

**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**

**AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS E SÍLICA
ATIVA EM CONCRETO PERMEÁVEL**

Autora: Kelly Patrícia Torres Vieira Brasileiro

Orientador: Dr. Bacus de Oliveira Nahime

Coorientador: Dr. Michell Macedo Alves

Coorientador: Dr. Elton Carvalho Lima

RIO VERDE - GO

MARÇO - 2023

KELLY PATRÍCIA TORRES VIEIRA BRASILEIRO

**AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS E SÍLICA
ATIVA EM CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campos Rio Verde – Área de concentração Tecnologia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime

Coorientador: Dr. Michell Macedo Alves

Coorientador: Dr. Elton Carvalho Lima

RIO VERDE - GO

MARÇO - 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, saúde e proteção.

Agradeço a minha família, mãe Maria Aparecida Vilela Torres, esposo Luis Antônio Anacleto Brasileiro, filhos João Pedro Torres Brasileiro e Ana Luisa Torres Brasileiro, sogros David Brasileiro e Vera Lucia Anacleto Brasileiro. Aos demais familiares, tios, tias e primos, representados pela tia Lilian Vilela Torres, Carolina Torres Alvares e Silma Maria de Sousa. Agradeço pela ajuda durante esses anos de mestrado, por acreditarem e me incentivarem. Por cuidar da nossa família enquanto estive ausente, dando amor, carinho e atenção.

Agradeço ao orientador professor Dr. Bacus de Oliveira Nahime e aos orientadores Dr. Elton Carvalho Lima e Dr. Michell Macedo Alves, por aceitarem me acompanhar nessa trajetória tão importante de conhecimento e aprendizado, enriquecendo as etapas de construção desse trabalho. Foram várias reuniões, pesquisa, leitura, informações e ensinamentos que proporcionaram crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Agradeço a toda equipe do laboratório de Engenharia do IF - Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde e UniRV - Universidade de Rio Verde, representados pelo professor Dr. Bacus de Oliveira Nahime e professor Dr. Fausto Arantes Lôbo. Agradeço também ao coordenador do mestrado o professor Dr. Édio Damásio da Silva Júnior e ao diretor geral Campus Rio Verde, Dr. Fabiano Guimarães Silva.

Agradeço ao engenheiro César Pereira Bezerra Filho e aos mestres Igor Soares dos Santos e Vitor Alvares, que fizeram parte da etapa experimental do projeto, com disposição e compartilhando suas experiências.

Agradeço a Prefeitura Municipal de Rio Verde, representada pelo Prefeito Paulo Faria do Vale e pelo secretário Tyrone César Furquim, que viabilizaram a minha participação no mestrado.

Agradeço a empresa Riomix Concreto, representada pelo engenheiro Rodolfo Torres Cardoso Ferreira, que patrocinou parte dos materiais utilizados.

Agradeço a todos envolvidos direta ou indiretamente, queridos amigos e colegas de trabalho. Foram várias pessoas que me ajudaram a construir mais essa etapa de vida e estudo.

Muito obrigada.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Kelly Patrícia Torres Vieira Brasileiro, filha de Maria Aparecida Vilela Torres e José Waldomiro Cordeiro Vieira, nascida em 18 de março de 1978 na cidade de Barra do Garças, Mato Grosso. Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás, com início do curso no ano de 1997 e conclusão no ano de 2001. Ingressou no PPGEAS - Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no ano de 2020, realizando a defesa de sua dissertação em março de 2023.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. PROBLEMA	2
3. HIPÓTESE	3
4. OBJETIVOS	3
5. REVISÃO DE LITERATURA	4
5.1. Concreto Permeável	4
5.2. Uso de sílica e aditivos	6
5.3. Agregados reciclados da construção civil	7
5.4. Granulometria dos agregados	7
5.5. Absorção de água e índice de vazios	8
5.6. Resistência à compressão	9
5.7. Resistência à tração na flexão	10
5.8. Permeabilidade	11
5.9. Microestrutura	12
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
7. CAPÍTULO I	16
Título: Estudo da adição de sílica ativa na performance de concretos permeáveis	16
Resumo	17

Abstract	18
7.1. Introdução	19
7.2. Materiais e Métodos	20
7.2.1. Materiais utilizados	20
7.2.2. Dosagem dos materiais	21
7.2.3. Procedimento da mistura	22
7.2.4. Métodos dos ensaios absorção e índice de vazios	22
7.2.5. Método do ensaio de permeabilidade	23
7.2.6. Métodos dos ensaios de resistência mecânica	24
7.2.7. Métodos dos ensaios de microestrutura	24
7.3. Resultados e Discussão	25
7.3.1. Ensaio de absorção e índice de vazios	25
7.3.2. Permeabilidade	26
7.3.3. Resistência à compressão	28
7.3.4. Resistência à tração na flexão	30
7.3.5. Microestrutura	33
7.4. Conclusão	39
7.5. Referências Bibliográficas	40
8. CAPÍTULO II	42
Título: Influence of recycled aggregates and silica fume on the performance of pervious concrete	42
Abstract	43
8.1. Introduction	44
8.2. Materials and Methods	45
8.2.1. Materials used	45
8.2.2. Dosage of materials	46
8.2.3. Mixing procedure	47
8.2.4. Absorption and void ratio test methods	47
8.2.5. Laboratory permeability test method	48
8.2.6. Methods of mechanical resistance tests.....	49
8.2.7. Microstructure test methods	50
8.2.8. Field permeability test methods	50
8.3. Results and discussion	53

