging dynamic of permeable pavement systems using embedded sensors. **Journal of Hydrology**, vol. 557, p. 887-896, 2018.
- SAHDEO, Surya K.; RANSINCHUNG, G. D.; RAHUL, K. L.; DEBBARMA, S. Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures. **Construction and Building Materials**, vol. 255, 15 p., 2020.
- SANDOVAL, Gersson FB *et al.* Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118672, 2020.
- SANSALONE, J.; KUANG, X.; RANIERI, V. Permeable Pavement as a Hydraulic and Filtration Interface for Urban Drainage. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, vol. 134, ed. 5, p. 666-674, 2008.
- SANTOS, Igor Soares *et al.* Relação da Permeabilidade e Índice de Vazios em Concretos Permeáveis com Resíduo de Polimento de Pisos de Concreto. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 30391-30397, 2020.
- SAÑUDO-FONTANEDA, Luis A. *et al.* Field study of infiltration capacity reduction of porous mixture surfaces. **Water**, v. 6, n. 3, p. 661-669, 2014.
- SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; BARROS, V. G.; GOMES, I. R.; COSTA NETO, V. S.; DELANDRÉA, M. S. Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: Reduction of surface flow and possible applications. **Construction and Building Materials**, vol. 250, 11 p., 2020.
- SCHOLZ, Miklas; GRABOWIECKI, Piotr. Review of permeable pavement systems. **Building and environment**, v. 42, n. 11, p. 3830-3836, 2007.
- SHU, Xiang; HUANG, Baoshan; WU, Hao; DONG, Qiao; BURDETTE, Edwin G. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, vol. 25, ed 8, p. 3187-3192, 2011.
- SILVA, Andréia C.; BÁRBARA, Luíza S. S.; ANDRADE, Daniel S. Avaliação do desgaste por abrasão do concreto permeável com adições minerais altamente reativas. V Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão, Pirenópolis, Goiás, 2018.
- SOTO-PÉREZ, Linoshka; HWANG, Sangchul. Mix design and pollution control potential of pervious concrete with non-compliant waste fly ash. **Journal of environmental management**, v. 176, p. 112-118, 2016.
- SUMANASOORIYA, Milani S.; NEITHALATH, Narayanan. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 778-787, 2011.
- TAHERI, B. M.; RAMEZANIAN, A. M.; SABOKPA, S.; GAPELE, M. Experimental evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete. **Journal of Building Engineering**, 40 p., 2020.
- TÊNIS, P. D.; LEMING, M.L.; AKERS, D. J. Pervious concrete pavements. Technical Report, EB30202. Portland Cement Association, Skokie, and National Ready Mixed Concrete Associated, Silver Spring. p. 1-25, 2004.

VIEIRA, A. D. B.; SANTOS, J. R.; LAMBERTI, L. A.; CERVO, T. C. Utilização de fresado asfáltico como substituinte de agregados naturais na produção de concreto permeável para utilização em vias de tráfego leve. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, p. 1871-1880, Gramado – RS, nov. 2018.

VIRGILIIS, Afonso L. C. Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. 2009. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WEN, F. FAN, H.; ZHAI, S.; ZHANG, K.; LIU, F. Pore characteristics analysis and numerical seepage simulation of antifreeze permeable concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 255, 14 p., 2020.

WINSTON, R. J.; AL-RUBAEI, A. M.; BLECKEN, G. T.; VIKLANDER, M.; CAÇA, 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. **Journal of Environmental Management**, vol. 169, p. 132-144, 2016.

XIE, Ning; AKIN, Michelle; SHI, Xianming. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1605-1621, 2019.

YAHIA, Ammar; KABAGIRE, K. P. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 62, p. 38-46, 2014.

YANG, Jing; JIANG, Guoliang. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, 3 ed, p. 381-386, 2003.

ZHANG, J. *et al.* Experimental simulation study on pore clogging mechanism of porous pavement. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 803-818, 2018a.

ZHANG, J. *et al.* Numerical study on pore clogging mechanism in pervious pavements. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 589-598, 2018b.

ZHAO, Jinhui *et al.* Comparison of Field Infiltration Test Methods for Permeable Pavement: Towards an Easy and Accurate Method. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 47, n. 8, p. 1900174, 2019a.

ZHAO, Jinhui *et al.* Novel Backwashing Maintenance Method for Permeable Concrete Pavement: Two-Year Field Study. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 4, p. 04020003, 2020b.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 130-138, 2016.

ZHONG, Rui; XU, Man; VIEIRA NETTO, Roberto; WILLE, Kay. Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. **Construction and Building Materials**, vol. 125, p. 1158-1168, 2016.

7. CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DOS PISOS DE CONCRETO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS

(Artigo submetido à Revista Construction and Building Materials,
ISSN 0950-0618 – Qualis A1 - Fator de Impacto (2019): 4,419)

RESUMO

Com o aumento da ocorrência de enchentes em áreas urbanas, a adoção de pavimentos permeáveis tem se tornado cada vez mais vantajosa. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da adição de resíduo de polimento de piso de concreto (CFPW) no comportamento físico, mecânico e microestrutural do concreto permeável. Foram avaliadas três misturas diferentes: uma amostra de referência (CONTROL) determinada com base na revisão da literatura e dosada com agregados naturais, as outras duas com adição de 2% CFPW e 4% CFPW em relação à massa de cimento. Ao comparar as dosagens de 2% CFPW e 4% CFPW com a composição CONTROL, há, respectivamente, aumento na resistência média à compressão de 57,45% e 33,78% para 3 dias de cura e de 45,41% e 37,20% para 7 dias de cura. Para as amostras 2% CFPW e 4% CFPW, respectivamente, observou-se queda na permeabilidade de 51,8% e 20,0% e a redução no índice de vazios para 26,56% e 14,8%. Boa correlação ($R^2 = 0,863$) entre as resistências à compressão e à flexão foi determinada.

Palavras-chave: Desempenho Mecânico. Permeabilidade. Índice vazio. Sustentabilidade.

ABSTRACT

With the increase in the flood's occurrence in urban areas, the adoption of permeable pavements has become increasingly advantageous. In this context, the objective of this work was to evaluate the influence of concrete floor polishing residue (CFPW) addition on the physical, mechanical, and microstructural behavior of permeable concrete. Three different mixtures were evaluated: a reference sample (CONTROL) determined based on the literature review and dosed with natural aggregates, the other two with 2% CFPW and 4% CFPW addition in relation to the cement mass. When comparing the dosages of 2% CFPW and 4% CFPW with the CONTROL composition, there is, respectively, an increase in the average compressive strength of 57.45% and 33.78% for 3 days of curing and of 45.41% and 37.20% for 7 days of curing. For 2% CFPW and 4% CFPW samples, respectively, there was a drop in permeability of 51.8% and 20.0% and a reduction in the void index to 26.56% and 14.8%. A good correlation ($R^2 = 0.863$) between the compressive and flexural strengths was determined.

Keywords: Mechanical Performance. Permeability. Void index. Sustainability.

7.1. Introdução

A drenagem urbana nas cidades tem focado, na maioria dos casos, em medidas estruturais com o objetivo de drenar rapidamente as águas pluviais. No entanto, esse sistema, além de oneroso para o governo, tem a desvantagem de deteriorar a qualidade da água por causa do carregamento de resíduos em rios e lagos [1]. Como alternativa para reduzir custos e impactos ambientais, podem ser aplicados pavimentos permeáveis, que, segundo estudos recentes, são capazes de reduzir a velocidade do escoamento superficial e consequentemente contribuir para maior infiltração no solo. [2].

Nesse contexto, o concreto permeável permite a passagem desobstruída de grandes quantidades de água por seu alto índice de vazios interligados, permitindo o acúmulo ao lençol freático por percolação. No entanto, o concreto permeável é menos resistente mecanicamente que o concreto convencional por sua alta porosidade, tornando-

o adequado para pisos, pátios e outras plataformas de armazenamento de materiais, estacionamento ou tráfego de veículos [3-5].

Para melhorar a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto permeável, alguns autores indicam a adição de materiais com atividade pozolânica ou materiais com alta finura (filler)[6,7]. O melhor desempenho desses materiais, contendo essas adições, pode ser atribuído à nucleação dos produtos de hidratação, nos quais os vazios da matriz cimentícia são preenchidos; no entanto, o coeficiente de permeabilidade é geralmente baixo. Tais mecanismos contribuem para que a pasta presente no concreto permeável se torne mais densa e resistente, favorecendo o travamento da estrutura granular formada, apresentando melhor desempenho mecânico e reológico. [8].

Com relação à adição de materiais ao concreto, os resíduos de construção e demolição (RCD) têm sido amplamente estudados como material agregado para a produção de matrizes cimentícias. Ghorbani *et al.* [9] analisaram o efeito do tamanho do resíduo de concreto britado (diâmetro de 12,5, 20 e 25 mm) como substituto parcial do agregado graúdo natural nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto e obteve para as amostras estudadas com 12,5 mm de diâmetro e 25% de substituição média de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de 9,5%, 8,5% superior em relação à mistura de referência respectivamente. Zhi-hai He [10] mostrou a viabilidade da aplicação de pó residual de concreto derivado de resíduos de construção e demolição em concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) substituindo a sílica em até 30%.

Existem atividades na construção civil que geram resíduos de concreto em pó, como o processo de polimento de pisos de concreto. A quantidade de resíduo de polimento de piso de concreto (CFPW, sigla em inglês de *concrete floor polishing waste*) gerado depende do tipo de procedimento adotado para o polimento. Medições no local indicaram que para a superfície de 1,5 mm de espessura são gerados 9,5 kg de lodo por 1 m² polido e 4 kg de resíduo de pó seco, pois a quantidade de perda de massa após a secagem é significativa.

Assim, pesquisas voltadas para a redução do impacto ambiental gerado pelo CFPW podem levar à redução do volume de resíduos sólidos da construção civil em aterros sanitários, menor poluição do solo, das bacias hidrográficas e do ar por causa da contaminação promovida pelo resíduo que é considerado empoeirado. [11]. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação de resíduo de polimento de piso de concreto em concreto permeável e fornecer alternativa sustentável para o reaproveitamento do CFPW.

7.2. Material e Métodos

7.2.1. Materiais

Nesta pesquisa foi utilizada como agregado graúdo rocha britada de origem basáltica e dimensão característica máxima de 9,5 mm. A utilização deste agregado foi determinada por possuir maior número de pontos de contato por unidade de volume da estrutura granular, tendendo a favorecer a resistência mecânica.

A caracterização do agregado graúdo determinou as seguintes propriedades: massa unitária solta e compactada, volume vazio, massa específica, dimensão característica máxima, módulo de finura e distribuição granulométrica. Os ensaios foram realizados de acordo com os requisitos normativos da Norma Brasileira (NBR) [12–15]. Os dados de caracterização do agregado graúdo podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de caracterização do agregado graúdo.