8.3.1. Absorption tests and void ratio	53
8.3.2. Laboratory permeability test	54
8.3.3. Compressive strength tests	55
8.3.4. Bend tensile strength test	57
8.3.5. Microstructure test	59
8.3.6. Field permeability	64
8.4. Conclusion	65
8.5. References	66
9. CONCLUSÃO GERAL	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Comparação de concreto impermeável e concreto permeável	5
CAPÍTULO I	
Figura 1 – Fluxograma dosagem dos materiais	21
Figura 2 - Ilustração permeâmetro	23
Figura 3 - Valores de absorção e índice de vazios aos 28 dias. Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica	26
Figura 4 - Permeabilidade para o tempo de cura úmida 28 dias. Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica	27
Figura 5 - Resultados resistência à compressão em função do tempo de cura em amostras de concreto permeável: Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica	28
Figura 6 - Resultados resistência à tração em função do tempo de cura em amostras de concreto permeável: Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica	31
Figura 7 - Curvas de TG e DTG para as misturas de concreto permeável aos 28 dias: (a) Aref, (b) AAS5, (c) AAS7 e (d) AAS10	34
Figura 8 - Teor em massa de água quimicamente combinada, portlandita remanescente e calcita, após 28 dias de cura	35
Figura 9 - Difração de raios-X em concreto permeável após 28 dias de cura úmida. (a) Aref, (b) AAS5, (c) AAS7 e (d) AAS10	36

Figura 10 - Microestruturas por microscopia eletrônica de varredura em concreto permeável após 28 dias de cura úmida. (a) Aref, (b) AAS5 e (c) AAS7 37

Figura 11 - Microestruturas por microscopia eletrônica de varredura em concreto permeável após 28 dias de cura úmida. (a) Aref e (b) AAS10 38

CAPÍTULO II

Figura 1 - Flowchart of the dosage of materials 46

Figura 2 - Permeameter illustration 48

Figura 3 - Equipment used in the tests: (a) compressive strength and (b) tensile strength 50

Figura 4 - Pervious concrete test track with construction waste 51

Figura 5 - Compaction of applied recycled pervious concrete 51

Figura 6 - PVC pipe ring used in the permeability test 52

Figura 7 - Sketch of test track in pervious concrete with construction waste 52

Figura 8 - Absorption and voids index relationship at 28 days 53

Figura 9 - Relationship between permeability and density at 28 days 54

Figura 10 - Compressive strength results..... 56

Figura 11 - Results of tensile strength in flexion 57

Figura 12 - TG/DTG test images at 56 days: (a) Aref, (b) A40, (c) A50, and (d) A60 59

Figura 13 - Content by mass of chemically combined water, remaining portlandite, and calcite after 56 days 61

Figura 14 - XRD test images at 56 days: (a) Aref, (b) A40, (c) A50, and (d) A60 62

Figura 15 - SEM test images at 56 days: (a) Aref, (b) A40, (c) A50, and (d) A60 63

Figura 16 - Permeability test for the field and laboratory stages 64

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I	
Tabela 1: Quantidade materiais para cada um metro cúbico de concreto permeável	22
Tabela 2: Análise de variância (ANOVA) de dados da resistência à compressão	29
Tabela 3: Análise de variância (ANOVA) de dados da resistência à tração	32
Tabela 4: Teor dos produtos de hidratação em concreto permeável	35
CAPÍTULO II	
Table 1: Aggregate properties	46
Table 2: Material quantity of the samples	47
Table 3: Analysis of variance (ANOVA) of permeability data.....	55
Table 4: Analysis of variance (ANOVA) of compressive strength data	56
Table 5: Analysis of variance (ANOVA) of flexural strength data	58
Table 6: Relationship between flexural strength and compressive strength	58
Table 7: Percentage of hydration products in pervious concrete	60

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/ Sigla	Significado (Unidade de Medida)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Graus Celsius
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio / Portlandita
CH	Hidróxido de Cálcio / Portlandita
CO ₂	Dióxido de carbono
cm ³	Centímetros cúbicos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DRX	Difração de Raios X
DTG	Termogravimetria Derivada
g	Gramas
H ₂ O	Água
Kg	Quilograma
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	Milímetros
NBR	Norma Brasileira
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
SEM	Scanning Electron Microscope
TG	Termogravimetria
µm	Micrômetro

RESUMO

BRASILEIRO, KELLY PATRÍCIA TORRES VIEIRA BRASILEIRO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro 2023. **Avaliação do uso de agregados reciclados e sílica ativa em concreto permeável**. Orientador: Bacus de Oliveira Nahime. Coorientadores: Michell Macedo Alves e Elton Carvalho Lima.

O concreto permeável contribui para o desenvolvimento sustentável. Utilizado na pavimentação externa contribui de forma positiva para amenizar os impactos do escoamento superficial das águas pluviais, permitindo que a água da chuva infiltre total ou parcialmente no solo, aliviando o sistema de drenagem e diminuindo a velocidade da água. Este trabalho aborda a proposta de utilização de agregados reciclado da construção para fabricação de concreto permeável, de modo a otimizar os aspectos econômico-financeiros e mitigar danos ambientais. Para o desenvolvimento da pesquisa foi conduzida inicialmente a revisão bibliográfica, seguida da etapa de experimentos em laboratório, conteúdo este dividido em dois capítulos. O primeiro capítulo analisou amostras de concreto permeável com aditivo superplastificante e acréscimo de sílica ativa nos níveis de 5%, 7% e 10%. O segundo capítulo aborda a avaliação de amostras de concreto permeável com a substituição de 40%, 50% e 60% do agregado natural brita 0 por agregados reciclados. Os ensaios realizados foram resistência mecânica à compressão, resistência à tração na flexão, permeabilidade, microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) e análise térmica (TG/DTG). Os resultados indicaram que as amostras de concreto permeável com acréscimo de 10% de sílica ativa e substituição de 40% agregados reciclados apresentaram melhores resultados dentre as propriedades analisadas e, todas as amostras apresentaram valores superiores ao estabelecido na norma ABNT NBR 16416/2015, para utilização em concreto permeável em áreas de tráfego para pedestres.

Palavras-chave: Concreto permeável, agregado reciclado, microscopia, resistência.

ABSTRACT

Pervious concrete contributes to sustainable development. Used in external paving, it makes a positive contribution to mitigating the impacts of surface runoff of rainwater, allowing rainwater to infiltrate fully or partially into the ground, relieving the drainage system and reducing the speed of water. This work addresses the proposal to use recycled construction aggregates to manufacture pervious concrete, in order to optimize the economic and financial aspects and mitigate environmental damage. For the development of the research, a bibliographic review was initially conducted, followed by the stage of laboratory experiments, the content of which is divided into two chapters. The first chapter analyzed pervious concrete samples with superplasticizer additive and addition of silica fume at the levels of 5%, 7% and 10%. The second chapter deals with the evaluation of pervious concrete samples with the replacement of 40%, 50% and 60% of the natural aggregate gravel 0 by recycled aggregates. The tests performed were compressive strength, flexural strength, permeability, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (DRX) and thermal analysis (TG/DTG). The results indicated that the pervious concrete samples with an addition of 10% of silica fume and replacement of 40% recycled aggregates showed better results among the analyzed properties, and all the samples showed values higher than those established in the ABNT NBR 16416/2015, for use on pervious concrete in pedestrian traffic areas.

Keyword: Pervious concrete, recycled aggregate, microscopy, resistance.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Uma das maiores geradoras de resíduos do mundo é a indústria da construção civil, gerando mais de 10 bilhões de resíduos da construção e demolição (RCD), impactando o ambiente através de consumo excessivo de matérias-primas, energia e emissões de gases de efeito estufa (MARQUES *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2019). Em 2020 no Brasil, mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos foram gerados por RCD, correspondendo aproximadamente a 47 milhões de toneladas (ABRELPE, 2023). Com o crescente aumento dos resíduos da construção e demolição, a União Europeia estabeleceu a reutilização de 70% dos RCD's como forma de reduzir o impacto na saúde humana, meio ambiente e melhorar a eficiência dos recursos disponíveis (GONZÁLEZ *et al.*, 2017).

A reciclagem e reutilização de RCD cria oportunidades econômicas e ambientais desses materiais, com a possibilidade de o setor de construção utilizar os resíduos reciclados (ISLAM *et al.*, 2019). E contribuir diretamente para a solução de um dos principais objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda das Nações Unidas de 2030: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis reduzindo a poluição ambiental, a restrição do uso de matéria-prima virgem extraída de fontes finitas e a diminuição da deposição de resíduos nos aterros sanitários (ONU, 2015; MOURA *et al.*, 2018).

Visando alternativas para implementação de políticas e planos de infraestruturas sustentáveis, em consonância com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº 307, 2002), será instalada no município de Rio Verde - GO uma Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, originando agregados reciclados através da separação balística e britagem. Contudo, há necessidade de estudos para verificar as possíveis utilizações destes agregados. Este trabalho avaliou a possibilidade de incorporar os agregados reciclados em concreto permeável, bem como estabelecer o acréscimo de sílica ativa, visando aumento da resistência mecânica deste concreto.

Nesta percepção, a proposta de substituição parcial do agregado brita por agregado oriundo da reciclagem de RCD em concreto permeável, favorece a reutilização e a reciclagem desses resíduos, reduzindo os impactos gerados pela atividade e por todos os setores envolvidos no processo de forma sustentável. Esse processo também reduz as áreas de extração dos agregados naturais, preservando os recursos naturais (MATAR & BARHOUN, 2020).

Concreto permeável é outro tema que tem atraído atenção como alternativa sustentável para pavimentação, permitindo a infiltração da água em períodos de chuva, que pode retornar ao lençol freático ou ser reutilizada (VIEIRA *et al.*, 2020). Indicado para tráfego leve é usado em sistemas de pavimentação permeável como estradas, calçadas, entradas de automóveis, estacionamentos e outras aplicações (ALSHAREEDAH *et al.*, 2021). Porém para aplicação adequada, é necessário otimizar suas propriedades e seu dimensionamento (VIEIRA *et al.*, 2020). Visando concretos mais resistentes e duradouro, Bilal *et al.* (2021) sugerem a adição de sílica ativa que contribui positivamente para as propriedades mecânicas do concreto, além de possibilitar a redução do impacto ambiental para produção do concreto leve. Já que a sílica é um resíduo das indústrias de ferro silício (FERNANDES *et al.*, 2020).

Este estudo foi estruturado em dois capítulos, o capítulo 1 buscou o traço adequado para concreto permeável com aditivo superplastificante e acréscimo de sílica ativa nos níveis de 5%, 7% e 10%. O capítulo 2, a partir do melhor resultado encontrado no capítulo 1, que foi o concreto permeável com aditivo superplastificante e 10% de sílica ativa, avaliou a influência da substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto nos níveis de 40%, 50% e 60%. Nos dois casos foram analisados os ensaios de absorção, índices de vazios, permeabilidade, resistência à compressão, resistência à tração, análise térmica (TG/DTG), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2. PROBLEMA

Para atendimento da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº 307, 2002) o Município de Rio Verde - GO instalará uma Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, a fim de coletar e beneficiar mais de 180 toneladas diárias de RCD proveniente da construção civil, fornecendo material de consumo para a prefeitura (PMGIRS, 2018). Conforme sugerido pela ABRECON (2022), este material servirá como agregado para concreto, pois parte do material permanece em granulometrias graúdas.

O concreto permeável é um concreto considerado especial, por possuir pouco ou nenhum agregado fino na mistura, é caracterizado como concreto poroso e permite que a água passe por ele (LIU *et al.*, 2020; VIEIRA *et al.*, 2020). Apesar dos agregados reciclados exibirem valores altos de absorção de água, em relação aos agregados normais, sua utilização na composição do concreto permeável apresenta baixa resistência (5,5 MPa) quando observada

nas misturas RCD 80% e RCD 100% (YAP *et al.*, 2018). Porém, foi observado que o uso de agregado reciclado em concreto permeável tem influência na resistência à compressão, em que o aumento do conteúdo agregado reciclado diminui a resistência à compressão do concreto obtido (ALIABDO *et al.*, 2018). Assim, há necessidade de estudar as misturas dos agregados de RCD reciclados provenientes da Usina de Rio Verde para a composição do concreto permeável a fim de manter sua permeabilidade e resistência à compressão, além da análise de microestrutura.