Ensaio	Brita
Módulo de finura	2,14
Dimensão máxima	9,50 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

O resíduo de polimento de piso de concreto (CFPW) foi gerado no processo de lapidação dos pisos de galpões em construção. Após a coleta do CFPW (lodo), foi realizado um processo de secagem a 65°C por 72 horas em estufa de amostra e, em seguida, triturado em almofariz de porcelana, utilizando apenas o material que passou pela peneira de 150 µm. A preparação do resíduo para testes de laboratório teve como objetivo reduzir a heterogeneidade do material, evitar que a umidade presente no CFPW altere a relação água/cimento, menor variabilidade dos resultados e avaliar a hipótese de que alta finura proporcionará maior desempenho de a pasta [17,18].

As propriedades CFPW analisadas foram dimensão característica máxima, módulo de finura, massa específica e finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Os ensaios foram realizados de acordo com os requisitos normativos da NBR [15,19,20]. Ainda com o CFPW, avaliou-se a morfologia de sua superfície, a composição química e a perda ao fogo, e as análises morfológicas foram realizadas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para determinar as formas e textura dos grãos.

Após a secagem da amostra em estufa por 12 horas, sua composição química foi determinada pelo método de fluorescência de raios-X utilizando um espectrômetro WDS Bruker™ S8 Tiger, equipado com um Rh.

O ligante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (Tipo III) com as características apresentadas na Tabela 3. Os ensaios foram realizados de acordo com as prescrições normativas da norma brasileira [19–22].

Tabela 3 – Caracterização e tempo de pega do cimento.

Massa específica (kg/cm ³)	Área Superficial específica (cm ² /g)	Pasta de consistência normal	Tempo de pega	
			Início (min)	Fim (min.)
3030	3757	0,334	125	170

7.2.2. Composição de amostras de concreto

Com base na caracterização dos materiais, definiu-se a composição com consumo de cimento de 374,8 kg/m³ e relação massa de agregados/aglutinante de 4:1 (agregado: cimento), denominada composição de controle (CONTROL). Assim, após alguns testes iniciais, uma relação água/cimento de 0,3.

Para analisar a viabilidade do uso da adição proposta foram feitas outras duas composições de concreto permeável com adição de 2% e 4% de CFPW em relação à massa de cimento. Essas composições foram denominadas 2% CFPW e 4% CFPW, respectivamente. As amostras foram avaliadas quanto aos requisitos da NBR 16416 [16], que estabelece os valores mínimos para resistência à compressão (20 MPa), resistência à tração à flexão (2 MPa) e permeabilidade (1 mm/s). A Tabela 4 mostra as composições unitárias e a proporção em massa das amostras analisadas.

Tabela 4 – Composição unitária e proporção em massa das amostras analisadas.

Composição	Cimento	CFPW	Brita	água/cimento
CONTROL	1	----	4	0,30
2% CFPW	1	0,02	4	0,30
4% CFPW	1	0,04	4	0,30

A preparação das composições consistiu em adicionar todo o agregado com 5% da massa total de cimento na betoneira; misture por 1 minuto; adicione o restante dos materiais; misture por 3 minutos; deixe a mistura descansar por 3 minutos.

7.2.3. Propriedades Avaliadas

Em todas as composições foram analisadas a massa específica, permeabilidade, índice de vazios e resistência mecânica à compressão e tração, os ensaios seguiram as prescrições normativas da NBR [16,23–26].

O procedimento de moldagem dos corpos de prova cilíndricos consistiu na compactação de três camadas com 25 golpes de uma vareta de compactação, para minimizar os efeitos da porosidade. [27,28]. Já para os corpos de prova prismáticos, a compactação foi realizada com soquete de 4,5 kg em duas camadas com 25 golpes cada. A Tabela 5 mostra o número de corpos de prova moldados durante o procedimento experimental deste estudo e seus respectivos ensaios e tempos de cura adotados.

Tabela 5 – Número de amostras feitas por tempo de cura.

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

As amostras para os ensaios de índice de vazios e massa específica foram determinadas sua massa seca após o período de cura com secagem em laboratório em estufa a 105°C por 72 horas. Em sequência, foram determinadas a massa saturada e a massa submersa. Os dados obtidos foram utilizados para obter a razão de vazios (Eq. 1) e a massa específica (Eq. 2).

$$I_V = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_i} * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\rho = \frac{m_d}{m_s - m_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que, I_V = índice de vazios; m_d = massa seca (g); m_{sat} = massa satura (g); m_i = massa submersa (g).

Após o rompimento dos corpos de prova no teste de resistência à compressão e flexão, algumas amostras foram removidas para análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV) para determinar a influência do CFPW na microestrutura da matriz cimentícia. Para a análise microscópica houve também a moldagem de pastas, com 5 mm de diâmetro para todas as composições. As amostras também foram analisadas por ensaio

de DRX usando um difratômetro Rigaku™ Última IV, com radiação $\text{CuK}\alpha$ (1,5406Å). Para estudar a característica cristalina das amostras, as medidas de difração de raios-X foram coletadas com a varredura de 20° a 60° nas amostras na forma de pó. Análises termogravimétricas (TG/DTG) também foram avaliadas para as diferentes amostras produzidas. As curvas TG e DTG foram medidas da temperatura ambiente a 800°C com a taxa de aquecimento constante de 10°C/min usando um instrumento TA Instruments™ SDT Q600.

7.2.4. Tratamento estatístico

O tratamento estatístico deste estudo foi realizado por meio da ferramenta ANOVA, por sua capacidade de testar a igualdade das amostras avaliadas e a significância dos resultados, determinando se há diferença significativa entre as médias dos resultados e se as variáveis independentes influenciaram as variáveis dependentes. O teste de Tukey teve como objetivo comparar múltiplos resultados, destacando as diferenças entre composições com diferentes teores de resíduos. Estas análises estatísticas concentraram nos ensaios de resistência mecânica à compressão, resistência à tração à flexão, permeabilidade e índice de vazios.

7.3. Resultados e Discussões

Os ensaios de caracterização CFPW resultaram em um módulo de finura de 0,69, dimensão máxima de 0,6 mm, massa específica de 2580 kg/m³ e área superficial específica de 11447,03 cm²/g, apresentando a área superficial específica 204% superior a do cimento. A análise das morfologias do CFPW pode ser observada na Figura 6 (a), notando que o material possui forma irregular Figura 6 (b), indicando que o processo de polimento na geração do resíduo pode ser o responsável, pois este procedimento é baseado em processo abrasivo [29,30].

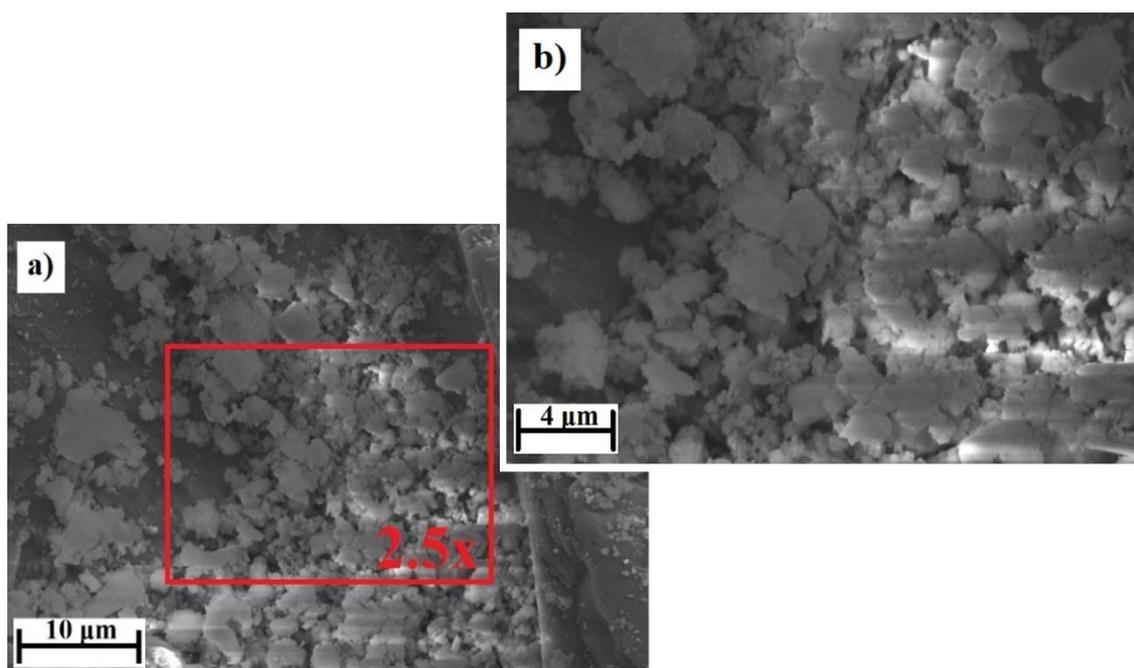


Figura 6 – MEV da amostra de CFPW ampliação de (a) 5000x e (b) 10000x.

A composição química do CFPW determinada por fluorescência de raios-X e perda ao fogo (PF) são mostradas na Tabela 6. Através destes testes, verificou-se que este material possui teor de sílica de 10,29%, soma dos elementos (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 de 13,51% e perda ao fogo de 36,03%. Ao analisar a composição química do CFPW percebeu-se que o CaO é o mineral com maior presença e o SiO_2 o segundo. Tais valores já eram esperados, pois o material é proveniente de pisos de concreto usando agregados de calcário.

Na Tabela 6, pode-se observar que o teor de MgO está na faixa entre 2,1% e 10,8%, configurando um calcário do tipo dolomítico [31]. Quantidades excessivas de MgO podem fazer com que a pasta se expanda no processo de hidratação em idades mais avançadas. O limite de óxido de magnésio em relação à massa de cimento de acordo com ASTM C150 é de 6,0% e EN 197-1 é de 5,0%. Dessa forma, conforme observado na Tabela 6, o valor de 8,26% de MgO presente no CFPW pode promover a desdolomitização do calcário, resultando no enfraquecimento da ligação pasta-agregado, resultante da reação entre soluções alcalinas e dolomita. Portanto, recomenda-se aplicar o resíduo estudado em níveis baixos em relação à massa de cimento para reduzir os efeitos a longo prazo.

A NBR 12653[32] estabelece os requisitos para materiais pozolânicos e exige como requisito químico o mínimo de 50% para a soma dos percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e o máximo de 6% de perda ao fogo, portanto, pela origem do resíduo e sua análise

química foi descartada na hipótese de que o material tenha atividade pozolânica significativa.

Tabela 6 – Composição química e perda ao fogo de CFPW.