3. HIPÓTESE

Supõe-se que os agregados de resíduos da construção provenientes da usina de reciclagem do Município de Rio Verde - GO possam ser utilizados em concreto permeável, mantendo as propriedades mecânicas e de permeabilidade do concreto permeável acima dos valores mínimos estabelecidos na norma ABNT NBR 16416/2015, para utilização em áreas de tráfego para pedestres.

4. OBJETIVOS

O objetivo geral é utilizar os agregados de resíduos da construção da usina de reciclagem do Município de Rio Verde em concreto permeável.

Os objetivos específicos são:

1. Determinar a melhor dosagem do concreto permeável reciclado que atenda os limites mínimos estabelecidos nas normas vigentes para concreto permeável, sendo ABNT NBR 16416/2015 e ACI - 522R-10;
2. Avaliar a influência da substituição do agregado natural por agregado reciclado em concreto permeável com sílica ativa, nas propriedades de: resistência à compressão, resistência à tração na flexão, permeabilidade, absorção de água e índice de vazios;

3. Analisar a microestrutura do concreto permeável com agregado reciclado e sílica ativa por meio dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios-X (DRX) e Análise Térmica (TG/DTG).

5. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica foi realizada com consultas em livros e revistas científicas consultadas através das plataformas ScienceDirect e Scielo. Após definido o banco de dados para a seleção dos artigos e elaboração da revisão atualizada, iniciou a busca a partir da definição das palavras-chave: pavimentação, drenagem, concreto poroso, concreto permeável, concreto permeável agregado reciclado, agregado reciclado, no período compreendido entre 2016 a 2023.

Para melhor análise, priorizou artigos científicos de propriedades do concreto permeável e concreto permeável com agregado reciclado, e excluiu teses, dissertações e trabalhos que não tinham no título ou resumo o assunto estudado.

Considerou estudos sobre concreto permeável, uso de sílica ativa e utilização de agregados reciclados nos níveis de substituição de 0 a 100%. Buscou a melhor dosagem de substituição dos agregados no concreto permeável.

Esse tópico foi estruturado apresentando o concreto permeável, o uso de sílica e aditivos, a substituição de agregados reciclados e, as propriedades que serão investigadas neste estudo, sendo, a granulometria dos agregados, absorção de água, e índice de vazios, resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade e microestrutura. Os autores compararam os resultados com os limites especificados em normas vigentes.

5.1. Concreto permeável

Após a Segunda Guerra Mundial, o concreto permeável surgiu na Europa, a partir da busca de novos métodos para a construção de edifícios (ACI-522-R, 2010). A aplicação de concreto permeável em pavimentação está em destaque e continua crescendo pelos benefícios ambientais e práticas sustentáveis (COSTA *et al.*, 2021). O uso de pavimentos permeáveis em substituição aos impermeáveis ajuda a devolver ao solo a capacidade de absorção e retenção da água superficial. A infiltração da água no concreto permeável é favorecida pela estrutura de poros conectados no seu interior (WANG *et al.*, 2019). É produzido com cimento, agregado

gráudo e pouco ou nenhum agregado miúdo. A ausência de agregados finos no concreto permeável é que o caracteriza como concreto poroso e permite que a água passe por ele (COSTA *et al.*, 2021; BILAL *et al.*, 2021). A Figura 1 apresenta o concreto permeável e o concreto convencional impermeável, em que é possível observar os poros do concreto e a infiltração da água.

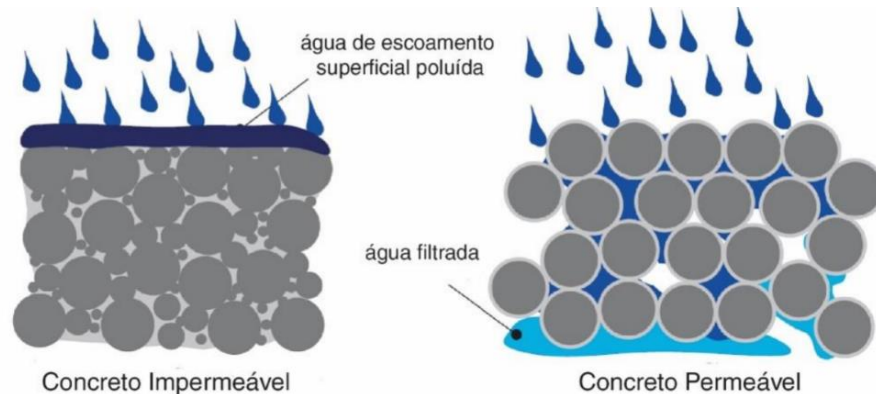


Figura 1 - Comparação de concreto impermeável e concreto permeável.
Fonte: ZHONG *et al.*, 2018.

O concreto permeável possui alto conteúdo de vazios e alta permeabilidade à água se comparados com o concreto convencional. Permite a passagem de água e ar através de suas camadas, permitindo que parte ou a totalidade da água infiltrada seja captada e conduzida por um destino correto ou simplesmente absorvida pelo subsolo, mitigando problemas urbanos relacionados à impermeabilização do solo. Os pavimentos de concreto convencional são impermeáveis e causam desequilíbrio no ciclo hidrológico, reduzindo a infiltração e provocando inundações, enchentes e alagamentos (ZAETANG *et al.*, 2016).