Material	Constituinte (%)								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃	PF
CFPW	10,29	0,12	1,88	1,34	8,26	41,00	0,22	1,24	36,03

Ao observar as porcentagens de K₂O alcalino, verifica-se que é relativamente baixo em relação a outros agregados reciclados [33,34]. Rochas britadas de origem calcária são utilizadas para a confecção dos pisos de granito, portanto, percentuais de perda ao fogo e óxido de cálcio no resíduo foram encontrados semelhantes aos valores encontrados por Morales *et al.*, [35], que obtiveram para o calcário os valores de 37,8% para PF e 47,09% para CaO.

Os ensaios de massa específica apresentaram valores de 1986,44 kg/m³, 2127,26 kg/m³ e 2197,56 kg/m³ para as composições CONTROL, 2% CFPW e 4% CFPW, respectivamente, demonstrando que conforme o aumento da adição do resíduo no concreto, a massa específica aumenta, principalmente, pelo fechamento dos poros. Assim, os resultados de massa específica estão de acordo com o trabalho de Ibrahim *et al.*, [36], em que o concreto permeável com a granulometria com maior número de finos apresentou a maior massa específica.

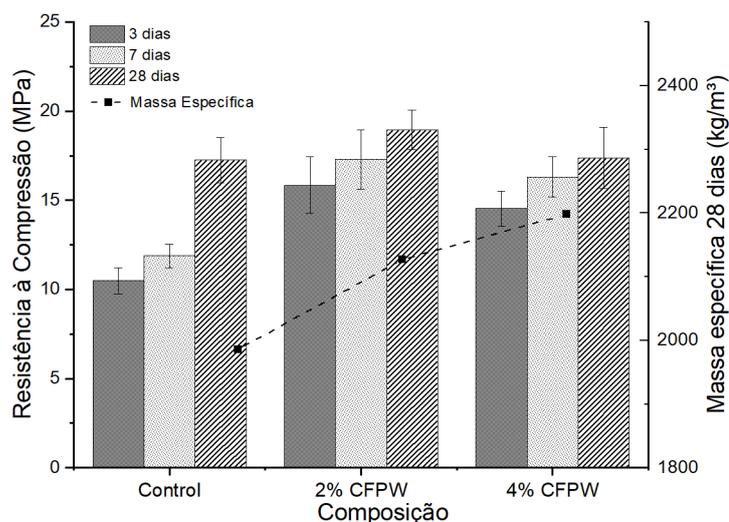


Figura 7 – Resistência à compressão e massa específica.

A análise da variância da resistência à compressão pode ser observada na Tabela 7, e foi possível observar que os resultados apresentaram diferenças significativas entre os traços e as idades de cura, indicando que o resíduo apresentou influência nesta propriedade. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão (Figura 7) demonstraram que a adição do resíduo no concreto não promoveu aumento significativo da resistência mecânica à compressão aos 28 dias. Ao comparar as dosagens de 2% CFPW e 4% CFPW com a composição CONTROL, há, respectivamente, aumento na resistência média à compressão de 57,45% e 33,78% para 3 dias de cura e de 45,41% e 37,20% para 7 dias de cura. Tais dados indicam que o CFPW acelerou a hidratação do cimento através do fenômeno de nucleação.

Tabela 7 – Análise da variância para resistência à compressão.

	Amostra	Média	Varição		Df	SQ	MS	F	p-value	fc
3 dias	CONTROL	10,49	0,53	Among Groups	2	93,66	46,83	34,67	2,37E-06	3,68
	2% CPFW	15,85	2,56	Same Groups	15	20,26	1,35			
	4% CPFW	14,54	0,96							
7 dias	CONTROL	11,89	0,44	Among Groups	2	99,39	49,70	33,23	3,08E-06	3,68
	2% CPFW	17,29	2,79	Same Groups	15	22,43	1,50			
	4% CPFW	16,32	1,25							
28 dias	CONTROL	17,25	1,58	Among Groups	2	10,76	5,38	2,81	9,22E-02	3,68
	2% CPFW	18,96	1,23	Same Groups	15	28,74	1,92			
	4% CPFW	17,39	2,94							

Nota: Legenda:

Df = grau de liberdade

SQ = soma dos quadrados

MQ = média dos quadrados

A resistência à flexão do concreto permeável, Figura 8, evidenciou influência significativa do resíduo nesta propriedade, principalmente nas idades iniciais. Houve aumento de 55,70% e 58,75% na resistência à flexão aos 3 dias das amostras 2% CFPW e 4% CFPW quando comparadas ao CONTROL. A composição de 4% CFPW se destaca aos 28 dias com aumento de 16,3% em relação à composição controle e 11% em relação à composição de 2% CFPW. Todas as composições estão acima dos requisitos normativos da NBR 16416 [16] e ACI 522R [37].

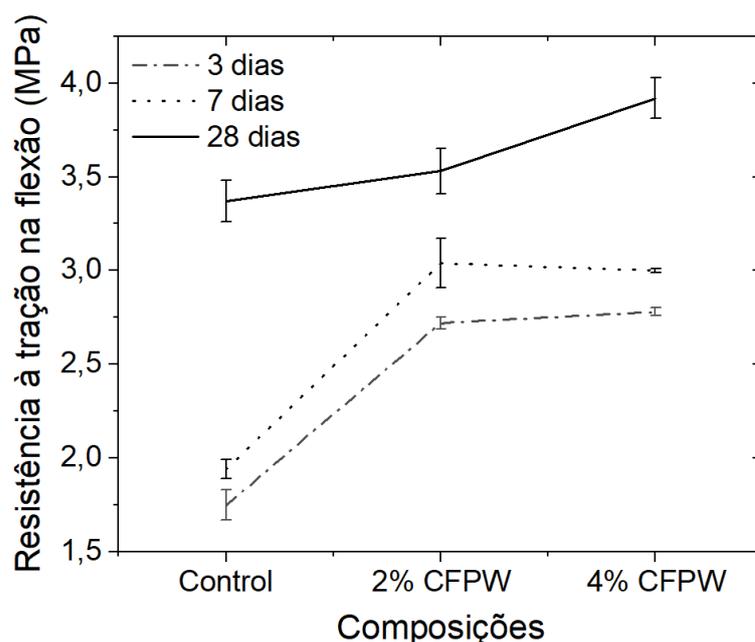


Figura 8 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

A análise da variância da resistência à tração na flexão pode ser observada na Tabela 8, e foi possível observar que os resultados apresentaram diferenças significativas entre os traços e as idades de cura, indicando que o resíduo apresentou influência nesta propriedade.

Tabela 8 – Análise da variância para resistência à tração na flexão.

	Amostra	Média	Varição		Df	SQ	MS	F	p-value	fc
3 days	Control	1,75	0,05	Among Groups	2	2,01	1,00	53,82	1,47E-04	5,14
	2% CFPW	2,72	0,00	Same Groups	6	0,11	0,02			
	4% CFPW	2,78	0,00							
7 days	Control	1,94	0,07	Among Groups	2	1,91	0,96	6,09	3,60E-02	5,14
	2% CFPW	3,04	0,13	Same Groups	6	0,94	0,16			
	4% CFPW	2,69	0,27							
28	Control	3,37	0,04	Among Groups	2	0,49	0,24	8,92	1,59E-02	5,14

days	2% CPFW	3,53	0,03	Same Groups	6	0,16	0,03
	4% CPFW	3,92	0,02				

Nota: Legenda:

Df = grau de liberdade

SQ = soma dos quadrados

MQ = média dos quadrados

A Figura 9 mostra a relação entre as resistências à compressão e tração entre todas as amostras avaliadas e idades de cura. A regressão linear calculada apresentou o coeficiente de determinação com boa correlação entre as propriedades mecânicas, indicando que o concreto permeável tende a aumentar a resistência à compressão e à flexão proporcionalmente quando a variável estudada afeta a microestrutura das amostras com o fechamento dos poros e conseqüentemente aumentando a resistência da matriz de cimento. Resultados semelhantes foram obtidos por Ibrahim *et al.*, [36] em sua pesquisa, porém o coeficiente de determinação levantado por ele foi de 0,67962, valor inferior ao encontrado no presente estudo ($R^2 = 0,86273$), pois as demais variáveis utilizadas nas análises influenciam a distribuição de macroporos e microporos em diferentes escalas. Ao comparar a curva elaborada por Ibrahim *et al.*, [36] e a Figura 9 verifica-se também que o coeficiente angular próximos validando equação encontrada.

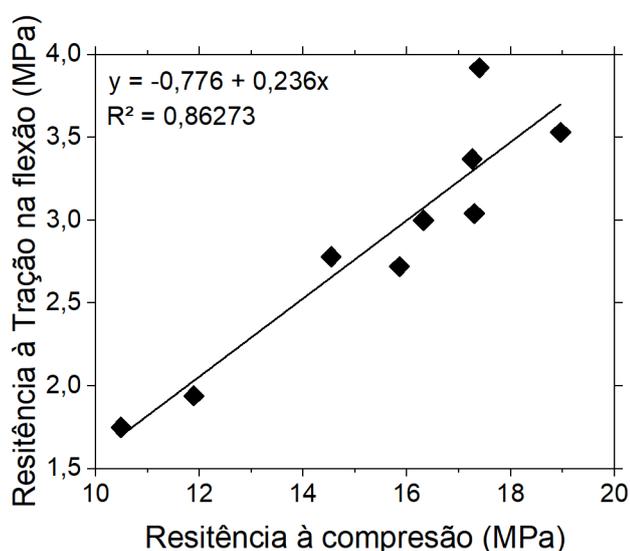


Figura 9 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

Os resultados do teste de permeabilidade, índice de vazios e massa específica, conforme apresentados na Figura 10 indicaram que a adição do resíduo promoveu redução na permeabilidade, no índice de vazios e aumentou a massa específica, mas que atende aos requisitos mínimos estabelecidos na NBR 16416 [16] para que o concreto seja classificado como pavimento permeável, e o coeficiente de permeabilidade deve ser igual

ou superior a 1 mm/s, massa específica superior a 1600 kg/m³ e resistência à tração à flexão de 2 MPa [16], assim, verifica-se que todas as composições analisadas, inclusive aquelas com adição de CFPW, atenderam a esta norma. Para fortalecer a validação dos dados, a norma ACI 522 [37] também é atendida, orientando que a resistência à compressão geralmente varia entre 3,5 e 28 MPa.

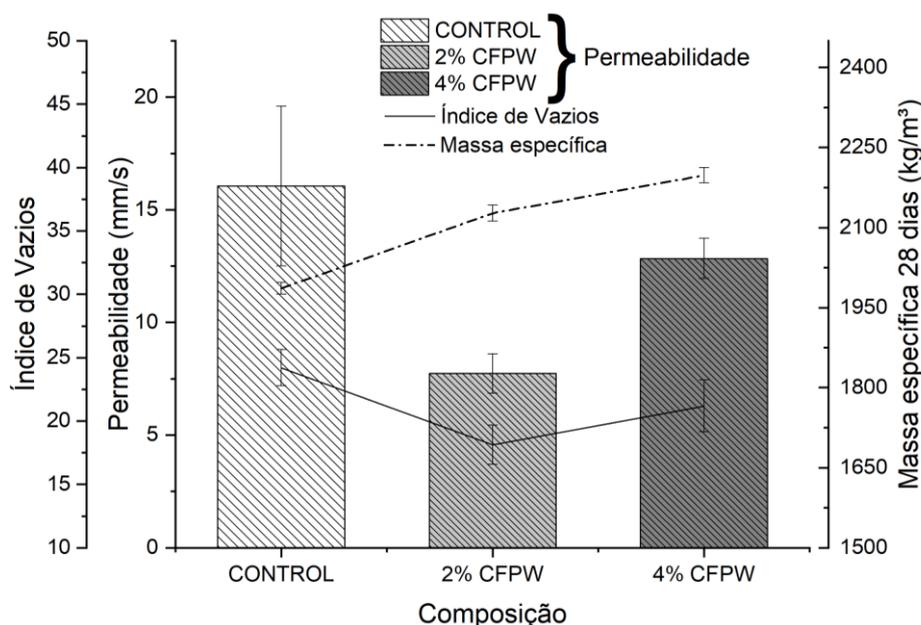


Figura 10 – Resultados de massa específica, permeabilidade e índice de vazios.

Para o teste de permeabilidade, a ferramenta estatística ANOVA (**Tabela 9**) indicou o valor de P inferior a 5%, portanto, há variação significativa entre as composições. O resultado da análise de variância pode ser observado com o valor de P de 0,011, também a mesma análise pode ser feita para o índice de vazios.

Tabela 9 – Análise de variância dos resultados dos testes de permeabilidade e índice de vazios.

Permeabilidade									
Amostra	Média	Varição		Df	SQ	MS	F	p-value	fc
CONTROL	16,05	15,36	Among Groups	2	210,96	105,48	18,35	9,31E-05	3,68
2% CFPW	7,73	0,92	Same Groups	15	86,21	5,75			
4% CFPW	12,84	0,96							
Índice de vazios									
CONTROL	24,20	3,47	Among Groups	2	18,16	9,08	2,18	1,95E-01	5,1
2% CFPW	21,19	4,52	Same Groups	6	25,03	4,17			

Ao comparar as misturas 2% CFPW e 4% CFPW, pode-se observar que a amostra com 4% CFPW apresentou maior permeabilidade, embora tenha apresentado a maior quantidade de finos. O teste de Tukey para permeabilidade e conteúdo de vazios (**Tabela 10**) comprovou que as amostras de 2% CFPW e 4% CFPW não apresentam resultados significativos entre si, portanto estão no mesmo grupo, definindo-as como semelhantes.

Tabela 10 – Teste de Tukey para permeabilidade e índice de vazios.

Permeabilidade	Amostra	Média ($\times 10^{-3}$ m/s)	Desvio padrão ($\times 10^{-3}$ m/s)	Grupo Tukey
	Control	18,41	3,54	b
	2% CFPW	7,73	1,23	a
	4% CFPW	12,84	1,26	ab
Índice de vazios	Amostra	Média (%)	Desvio padrão (%)	Grupo Tukey
	Control	26,57	0,52	a
	2% CFPW	20,65	0,85	b
	4% CFPW	22,33	1,08	b

A Figura 11 ilustra os resultados com a difração de raios-X para as amostras CONTROL, 2% CFPW e 4% CFPW e analisadas de acordo com os padrões [38]. Para a composição produzida (CONTROL) observou-se a presença das fases de Calcita e SiO_2 , com planos mais intensos para o SiO_2 , o que de fato está aliado à natureza microestrutural do cimento utilizado, aliada também à composição do resíduo, considerando que é um elemento abundante neste mineral [39]. A fase portlandita também foi indexada para a composição, como pode ser visto na Figura 11. Por outro lado, quando as amostras foram produzidas com a adição de 2% e 4% de CFPW, a estrutura revelada apresentou picos como o CONTROL composição, mas com mudança na intensidade dos planos cristalográficos. A amostra de 2% CFPW apresentou maior intensidade para os planos relacionados à fase calcita. Em amostras policristalinas é comum combinar a intensidade relativa do pico mais intenso com a presença de fases. Nesse contexto, para a amostra de 2% CFPW, a intensidade do plano próximo de $2\theta \sim 29,5^\circ$ para a fase calcita é mais intensa. Enquanto para a amostra de 4% CFPW o resultado sugere coexistência majoritária das fases de calcita e SiO_2 e, em menor grau, portlandita. De fato, os difratogramas

apresentados para as amostras 2% CFPW e 4% CFPW sugerem alto teor da presença de fases cristalinas aliadas a estruturas com cálcio.

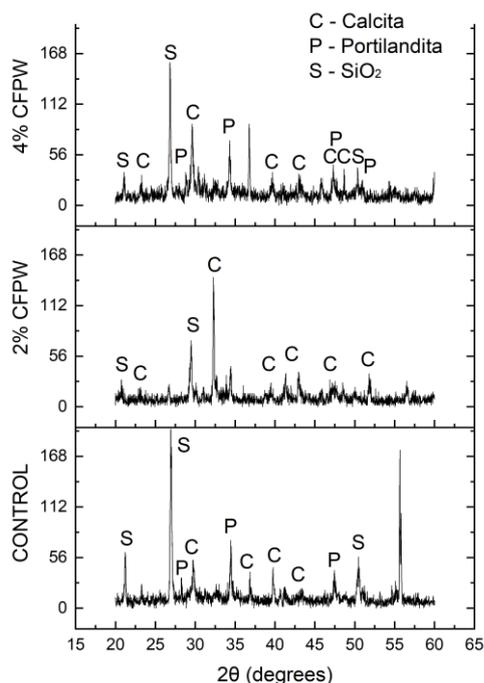


Figura 11 – Difractogramas de raios-X para CONTROL, 2% CFPW e 4% CFPW composições em pastas com idades de 28 dias.

As curvas para análise TG/DTG são apresentadas na Figura 12 e foi possível identificar as perdas de massa das fases de decomposição na matriz cimentícia [40]. Os produtos que volatilizam estão presentes na fase sólida, em vazios e na forma de água (na forma capilar, combinados quimicamente, adsorvidos e interlamelares). Água quimicamente combinada (CCW, sigla em inglês de *chemically combined water*) é a água que faz parte dos produtos de hidratação do cimento, volatilizada pela decomposição de hidratos. [41], a água livre é aquela que ocupa os grandes vazios.

Três faixas de temperatura bem definidas são verificadas nas curvas para análise termogravimétrica, conforme mostrado na Figura 12. Na literatura, afirma-se que é possível determinar a quantidade de CCW presente na faixa de temperatura entre 50°C e 200°C em que os hidratos de tobermorita e etringita são formados, enquanto o hidróxido de cálcio é desidratado na faixa de temperatura entre 380°C e 460°C. A última etapa é a decomposição do carbonato de cálcio, através da eliminação do CO₂, está na faixa de temperatura de 520°C a 730°C, podendo ocorrer algumas pequenas variações nestas faixas [42,43]. A Figura 12 mostra a quantificação destes compostos.

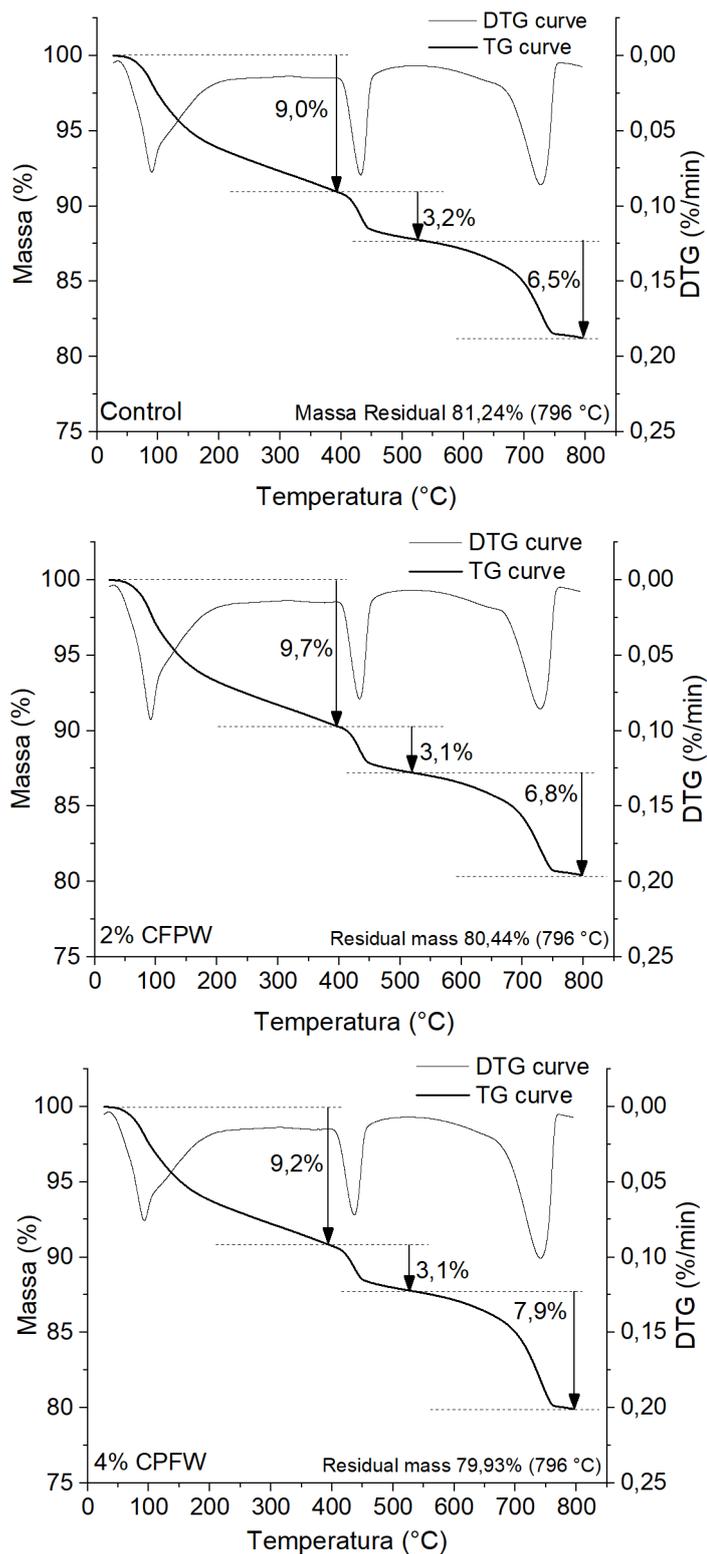


Figura 12 – curvas TG/DTG de pastas cimentícias; (a) CONTROL; (b) 2% do CFPW; (c) 4% de CFPW, após 28 dias de cura.