A ocorrência de enchentes, que provoca grande acúmulo de águas pluviais dentro das cidades, afetam diversas cidades no mundo. Segundo o relatório de desastres naturais relacionados ao clima acontecidos entre 1995-2015, as cheias e desastres naturais afetaram 2,3 bilhões de pessoas no mundo. Mencionaram que no Brasil, em 2017, cerca de três milhões de pessoas foram afetadas por alagamentos, enxurradas e inundações. Medidas para prevenir e reduzir a ocorrências de enchentes e evitar os estragos causados são muito importantes, assegurando saneamento para todos, cidades e assentamentos humanos seguros, resilientes e sustentáveis (IPEA, 2020).

Uma das medidas apresentadas para a redução do risco da ocorrência de enchentes são os pavimentos permeáveis, que infiltram as águas. Podem ser utilizados em ruas, estradas de tráfego leve ou pesado e em estacionamentos. Existem três tipos principais: i) asfaltos/concretos porosos, misturas asfálticas ou de concreto padrão em que os agregados mais finos foram removidos parcial ou total, tornando-o mais poroso; ii) blocos de concreto intertravados, permitem a passagem da água através dos vazios dos blocos; iii) sistemas de grades plásticas, praticamente sem área de superfície impermeável, fornecem estabilidade estrutural e maior infiltração (IPEA, 2020). O concreto permeável é considerado material ecológico, durável, sustentável, que pode ser usado em passarelas para pedestres e ciclovias (ZAETANG *et al.*, 2016; ALSHAREEDAH *et al.*, 2021).

Essa tecnologia de pavimentação tem estimulado os profissionais da área e pesquisadores a investirem esforços na busca de conhecimento e melhores soluções para as deficiências de resistência e durabilidade. Tornando importante os estudos e análise de resultados em projeto de concreto permeável, com foco na proporção da mistura, ensaios, caracterização e incorporação de resíduos e materiais reciclados e projeto estrutural de pavimentos de concreto permeáveis (AL-SHAREEDAH *et al.*, 2021).

5.2. Uso de sílica e aditivos

A aplicação de sílica ativa em compósitos cimentícios, como acréscimo ou substituição do cimento, melhora as características mecânicas e de durabilidade, além de contribuir para a sustentabilidade da indústria da construção, diminuindo o consumo de cimento, economizando recursos naturais, reduzindo os danos ambientais e diminuindo as emissões de CO₂ (LOU *et al.*, 2023). Bai *et al.* (2022) utilizou sílica ativa para substituir parte do cimento ao preparar o concreto de agregado reciclado, a fim de melhorar a baixa resistência à compressão e módulo de elasticidade. Bilal *et al.* (2021) também utilizaram sílica ativa em seus estudos que favoreceu ganhos de resistência à compressão com efeito de enchimento e reação pozolânica dos materiais cimentícios.

A utilização de aditivos redutores de água e superplastificantes são usados com o intuito de melhorar a trabalhabilidade e fluidez da mistura, favorece a distribuição da pasta de cimento que reveste o agregado, evita endurecimento da superfície inferior (AL-SHAREEDAH *et al.*, 2021), controle da hidratação dos materiais cimentícios, aumento do tempo de manuseio, facilidade de compactação (COSTA *et al.*, 2021), viscosidade da pasta de cimento e a adesão pasta-agregado, fortalecendo a zona de transição e aumentando as propriedades mecânicas (LIMA *et al.*, 2022).

5.3. Agregados reciclados da construção civil

A utilização de resíduos da construção e demolição tem efeito econômico e ambiental positivo, porque contribui para a redução do consumo de recursos naturais, reduz custos relacionados à manutenção de aterros sanitários, diminuição de áreas de depósitos desses resíduos, através da destinação adequada (LIMA *et al.*, 2022). Ibrahim *et al.* (2020) usaram agregado reciclado em seus estudos como substituto do agregado graúdo, visando desenvolvimento sustentável diante do aumento de resíduos de construção e demolição gerados na Malásia.

Os resíduos da construção possuem maior rugosidade superficial, são mais angulares e irregulares quando comparados aos agregados naturais. Possuem baixa massa específica aparente e alta absorção de água. Devido ao processo de britagem para a sua produção apresentam fissuras em seu interior, que podem diminuir as propriedades mecânicas do concreto (LIMA *et al.*, 2022).

Visando melhorias da microestrutura do agregado, como microfissuras e fracas zonas de transição de interface, Yang *et al.* (2021) em seu estudo, analisou agregado reciclado reforçado por revestimento de pasta na superfície, avaliando a espessura da pasta em diferentes tamanhos de agregados, a fluidez com uso de sílica ativa, relação água/cimento e uso de superplastificante.

5.4. Granulometria dos agregados

A dimensão dos agregados reciclados e a distribuição granulométrica influenciam a porosidade, propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. Aliabdo *et al.* (2018), em sua pesquisa sobre concreto permeável com agregados de concreto, compararam agregados com diâmetros de 9,5 e 19 mm, e verificaram que o aumento da dimensão dos agregados reciclados resultou no aumento da porosidade da mistura. Analisaram porcentagens de concreto permeável com agregados reciclado com substituições 0%, 50% e 100%.

Yap *et al.* (2018) estudaram o concreto permeável com agregados 100% naturais (NA) e diferentes teores de substituição 0% 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de agregados reciclados (RCA), de tamanhos entre 4,5 e 9,5 mm, relatando que quantidade menor de pasta de cimento é suficiente para revestir os agregados dentro desse intervalo.

Ibrahim *et al.* (2020) estudaram agregados reciclados coletados em estado bruto no local de demolição de Pusat Bandar Damansara em Kuala Lumpur, Malásia e, com o auxílio de um britador de mandíbulas, foram quebrados em partículas de tamanhos menores entre 4,75 e

10 mm. Os estudos indicam que o tamanho de agregado selecionado é adequado para aumentar as propriedades do concreto permeável.