Figura 12 (a) que representa a pasta controle, a primeira faixa de quantificação é para desidratação, a massa de água volátil que foi responsável pela formação de CSH e

as fases de aluminato hidratado corresponde a 9,00% da massa total, limitada a 390°C. A quantificação do teor de Ca(OH)_2 ocorre na faixa de temperatura de 390°C a 515°C, esta desidratação corresponde a 3,20% da perda total de massa. O levantamento do teor de CaCO_3 acontece na faixa de 515°C a aproximadamente 765°C, e volatiliza em 6,50% de CO_2 . Para todas as composições, a quantificação das perdas de massa foi realizada utilizando as razões molares de $\text{Ca(OH)}_2/\text{H}_2\text{O}$ (4,11) e $\text{CaCO}_3/\text{CO}_2$ (2,27). Taylor [44] recomenda que, para uma análise comparativa, a normalização seja feita quando as amostras não estiverem na mesma base não volátil. A Tabela 11 mostra o conteúdo destacado na Figura 12 e o conteúdo corrigido.

Tabela 11 – Teor percentual de produtos de hidratação do cimento das pastas analisadas.

Amostra	CCW (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual (%)	Fator de normalização
		H_2O	Ca(OH)_2	CO_2	CaCO_3		
Control	Perdas de massa						
	9.00	3.20	13.16	6.50	14.79	81.24	1.23
	Correção da Perdas de massa					100.00	
	11.08	3.94	16.20	8.00	18.20		
2%CPFW	Perdas de massa						
	9.70	3.10	12.75	6.80	15.47	80.44	1.24
	Correção da Perdas de massa					100.00	
	12.06	3.85	15.85	8.45	19.23		
4%CPFW	Perdas de massa						
	9.20	3.10	12.75	7.90	17.97	79.93	1.25
	Correção da Perdas de massa					100.00	
	11.51	3.88	15.95	9.88	22.48		

A análise térmica para as composições com a adição de CFPW conforme mostrado na Figura 12 (b), (c) e (d), mostrou valores semelhantes para os teores de CCW (fases C-S-H e aluminatos hidratados), em Ca(OH)_2 e na massa residual, conforme mostra a Figura

8. Entretanto, na faixa de temperatura de aproximadamente 515°C a 765°C, as perdas de massa foram maiores a cada aumento na adição de CFPW, mostrando que CFPW favorece a carbonatação [45]. A Figura 13 mostra o aumento da carbonatação em relação à composição controle. Quanto à atividade pozolânica, CFPW não atende, dada a similaridade das perdas de massa para o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ remanescente em todas as composições.

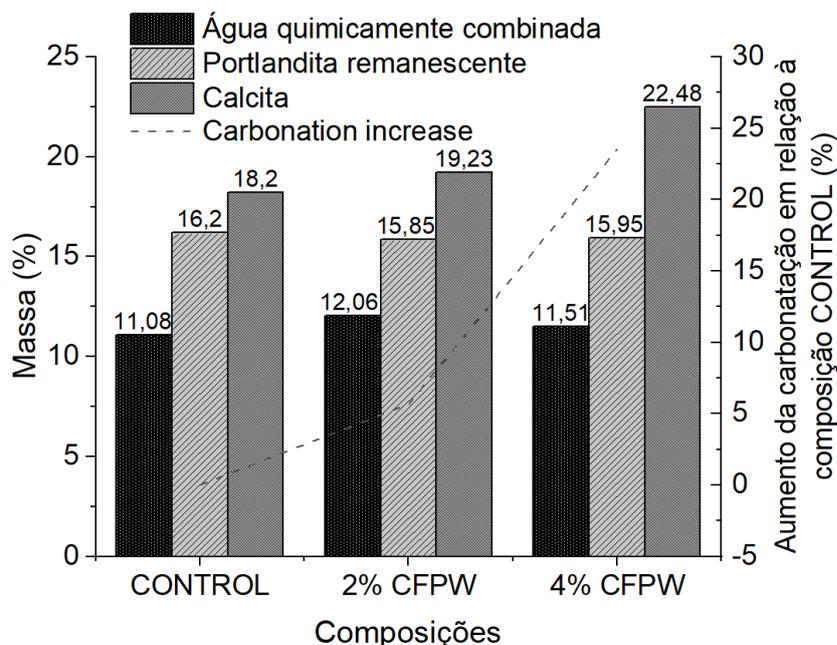
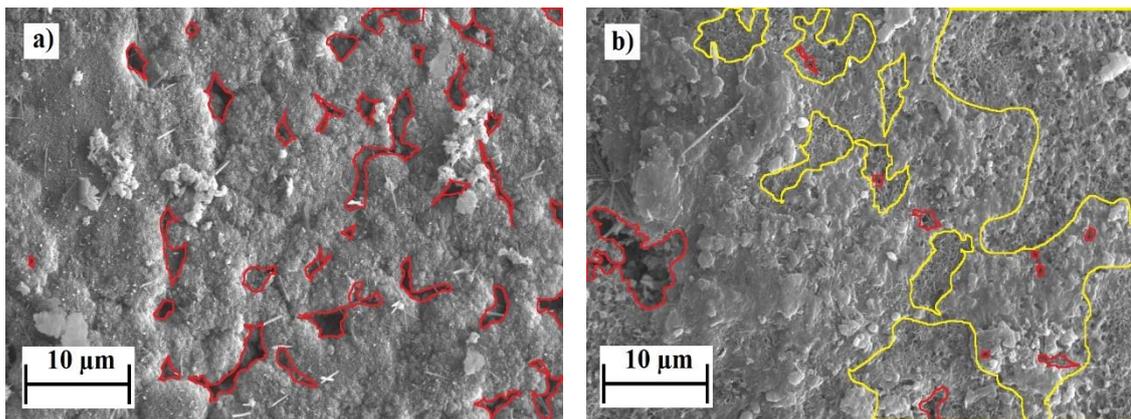


Figura 13 – Aumento da carbonatação em relação à composição CONTROL.

A Figura 14 (a) destaca na amostra CONTROL os poros em vermelho, sendo possível verificar distribuição uniforme e com diâmetro maior que 1 μm . A Figura 14(b) apresenta o MEV da pasta com 4% CFPW em que há a menor presença de poros com diâmetro maior que 1 μm e região com distribuição de poros com diâmetro menor que 1 μm destacado em amarelo.

Ao analisar a Figura 14 extraída dos testes de microscopia eletrônica de varredura (MEV), verifica-se que as composições com adição de CFPW apresentaram uma matriz cimentícia mais densa por causa do maior refinamento dos poros presentes na pasta, o que contribui para reduzir a porosidade do concreto de matriz cimentícia e aumenta a resistência mecânica à tração. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura [46–48].



NOTAS:

- (a) Destacado em vermelho os poros maiores que $1\ \mu\text{m}$.
- (b) Destacado em amarelo os poros menores que $1\ \mu\text{m}$.

Figura 14 – Imagens MEV das pastas, aumento de 5000x, 28 dias:

(a) CONTROL; (b) 4% CFPW.

Comparando os dados de caracterização do CFPW, é possível observar que sua área específica é aproximadamente o dobro do cimento, indicando que o aumento da resistência mecânica à tração, principalmente se deve ao efeito de carga causado no concreto, que permitiu reduzir a porosidade do sistema preenchendo vazios isolados e poros capilares [49].

7.4. Conclusões

Este estudo investigou e mostrou que as adições de CFPW ao concreto permeável podem apresentar as seguintes considerações:

- Na resistência à tração na flexão, notou-se que há diferença nos resultados para todas as composições, sendo que a adição com 4% de CFPW apresentou o melhor resultado, apresentando aumento de 16,3% em relação à amostra CONTROL, seguida da composição de 2% do CFPW com acréscimo de 11,0%.
- Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos mostraram boa correlação entre as resistências à compressão e à flexão. Todas as composições com adição do resíduo apresentaram melhor desempenho nas idades iniciais com aumento da resistência média à compressão de 57,45% e 33,78% para 3 dias de cura e de 45,41% e 37,20% para 7 dias de cura, respectivamente para 2 e 4% do CFPW.

- O concreto permeável com adições de CFPW é viável atendendo aos requisitos normativos vigentes, como resistência mecânica à compressão, tração na flexão e permeabilidade.
- A composição química do CFPW mostrou que este resíduo é um *filler* calcário do tipo dolomítico, e que sua área superficial específica é 204% maior que a do cimento. A massa específica do concreto aumenta com o incremento de CFPW até 4%.
- Não há atividade pozolânica para o resíduo de CFPW, comprovada pela composição química e pelos teores consumidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o consumo foi praticamente o mesmo em todas as composições verificadas no teste TG/DTG.
- A adição crescente de CFPW aumenta a formação de calcita, porém, o pequeno tamanho das partículas auxiliou na nucleação das reações de hidratação do cimento Portland, gerando ganhos na propriedade mecânica de tração e no menor índice de vazios.
- A adição do resíduo controlada no concreto permeável nas porcentagens indicadas é viável e representa destinação sustentável para o CFPW.

7.5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual Paulista (UNESP, campus Ilha Solteira-SP), Universidade de Rio Verde-GO (UniRV), Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) e Instituto Federal Goiano por todas as facilidades oferecidas.

7.6. Referências (Capítulo 1 – Artigo 1)

[1] A. Kia, H.S. Wong, C.R. Cheeseman, Clogging in permeable concrete: A review, **Journal of Environmental Management** 193 (2017) 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>.

[2] R. Gupta, Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia - A pilot study, **Case Studies in Construction Materials** 1 (2014) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2013.10.001>.

[3] R. Zhong, K. Wille, Compression response of normal and high strength pervious concrete, **Construction and Building Materials** 109 (2016) 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>.