Vieira *et al.* (2020) empregaram dois tipos de agregados graúdos, natural e reciclado, de 9,5 mm, com substituição de agregado natural por agregado reciclado de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Os agregados reciclados apresentaram variedade de tamanhos e presença de contaminantes sendo necessário a separação manual. Observaram que 69,52% era composto por argamassa velha e agregado cerâmico, que possuem grande influência nas propriedades frescas e endurecidas do concreto permeável, apresentando baixa resistência mecânica e maior absorção de água.

Yang *et al.* (2021) utilizaram o agregado reciclado (RCA) composto principalmente de concreto triturado de resíduos de demolição e tijolos, e o agregado graúdo natural composto de dolomita. O teor de umidade do agregado reciclado e do agregado natural, no estado seco superficial saturado (SSD) foi de 2% e 10%, respectivamente. Testaram quatro tipos de tamanhos diferentes de agregados sendo 4,75 a 9,5mm, 9,5 a 13,2 mm, 13,2 a 16mm e 16 a 19mm, reforçados por revestimento de pasta na superfície. A capacidade de revestimento da pasta foi maior em agregados de tamanho pequeno do que em agregados de tamanho grande. No entanto, a espessura de pasta em agregados grandes foi maior do que em agregados pequenos.

5.5. Absorção de água e índice de vazios

Os resíduos da construção possuem maior rugosidade superficial, são mais angulares, irregulares e porosos quando comparados aos agregados naturais, influenciando no aumento da absorção de água (LIMA *et al.*, 2022). O agregado reciclado tem menor densidade, maior capacidade de absorção e menor resistência à abrasão comparado ao agregado natural (EL-HASSAN *et al.*, 2019).

O agregado reciclável estudado por Ibrahim *et al.* (2020) era composto por agregados naturais e pasta de cimento antiga, caracterizado com menor densidade e maior porosidade e absorção de água. O coeficiente de absorção do agregado reciclado foi igual a 8%. Lima *et al.* (2022) encontraram o índice de absorção de água igual a 11,24% para o agregado reciclado estudado e El-Hassan *et al.* (2019) igual a 6,63%. Yap *et al.* (2018) encontraram o percentual de absorção igual a 3,04 para os agregados naturais de proporções 5-10 mm e de 6,13 para os agregados reciclados.

Lu *et al.* (2019) também observaram que os agregados reciclados exibem valores mais altos de absorção de água do que os agregados naturais. Para evitar absorção de água do processo de mistura do concreto e alteração da trabalhabilidade, Vieira *et al.* (2022) utilizaram agregado reciclado no estado superfície saturada seca (SSD).

O índice de vazios é a relação entre quantidade de sólidos e vazios da amostra, relacionado a permeabilidade e resistência do material (ABNT-NBR 16416/2015). Lima *et al.* (2022) verificaram que a estrutura de poros do concreto permeável com agregados reciclados aumentou a conectividade e o tamanho dos poros. Quanto maior o índice de vazios e consequentemente a permeabilidade do material, menor a resistência aos esforços.

El-Hassan *et al.* (2019) verificaram que a substituição de agregado natural por agregado reciclado apresentou aumento no conteúdo de vazios. A forma angular e textura rugosa do agregado reciclado, possibilita maior aprisionamento de ar no concreto, podendo ser pela menor massa de argamassa aderida ao agregado reciclado, resultando em estrutura de concreto porosa.

5.6. Resistência à compressão

O uso de agregado reciclado diminui a resistência à compressão do concreto, que pode ser explicado pelo maior índice de vazios no concreto com agregado reciclado e pela má aderência entre o agregado reciclado e a pasta de cimento. Aliabdo *et al.* (2018) encontraram redução na resistência à compressão do concreto em 28 dias com agregado de 9,5 mm de 5% e 31% para os níveis de agregado reciclado de 50% e 100%, respectivamente, comparados com a mistura controle. Para o tamanho de agregado de 19 mm, essa redução em 28 dias da resistência à compressão foi de 17% e 42% para níveis de agregado reciclado de 50% e 100%, respectivamente. Os resultados mostram aumento na resistência à compressão do concreto permeável com a diminuição do tamanho do agregado de 19 mm para 9,5 mm. Mencionam que os resultados alcançados cumprem o estabelecido pelo ACI 522R, e que o uso do agregado 19,00 mm atingiu o limite mínimo.

A resistência a compressão estudada por Yap *et al.* (2018) aos 1, 7 e 28 dias, apresentou maior valor para a mistura referência (NA) igual a 11,4 MPa. As misturas contendo agregados reciclados RCA 20% mostraram resistência compressiva muito próxima à mistura de NA. A menor resistência de 5,5 MPa foi observada nas misturas RCA 80% e RCA 100%. As resistências à compressão de misturas contendo baixo conteúdo de RCA 20-40% e alto conteúdo de RCA 60-100% mostraram redução da força de 1 a 13% e 20 a 40%,

respectivamente. Explica que a redução da resistência se deve ao volume de pasta, a relação pasta de agregado/cimento e má ligação de pasta de cimento agregado.

Yap *et al.* (2018) entenderam ser aceitáveis resistências à compressão na faixa de 10 a 13 MPa para estacionamentos, proteção de pedras, pavimentos de drenagem e produtos de concreto pré-moldado poroso. Uma resistência menor é aceitável para passarelas de pedestres pois o concreto permeável não será sujeito a cargas veiculares. No estudo realizado por Ibrahim *et al.* (2020) a resistência à compressão variou de 10,5, 11,5 e 9 MPa para a relação água/cimento 0,30, 0,35 e 0,40, respectivamente.

Vieira *et al.* (2020) obtiveram ganho de resistência à compressão para amostras com fator relação água/cimento igual a 0,30, que pode estar relacionado com a maior quantidade de água disponível para as reações de hidratação do cimento. Verificaram decréscimo na resistência à compressão para amostras com cinzas quando compararam concretos com a mesma relação água/cimento igual a 0,30 com amostras com 10% de cinzas e amostras sem cinzas. A melhora da resistência com a utilização de cinzas acontece ao longo do tempo, podendo ser observado aos 63 dias.