- [4] X. Xie, T. Zhang, Y. Yang, Z. Lin, J. Wei, Q. Yu, Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste, **Construction and Building Materials** 168 (2018) 732–746. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128>.
- [5] H.Ö. Öz, Properties of pervious concretes partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate, **Construction and Building Materials** 166 (2018) 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.010>.
- [6] A.A. Aliabdo, A.E.M. Abd Elmoaty, A.M. Fawzy, Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate, **Construction and Building Materials** 193 (2018) 105–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182>.
- [7] N. Xie, M. Akin, X. Shi, Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability, **Journal of Cleaner Production** 210 (2019) 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>.
- [8] N. Saboo, S. Shivhare, K.K. Kori, A.K. Chandrappa, Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties, **Construction and Building Materials** 223 (2019) 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185>.
- [9] S. Ghorbani, S. Sharifi, S. Ghorbani, V.W. Tam, J. de Brito, R. Kurda, Effect of crushed concrete waste's maximum size as partial replacement of natural coarse aggregate on the mechanical and durability properties of concrete, **Resources, Conservation and Recycling** 149 (2019) 664–673. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.06.030>.
- [10] Z. He, X. Han, M. Zhang, Q. Yuan, J. Shi, P. Zhan, A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste, **Powder Technology** (2021) 117075. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2021.117075>.
- [11] L. Araújo Silva, B. de Oliveira Nahime, A. dos Santos Felipe, C. Nelson Elias, D. Ribeiro do Carmo, E. Carvalho de Lima, I. Soares dos Santos, K. Lopes Lima, D. Istuque, Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste, **Construction and Building Materials** 265 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120119>.
- [12] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR NM 26** - Aggregate - Sampling, (2009).
- [13] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR NM 45** - Aggregates - Determination of the unit weight and air-void contents, (2006).
- [14] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR NM 53** - Coarse aggregate - Determination of the bulk specific gravity, apparent specific gravity and water absorption, (2009).
- [15] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR NM 248** - Aggregates - Sieve analysis of fine and coarse aggregates, (2003).
- [16] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 16416** - Pervious concrete pavement - Requirements and procedures, (2015).

- [17] S.F. Korenkova, Y. V. Sidorenko, Improving durability of cement composite materials, **Procedia Engineering** 111 (2015) 420–424. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.110>.
- [18] W. Brostow, N. Chetuya, N. Hnatchuk, T. Uygunoglu, Reinforcing concrete: Comparison of filler effects, **Journal of Cleaner Production** 112 (2016) 2243–2248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.105>.
- [19] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 16605** - Portland cement and other powdered material — Determination of the specific gravity, (2017).
- [20] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 16372** - Portland cement and other powdered materials — Determination of fineness by the air permeability method (Blaine method), (2015).
- [21] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 16606** - Portland cement — Determination of the normal consistency paste, (2018).
- [22] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 16607** - Portland cement — Determination of setting times, (2018).
- [23] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 9833** - Fresh concrete - Determination of the unit weight, yield and air content by the gravimetric test method, (2008).
- [24] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 5739** - Concrete - Compression test of cylindrical specimens, (2018).
- [25] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 12142** - Concrete - Determination of tension strength in flexure of prismatic specimens, (2010).
- [26] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 9778** - Hardened mortar and concrete - Determination of absorption, voids and specific gravity, (2009).
- [27] P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa, Cement paste characteristics and porous concrete properties, **Construction and Building Materials** 22 (2008) 894–901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007>.
- [28] W.D. Martin, N.B. Kaye, B.J. Putman, Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete, **Construction and Building Materials** 59 (2014) 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034>.
- [29] V. THIERY, E. DUBOIS, S. BELLAYER, The good, the bad and the ugly polishing: effect of abrasive size on standardless EDS analysis of Portland cement clinker's calcium silicates, **Micron** 158 (2022) 103266. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103266>.
- [30] D.E. Newbury, N.W.M. Ritchie, Performing elemental microanalysis with high accuracy and high precision by scanning electron microscopy/silicon drift detector energy-dispersive X-ray spectrometry (SEM/SDD-EDS), **Journal of Materials Science** 50 (2014) 493–518. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8685-2>.
- [31] F.J. Pettijohn, P.E. Potter, R. Siever, **Sand and Sandstone**, Second ed., Springer, New York, NY, 1987.
- [32] Brazilian Association of Technical Norms, **NBR 12653** - Pozzolanic materials — Requirements, (2014).

- [33] P. Tang, M.V.A. Florea, H.J.H. Brouwers, Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash, **Journal of Cleaner Production** 165 (2017) 1371–1384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.234>.
- [34] A.B. Malkawi, M.F. Nuruddin, A. Fauzi, H. Almattarneh, B.S. Mohammed, Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars, **Procedia Engineering** 148 (2016) 710–717. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.581>.
- [35] D. Suescum-Morales, D. Cantador-Fernández, J. Ramón Jiménez, J. María Fernández, Potential CO₂ capture in one-coat limestone mortar modified with Mg₃Al–CO₃ calcined hydrotalcites using ultrafast testing technique, **Chemical Engineering Journal** 415 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129077>.
- [36] A. Ibrahim, E. Mahmoud, M. Yamin, V.C. Patibandla, Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, **Construction and Building Materials** 50 (2014) 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>.
- [37] American Concrete Institute, ACI committee 522. Specification for Pervious Concrete. **ACI 522.1M-13**, Farmington Hills, 2013.
- [38] FIZ Karlsruhe, **Inorganic Crystal Structure Database (ICSD-2014)**, (n.d.).
- [39] D.P. Bentz, A. Ardani, T. Barrett, S.Z. Jones, D. Lootens, M.A. Peltz, T. Sato, P.E. Stutzman, J. Tanesi, W.J. Weiss, Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete, **Construction and Building Materials** 75 (2015) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.042>.
- [40] M.A.S. Anjos, A.E. Martinelli, D.M.A. Melo, T. Renovato, P.D.P. Souza, J.C. Freitas, Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure, **Journal of Petroleum Science and Engineering** 109 (2013) 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.016>.
- [41] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, **Concrete: microstructure, properties, and materials**, fourth ed., McGraw-Hill Professional Publishing, 2013.
- [42] A. Neves Junior, R.D.T. Filho, E. de M.R. Fairbairn, J. Dweck, A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 116 (2014) 69–76. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3556-7>.
- [43] J. Dweck, P.M. Buchler, A.C.V. Coelho, F.K. Cartledge, Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate, **Thermochimica Acta**. 346 (2000) 105–113. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00369-x](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00369-x).
- [44] H.F.W. Taylor, **Cement Chemistry**, Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- [45] F. Deschner, B. Lothenbach, F. Winnefeld, J. Neubauer, Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash, **Cement and Concrete Research** 52 (2013) 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.006>.
- [46] V.B. Bosiljkov, SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, **Cement and Concrete Research** 33 (2003) 1279–1286. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00013-9).

- [47] O. Esping, Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, **Cement and Concrete Research** 38 (2008) 938–944. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.010>.
- [48] D. Wang, C. Shi, N. Farzadnia, H. Jia, R. Zeng, Y. Wu, L. Lao, A quantitative study on physical and chemical effects of limestone powder on properties of cement pastes, **Construction and Building Materials** 204 (2019) 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.154>.

8. CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2

APLICAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL COM A ADIÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO

(Artigo submetido à Revista CONCRETO & Construções, ISSN 1809-7197)

RESUMO

O concreto permeável possui diversas vantagens ambientais e econômicas se avaliadas a logo prazo. Contudo a sua aplicação é pouco difundida na construção civil, principalmente pela falta de procedimentos de execução consagrados e a ideia de custo superior se comparado ao concreto convencional. Neste contexto o objetivo deste estudo foi elaborar e aplicar uma metodologia construtiva de baixo custo para o concreto permeável moldado *in loco* com adição do resíduo do polimento de pisos de concreto. Foram avaliadas no trabalho três dosagens, sendo uma referência e outras duas com a adição do resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW, sigla em inglês para *concrete floor polishing waste*) em 2 e 4% da massa do cimento, respectivamente. Durante o trabalho foi construído uma pista de teste com um trecho para cada traço e avaliados a sua permeabilidade. Para reduzir os custos de execução do pavimento permeável foi desenvolvido e aplicado um rolo compactador fabricado com materiais reciclados.

Palavras-chave: Execução; pavimento permeável; baixo custo.

ABSTRACT

Pervious concrete has several environmental and economic advantages if evaluated in the long term. However, its application is not widespread in civil construction, mainly due to the lack of established procedures and the idea of higher cost compared to conventional concrete. In this context, the objective of this study was to develop and apply a low-cost constructive methodology for pervious concrete cast in loco with the addition of polishing residue from concrete floors. Three dosages were evaluated in the work, being a reference and two others with concrete floor polishing waste (CFPW) addition in 2 and 4% of the cement mass, respectively. During the work, a test track was built with a section for each trace and its permeability was evaluated. To reduce the running costs of the permeable pavement, a roller made of recycled materials was developed and applied.

Keywords: Construction waste; permeable pavement; pervious concrete.

8.1. Introdução

Áreas urbanas geralmente são compostas por pavimento impermeáveis, promovendo o aumento do escoamento superficial, risco de inundações e transporte de resíduos ocasionando falhas no sistema de drenagem ou a poluição de rios e lagos [1]. O concreto permeável, também conhecido como concreto poroso, possui estrutura de poros entre 15 a 25 % do volume total por causa da ausência ou baixa presença de finos em sua composição, possibilitando a infiltração e percolação da água reduzindo os efeitos adversos do escoamento superficial [2, 3].

Embora o concreto permeável apresente diversas vantagens seu uso atualmente não é recorrente em obras de construção civil, visto que o processo construtivo é pouco difundido entre os engenheiros e as resistências mecânicas são geralmente inferiores ao concreto convencional [2]. A adição de materiais reciclados com alta finura ou atividade pozolânica, como sugerido por vários autores, tem resultado no melhor desempenho das propriedades mecânicas e durabilidade sem a redução significativa de permeabilidade do concreto permeável [4-6]. O resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW, sigla em inglês para concrete floor polishing waste) obtido a partir da lapidação de pisos de granítina apresenta superfície específica superior ao cimento, promovendo o efeito *filler* e aumento da resistência mecânica em matrizes cimentícias.

Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi elaborar e aplicar uma metodologia construtiva de baixo custo para o concreto permeável moldado *in loco* com adição do resíduo do polimento de pisos de concreto.

8.2. Material e Métodos

Para esta pesquisa foi utilizado na dosagem do concreto permeável o cimento CP V – ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), por possuir desempenho mecânico superior na idade inicial aos demais e permitir a aplicação em painéis monolíticos moldados *in loco* e a produção de elementos pré-fabricados e pré-moldados de concreto. Como agregado graúdo foi empregado a brita de origem basáltica e dimensão máxima característica de 9,5 mm, pois conforme Chandrappa e Biligiri [7] a alta dureza e módulo de elasticidade do agregado promove o aumento de resistência no concreto permeável.

O resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW) foi adquirido após o processo de lapidação de pisos com agregados de origem calcária (granitina) na cidade de Rio Verde (GO) e região. O material coletado estava em estado pastoso, assim para

augmentar a homogeneização e qualidade do concreto confeccionado foi realizado o processo de secagem em estufa por 72 horas a 65°C, e sequência, destorroado em um almofariz e peneirado na malha com 150 mm de abertura (#100). O CFPW foi utilizado em baixos teores para evitar o fechamento dos poros e perda significativa de permeabilidade.