5.7. Resistência à tração na flexão

Yap *et al.* (2018) encontraram que os efeitos da substituição dos agregados de reciclagem nas forças de tração são semelhantes a resistência à compressão, em que o aumento no conteúdo de agregado de concreto reciclado diminui a força. Um concreto quebradiço, frágil, resultará em perda completa e instantânea da capacidade de carga. As razões de fragilidade foram expressas como razões de resistência à compressão e flexão. As amostras contendo alta quantidade de RCA 60%, 80% e 100% sofreram redução de 30-32% na resistência à flexão.

Aliabdo *et al.* (2018) verificaram que o aumento dos níveis de substituição do agregado reciclado diminui a resistência à flexão do concreto permeável. A diminuição da resistência à flexão para 50% e 100% de agregados reciclados é de 18,8% e 41,2%, respectivamente para o tamanho agregado 9,5 mm e de 34% e 54% no caso de agregado 19 mm. O efeito negativo do uso de agregado reciclado pode ser atribuído as más características da zona de transição que afeta a resistência à tração do concreto. A comparação entre as resistências à ruptura e à flexão indicam que o uso de agregado reciclado de 50% e 100% apresentam valores de resistência à tração inferiores às faixas recomendadas. O uso de sílica ativa melhorou a resistência à flexão.

No estudo realizado por Ibrahim *et al.* (2020) o concreto apresentou os resultados de resistência à tração variando de 0,98 MPa a 1,32 MPa. Yang *et al.* (2021) encontraram valores

de resistência à tração na flexão variando de 1,3 a 2,7 MPa. Lima *et al.* (2022) encontraram resultados de resistência à flexão estatisticamente iguais., apresentando resistência à tração na flexão superior a 1 MPa, estando de acordo com as diretrizes analisadas, superiores aos recomendados pelas normas, sendo adequado para uso no tráfego de pedestres.

Vieira *et al.* (2020) observaram que os valores de resistência à flexão são maiores para a relação água/cimento igual a 0,30 por causa da maior quantidade de água livre, influenciando na melhor formação dos produtos hidratados. A utilização de agregados reciclados diminuiu a resistência, mas manteve nos valores aceitáveis. A utilização de 10% de cinzas aumentou a resistência à tração.

5.8. Permeabilidade

O concreto permeável permite que a água passe por sua estrutura. Yap *et al.* (2018) avaliaram o desempenho do concreto permeável e todas as misturas obtiveram boa aparência física com boas estruturas de poros interconectados. A faixa do coeficiente de permeabilidade encontrado variou entre 1,42 e 2,64 cm/s. O concreto permeável com valores de permeabilidade entre 0,1 e 3,3 cm/s é adequado para ser usado como camada de drenagem para pavimentos ou blocos de concreto. As misturas de agregados reciclados RCA 20% e RCA 40% apresentaram coeficientes de permeabilidade próximos ao da mistura controle. A taxa de permeabilidade aumenta em 31-65% em relação à mistura controle para as amostras de RCA acima de 40%. A permeabilidade do concreto permeável pode ser explicada pela fraca ligação de pasta agregada, atribuído ao tamanho dos poros, agregados e proporções de mistura.

Aliabdo *et al.* (2018) observaram que o aumento do agregado reciclado aumenta a permeabilidade da água. A porcentagem para o agregado de tamanho 19 mm foi de 7,4% e 13,7% para substituição de agregado reciclado de 50% e 100%, respectivamente e para o tamanho de 9,5 mm, as porcentagens de aumento foi de 13,3% e 18,8%. O uso de sílica ativa diminuiu a permeabilidade em 11,5% e 19,2% para 5% e 10% de sílica ativa, respectivamente, em comparação com a mistura de controle sem sílica ativa.

No estudo de Lu *et al.* (2019) prepararam amostras com agregados grossos que tiveram permeabilidade à água muito maior do que as amostras preparadas com agregados finos. Os coeficientes permeáveis diminuíram 28,2% e 25,7%, nas amostras preparadas com o tamanho único de agregados finos e agregados graúdos, respectivamente, podendo ser explicado pela utilização da sílica que aumentou o volume do ligante, por ter menor densidade que o cimento, resultando no entupimento localizado da pasta e diminuição da conectividade dos poros. Os

coeficientes de permeabilidade encontrados por Ibrahim *et al.* (2020) tiveram pouca variação, o valor de 2,465 cm/s para a relação água/cimento 0,30, valor de 2,531 cm/s para a relação água/cimento 0,35 e o valor de 2,497 cm/s para a relação água/cimento 0,40.

Vieira *et al.* (2020) verificaram aumento da permeabilidade para as amostras com relação água/cimento 0,25 de acordo com a substituição do agregado reciclado, exceto para a amostra de 75% de substituição, em que os valores foram decrescentes. Para as amostras com relação água/cimento 0,30 teve aumento para as amostras com 25 e 75% de substituição e um decréscimo considerável para as amostras com 50% de substituição. Para as amostras que utilizaram sílicas o fator permeabilidade ficou próximo das amostras com relação água/cimento igual a 0,30 e abaixo das amostras com relação/água cimento de 0,25.

Lima *et al.* (2022) obtiveram aumento do teor de vazios, garantindo rápida percolação da permeabilidade. Para amostras referência a permeabilidade foi de 0,42 cm/s para VP22. A permeabilidade para as amostras com teor de pasta de 22% (VP22) e com substituição de 50% e 100% de agregado natural por reciclado, aumentou em 13% e 67%, respectivamente, em relação a amostra referência. Nos estudos de El-Hassan *et al.* (2019) os coeficientes de permeabilidade variaram de 1,88 a 4,05 mm/s para misturas de 10% de porosidade, e faixa de 6,00–21,14 mm/s para misturas de 20% de porosidade.