A quantidade de CFPW gerado é em função do tipo de procedimento adotado para o polimento e a espessura do piso. Com medições realizadas *in loco* para uma superfície com 1,5 mm de espessura, foi gerado 9,5 kg de lodo por 1 m² polido e 4 kg de resíduo seco em pó. A quantidade de perda de massa após a secagem é significativa. Pesquisas que visam reduzir o impacto ambiental gerado pelo CFPW podem propiciar a redução do volume de resíduos sólidos da construção civil em aterros sanitários, menor poluição do solo, de bacias hidrográficas e do ar pela contaminação promovida pelo lodo e pelo pó.

O levantamento de preços de mercado para a confecção do pavimento permeável foi por meio da Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA) com a data de referência de julho de 2022 e Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) com data de referência de julho de 2022 e estado de Goiás, gerenciado pela Caixa Econômica Federal e apoio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), responsável por pesquisas mensais de preços.

Com base nas características dos materiais empregado no concreto permeável foi definido o consumo de cimento de 375 kg/m³ e a relação cimento/agregado 1:4 (cimento:brita) com proporção em massa. Com isso foi realizado alguns testes iniciais para estabelecer a relação água/cimento, sendo a adotada de 0,3 com a consistência apresentada na Figura 15. Neste estudo foram elaborados três traços: referência, sem a adição do resíduo, e outros dois com a adição de 2 e 4% de CFPW, respectivamente.



Figura 15 – Análise visual do concreto permeável.

Com as dosagens dos traços foi realizado o dimensionamento da pista de testes localizada em Rio Verde (GO), sendo executada nas trilhas de uma praça na universidade, foi destinada ao tráfego de pedestre e dimensionado conforme a NBR 16416 [8].

A dosagem do concreto foi realizada com a ordem de mistura dos componentes de forma a garantir melhor homogeneização e fixar um procedimento que obteria resistências mecânicas e permeabilidade semelhantes para amostras que fossem produzidas em betoneiras diferentes, mas que possuem o mesmo traço. A metodologia consistiu em adicionar todo o agregado com 5% da massa total do cimento na betoneira; misturar por 1 minuto; adicionar o restante dos materiais; misturar por 3 minutos e deixar a mistura em repouso por 3 minutos, estando pronta para aplicação após essa etapa.

Na pista de teste desenvolvida foram aplicados os três traços estudados, uma vez que não há diferença visual nas dosagens. O ensaio de permeabilidade foi executado pelo método fornecido do anexo A da ABNT NBR 16416:2015 [8], e foi realizado uma pré-molhagem e em seguida despejado a água no anel de infiltração (300 mm de diâmetro e 50 mm de altura) com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as duas marcações internas do anel (10 mm a 15 mm). Foi acionado o cronômetro assim que a água atingiu a superfície do pavimento permeável e parou quando não houve mais água livre na superfície. Para calcular o coeficiente de permeabilidade (k) foi utilizado a Eq. 2.

$$k = \frac{C * m}{(d^2 * t)} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que C corresponde ao fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4 583 666 000; m a massa de água infiltrada expressa em quilogramas (kg); d é o

diâmetro interno do cilindro de infiltração expresso em milímetros (mm); t é o tempo necessário para toda a água percolar expresso em segundos (s). Desta forma, o coeficiente de permeabilidade resultante foi fornecido em milímetros por hora (mm/h).

8.3. Resultados e Discussões

Conforme as exigências normativas da NBR 16416 [8] é necessária uma camada entre o solo e o revestimento de concreto permeável, atuando como base e/ou sub-base, constituída de materiais pétreos de granulometria aberta. A altura da camada da base granular foi obtida através do hidráulico e mecânico, adotado o maior valor entre os dois, resultando em 50,0 mm com agregado natural de origem basáltica e 19,0 mm de dimensão máxima característica.

Ao avaliar a permeabilidade do solo e o histórico de precipitação com o período de retorno de 10 anos, verificou-se que toda a água precipitada alcança o subleito se infiltrará e em caso de chuvas intensas a altura da base granular atuará na função de reservatório da água excedente, assim foi dispensado o uso de drenos.

A espessura do revestimento de concreto permeável foi de 60,0 mm, visto que o pavimento foi destinado a tráfego de pedestres e moldado *in loco*. Desta forma, o resumo do consumo de materiais, altura das camadas de cada traço foram apresentadas na Tabela 12. Ao comparar os traços é possível observar a crescente consumo de cimento por metro cúbico com a adição do resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW), pois as amostras apresentam a redução do índice de vazios e maior empacotamento, e conseqüentemente, queda na permeabilidade, aumento de resistência e consumo de materiais, sendo estes resultados compatíveis com a pesquisa de Zhong e Wille [9].

Tabela 12 – Resumo dos consumos de materiais e espessuras das camadas

	CONTROL	2% CFPW	4% CFPW
cimento: agregado graúdo	1:4	1:4	1:4
Água/cimento	0,3	0,3	0,3
Consumo de cimento (kg/m ³)	374,8	399,9	411,5
Consumo CFPW (kg/m ³)	0	8,0	16,5
Consumo Agregado Natural (kg/m ³)	1499,2	1599,6	1646,0
Consumo de água (kg/m ³)	112,5	120,0	123,5
Altura da camada de base (mm)	50,0	50,0	50,0
Espessura do concreto permeável (mm)	60,0	60,0	60,0

Na determinação dos custos do pavimento permeável foram levantadas as composições de preços apresentados na Tabela 13. O traço apresentado na Tabela 13 de concreto permeável é o traço referência (CONTROL) com resistência à tração de 3,0 MPa, uma vez que por se tratar de resíduo o material não apresenta custo de produção agregado, apenas o de transporte para obra. O concreto convencional adicionado para comparação de preços possui f_{ck} de 25 MPa e proporção em massa dos materiais de 1:2,86:2,32 (cimento: areia grossa: brita 0) estabelecidos pela Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA). Ambos foram calculados considerando a espessura do piso 60,0 mm.

Tabela 13 – Composição de custo por metro quadrado dos materiais para produzir o concreto permeável e concreto convencional com piso de 60 mm de espessura.

Material	Unidade	Preço Unitário (R\$)	Concreto Permeável		Concreto Convencional	
			cons./m ²	Valor (R\$)	cons./m ²	Valor (R\$)
Cimento	kg	0,64	22,50	14,40	19,38	12,40
Areia Grossa	m ³	170,00	-	-	0,04535	7,71
Brita 0	m ³	129,68	0,06000	7,78	0,03523	4,57
Água	m ³	10,32	0,00675	0,07	0,01163	0,12
			TOTAL	R\$ 22,25	TOTAL	R\$ 24,80

Ao comparar os custos obtidos na Tabela 13 é possível observar que o metro quadrado do traço de concreto permeável desenvolvido é 11,46% mais barato, considerando apenas o material para a confecção dos concretos. Contudo, como menciona alguns autores o processo de execução com a necessidade de maquinário específico para compactação por sua baixa trabalhabilidade torna o pavimento permeável levemente mais caro.

Para a confecção do pavimento de concreto permeável na praça foram aplicados em três trechos os traços de concreto permeável, uma vez que a adição do material estudado não afeta as propriedades visuais do concreto. Com o objetivo de reduzir os custos de execução o material foi dosado em uma betoneira de 400 L e distribuído uniformemente, conforme a Figura 16.



Figura 16 – Aplicação do concreto permeável nos trechos selecionados.

O aluguel de máquinas de compactação foi evitado com o desenvolvimento do rolo compactador produzido com material reciclado, conforme a Figura 17. Foi utilizado um cano PVC (1 m de comprimento e 200 mm de diâmetro) preenchido de concreto convencional para o rolo e no interior posicionado outro tubo PVC de 40 mm de diâmetro para a passagem da haste metálica e ligado ao suporte metálico.



Figura 17 – Emprego do rolo compactador construído com material reciclado.

Utilizado os procedimentos descritos foi possível obter boa produtividade e economia do equipamento utilizados, contribuindo ambientalmente com a reciclagem dos materiais empregados no rolo. A Figura 18 apresenta a praça antes e após a reforma realizada com o pavimento permeável.

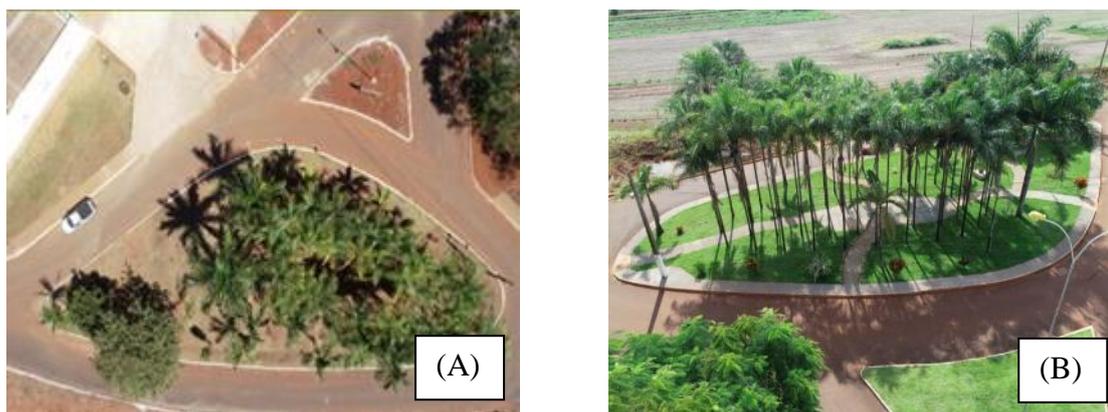


Figura 18 – Vistas da praça: (a) antes e (b) após a conclusão das obras.

Ao avaliar a permeabilidade da pista de teste construída, foram observadas as permeabilidades obtidas na Figura 19, e é possível perceber que todas as amostras apresentaram permeabilidade superior ou igual a 1 mm/s, valor este requerido pela norma ABNT NBR 16416:2015 (ABNT, 2015).

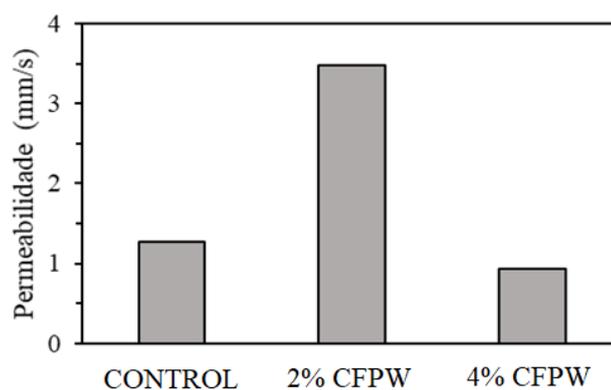


Figura 19 – Resultados de permeabilidade em campo.

Observa-se também na Figura 19 que a composição com 2% de CFPW obteve maior permeabilidade, sendo de aproximadamente 3,5 mm/s. Para as amostras com o traço CONTROL e 4% CFPW 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.

8.4. Conclusões

Com o desenvolvimento deste estudo foi possível concluir que se considerar apenas o preço dos materiais para construção de pavimento de concreto permeável moldado *in loco* será inferior em 11,46% ao de concreto convencional, principalmente

pelo baixo teor de cimento na mistura e ausência de agregado finos. O CFPW promove o fechamento dos poros do concreto permeável, porém pode ser aplicado em baixos teores para atender os limites normativos, seu uso é recomendado dando destinação mais sustentável para o material. Com o rolo compressor desenvolvido é possível reduzir os custos de execução e, conseqüentemente, da produção do pavimento em geral, entregando uma superfície regular conforme o solicitados para passeios de concreto.

8.5. Referências (Capítulo 2 – Artigo 2)

- [1] DANIEL, Francisco Javier De La Mota *et al.* Porous-permeable pavements promote growth and establishment and modify root depth distribution of *Platanus× acerifolia* (Aiton) Willd. in simulated urban tree pits. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 33, p. 27-36, 2018.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522, Farmington Hills, Michigan, 2010.
- [3] SUMANASOORIYA, Milani S.; NEITHALATH, Narayanan. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 8, p. 778-787, 2011.
- [4] KHANKHAJE, Elnaz *et al.* Sustainable clean pervious concrete pavement production incorporating palm oil fuel ash as cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 1476-1485, 2018.
- [5] MOHAMMED, Bashar S. *et al.* Properties of nano-silica modified pervious concrete. *Case studies in construction materials*, v. 8, p. 409-422, 2018.
- [6] SOTO-PÉREZ, Linoshka; HWANG, Sangchul. Mix design and pollution control potential of pervious concrete with non-compliant waste fly ash. *Journal of environmental management*, v. 176, p. 112-118, 2016.
- [7] CHANDRAPP, 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, 2016.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- [9] ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 70, p. 130-138, 2016.

9. CAPÍTULO 3 – SOFTWARE

PROGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DAS APLICAÇÕES DO CONCRETO PERMEÁVEL: ANÁLISES E CORREÇÕES

(Programa registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI)

9.1. Apresentação

O programa elaborado tem o objetivo de auxiliar pesquisadores e profissionais do ramo da construção civil na análise e elaboração de traços de concreto permeável. O software desenvolvido foi programado em Python 3.10, utilizando a biblioteca gráfica “tkinter” para a criação da interface e facilitar sua aplicação.

Com o software tem a possibilidade de receber como dados de entrada as informações quanto a identificação da amostra (código, data e características), dados do traço empregado (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água, adições e aditivos) além das propriedades da amostra do estado endurecido, como: índice de vazios, permeabilidade, resistência mecânica à compressão e flexão.

Como dados de saída do programa tem-se uma análise completa das propriedades das amostras e recomendações da aplicabilidade do concreto permeável. Com as informações fornecidas do traço o programa por meio da análise elaborada propõe quando necessário alterações na composição para caso o usuário do programa deseje ampliar seu leque de aplicações possíveis para a amostra avaliada.

O software desenvolvido ainda fornece um comparativo do traço inserido pelo usuário com os valores recomendados na literatura e normas vigentes, indicados quais são limites máximos e mínimos para cada componente do concreto permeável. De forma, análoga é realizado uma análise das propriedades da amostra no estado endurecido, sendo também fornecido dados quanto aos limites normativos e pequeno estudo específico de cada características indicando o que pode ser realizado com os valores fornecidos.

9.2. Interface

O software apresenta duas interfaces principais e algumas secundárias como alerta para o auxiliar o usuário no preenchimento dos formulários. Com a Figura 20 é possível observar a interface inicial do software que são divididos em quatro principais áreas, sendo a primeira relacionada com a inserção dos dados da amostra, segunda área com as informações do traço, terceira com as propriedades no estado endurecido e por fim a área com o botão de envio do formulário para a análise do software.

The screenshot shows a software window titled 'CONCRETO PERMEÁVEL'. The interface is divided into three main sections: 'Dados da Amostra', 'Traço', and 'Propriedades da Amostra'. At the bottom right, there is a 'CLASSIFICAR' button.

Dados da Amostra

Código	Data	Identificação
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Traço

Cimento	AG. Miúdo	AG. Graúdo	Água
<input type="text"/> kg/m ³			

Adições

Descrição	<input type="text"/>	Qtd.	<input type="text"/>
-----------	----------------------	------	----------------------

Aditivo

Descrição	<input type="text"/>	Qtd.	<input type="text"/>
-----------	----------------------	------	----------------------

Propriedades da Amostra

Resistência à Tração	<input type="text"/>	MPa
Resistência à Compressão	<input type="text"/>	MPa
Permeabilidade	<input type="text"/>	mm/s
Índice de Vazios	<input type="text"/>	%

CLASSIFICAR

Figura 20 – Tela Inicial.

Caso o usuário insira informações que não estão de acordo com o esperado pelo software, como letras ou caracteres especiais nos campos designados a números, um sistema automático de validação de formulários irá identificar e exibir mensagem conforme o exemplo da Figura 21. Com a submissão do formulário para a análise há também outra verificação para identificar se todos os campos foram preenchidos corretamente e se há dados faltando, podendo emitir a mensagem de alerta da Figura 22.

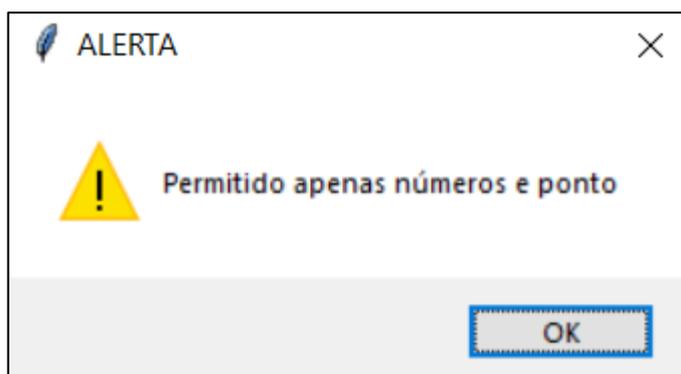


Figura 21 – Mensagem de aviso de preenchimento de dados.

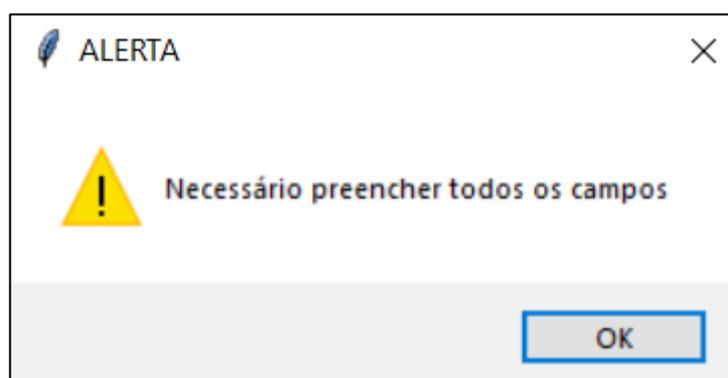


Figura 22 – Mensagem de aviso de dados incompletos.

Após a validação e processamento dos dados o programa gerará uma tela contendo três principais áreas, sendo a primeira destinada a indicar a aplicações recomendadas (Figura 23), a segunda a análise do traço com a indicações dos limites usuais e normativos (Figura 24) e por fim a área das análises das propriedades no estado endurecido (Figura 25)

APLICAÇÕES RECOMENDADAS

ÓTIMA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
 Podendo ser aplicado em diversas formas, como:

- × Placa de concreto permeável para Tráfego Leve (espessura 80,0 mm)
- × Placa de concreto permeável para Tráfego de Pedestres (espessura 60,0 mm)
- × Concreto permeável moldado in loco para Tráfego Leve (espessura 100,0 mm)
- × Concreto permeável moldado in loco para Tráfego de Pedestres (espessura 60,0 mm)

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DENTRO DA FAIXA MÍNIMA
 Necessário alterações no traço caso o foco seja resistência a compressão
 Podendo ser alterado diversos componentes de forma individual ou conjunta, como:

- × Aumentar o consumo de cimento
- × Reduzir a relação água / cimento
- × Utilizar adições pozolanicas ou com efeito filler
- × Aumentar o consumo de agregado miúdo, caso possua

Figura 23 – Aplicações recomendadas a partir da análise do software.

ANÁLISE DO TRAÇO

Componentes	Adotado	Superior	Inferior
Cimento (kg/m³)	500	270.00	415.00
Ag. Miúdo (kg/m³)	1500	0.00	100.00
Ag. Graúdo (kg/m³)	1500	1190.00	1480.00
Água (kg/m³)	100	0.26	0.45
Adição (kg/m³)		3.00	10.00
Aditivos (kg/m³)		0.32	1.20

Figura 24 – Indicação dos limites para os componentes do concreto permeável.

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES

Propriedade	Obtido	Recomendado	Análise
Resistência à Tração (MPa)	10 MPa	> 1.00 MPa	Ótima resistência à tração
Resistência à Compressão (MPa)	15 MPa	> 2.80 MPa	Adequada, porem está na faixa míni
Permeabilidade (mm/s)	1 mm/s	> 1.00 mm/s	Permeabilidade adequada
Índice de Vazios (%)	20 %	15.0 até 35.0%	Índice de Vazios adequado

Figura 25 – Análise das propriedades por meio do processamento do software.

9.3. Conclusão

Com a elaboração do programa foi possível criar um software capaz de auxiliar pesquisadores e a indústria da construção civil na dosagem e a análise das propriedades do concreto permeável. O software apresenta uma interface interativa e amigável ao usuário, facilitando seu uso e o código fonte foi amplamente documentado e permite expansões e atualizações de suas funcionalidades.

10. CONCLUSÃO GERAL

Com estudo proposto verificou-se a aplicação do resíduo do polimento de pisos de concreto (CFPW) em baixos teores nos pavimentos de concretos permeáveis aumenta as resistências mecânicas sem grandes perdas de permeabilidade, com destaque para as idades iniciais. A aplicação do concreto permeável como piso em larga escala pode ser benéfica com a redução de custos quando comparada ao concreto convencional além de proporcionar aumento da área permeável e redução de problemas de drenagem na edificação e melhora do ciclo hidrológico afetados pelos grandes centros urbanos. Em conclusão, o uso do software auxilia na difusão da aplicação do concreto permeável na construção civil e ampara pesquisadores no desenvolvimento de novos traços.