5.9. Microestrutura

A construção da zona de transição do agregado reciclado pode ser afetada pelo tipo de agregado, em que aqueles constituídos por argamassa e pequenos agregados contêm mais poros e fissuras, e diferem dos compostos de agregados graúdos naturais e argamassas a eles ligados. Pode-se encontrar ao redor do agregado reciclado dentro do concreto duas zonas de transição, uma em torno do agregado reciclado e argamassa de cimento nova e, a outra, entre agregados naturais e argamassa velha colada. A quantidade de água absorvida pela argamassa na zona de transição também pode afetar o processo de hidratação e cura interna, dependendo do volume de argamassa aderida ao agregado reciclado (JALILIFAR *et al.*, 2021).

Yap *et al.* (2018) verificaram ao analisar amostras em microscópio de mão, em imagens ampliadas, que a maior quantidade de pasta agregada era visível na amostra referência e a quantidade de ligação diminuiu à medida que a substituição de agregado reciclado RCA foi aumentada para 60% e 100%. A presença de argamassa aderida na amostra de agregado reciclado absorve a água da mistura e reduz a quantidade de pasta de cimento que resulta em pouca ligação entre a pasta de cimento e o agregado grosso, reduzindo a resistência à

compressão. Análises microestruturais foram utilizadas para examinar o caminho de propagação das fissuras. Utilizaram o microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (FESEM) e a espectroscopia de raios-X dispersiva por energia (EDX) para estudar os mecanismos de falha nas misturas referência e com agregados reciclados. A amostra com 100% agregado reciclado, apresentou menos ramificação, enquanto o plano de falha da amostra referência apresentou maior ramificação e desvio de direção. Uma propagação de fissuras ramificadas resulta em maior resistência à compressão, pois é necessária mais energia para causar falhas no concreto.

Ibrahim *et al.* (2020) avaliaram a microestrutura das amostras de concreto permeável com agregados reciclados e a micrografia FESEM de amostras fraturadas após um teste de compressão mostra superfície fraturada plana com alterações mínimas em sua propagação do caminho da fissura, enquanto em amostras com finos a superfície da fratura foi rugosa e irregular.

Lu *et al.* (2019) encontraram que a substituição de 10% de sílica melhorou a viscosidade da pasta de cimento, e a ligação entre as partículas do agregado e da zona de transição interfacial (ITZ). Como a área ITZ dos agregados graúdos era menor do que a dos finos, houve aumento da resistência para os agregados graúdos em comparação aos agregados finos.

Vieira *et al.* (2020) verificaram o aumento da porosidade do concreto conforme aumentava a proporção de substituição do agregado reciclado. A porosidade do concreto permeável com agregado reciclado foi benéfica ao avaliar os critérios de permeabilidade e infiltração. E, deve ser avaliado e considerado a sua fragilidade em relação a microestrutura em relação à microfissuras no ITZ, que têm influência nas propriedades mecânicas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABRECON, Mercado. [São Paulo, 2022b]. Disponível em: <https://abrecon.org.br/reciclagem-de-entulho-residuos-da-construcao-e-demolicao/mercado/>. Acesso em 15 junho 2022.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. PANORAMA 2021 DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL. Disponível em: [http:// https://abrelpe.org.br/](http://https://abrelpe.org.br/). Acesso em 01 abr. 2023

- ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; FAWZY, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Volume 193, pp. 105-127, 2018.
- ALSHAREEDA, O.; NASSIRI, S. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. **Journal of Cleaner Production**, Volume 288, 125095, March 2021.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522, Farmington Hills, Michigan, 2010.
- BAI, W.; LU, X.; GUAN, J.; YUAN, C. Experimental study on uniaxial compression mechanical properties of recycled concrete with silica fume considering the effect of curing age. **Construction and Building Materials**, Volume 350, 128758, 2022.
- BILAL, H.; CHEN, T.; REN, M.; GAO, X.; SU, A. Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 275, 122124, 2021.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - Resolução nº307. Brasília, DF, 2002.
- COSTA, F. B. P., HASELBACH, L. M., FILHO, L. C. P. da S. Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. **Construction and Building Materials**, Volume 268, 121084, 2021.
- EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOU, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, Volume 212, pp. 164-175, 2019.
- FERNANDES, S. C.; BARRO, R. P.; FERREIRA, A. S.; BARROS, L. M. Produção de concreto de alta resistência com utilização de superplastificante e adição de microssílica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, 2020.
- GONZÁLEZ, J.S.; GAYARRE, F.L.; PÉREZ, C.L.C.; ROS, P.S.; LÓPEZ M.A.S. Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. **Construction and Building Materials**, v. 149, p.507-514, 2017.
- IBRAHIM, H. A.; GOH, Y.; NG, Z. A.; YAP, S. P.; MO, K. H.; YUEN, C. W.; ABUTAHA, F. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, Vol.253, 119251, 2020.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. Controle de Enchentes. Publicado 03 de dezembro de 2020. Acesso em: 17 de março de 2021.
- ISLAM, R.; NAZIFA, T.H.; YUNIARTO A.; UDDIN, A.S.M.S.; SALMIATI, S.; SHAHID, S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10-21, 2019.
- JALILIFAR, H.; SAJEDI, F. Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, volume 267, 121041, 2021.
- LIMA, G. T. DOS S.; R, J. C.; CHERIAF, M. Investigation of the properties of pervious concrete with a recycled aggregate designed with a new combination of admixture. **Construction and Building Materials**, Volume 340, 127710, 2022.

- LIU, M.; XIA, J.; CHIN, C. S.; LIU, Z. Improving the properties of recycled aggregate pervious pavement blocks through bio-mineralization. **Construction and Building Materials**, Volume 262, 120065, 2020.
- LOU, Y.; KHAN, K.; AMIN, M. N.; AHMAD, W.; DEIFALLA, A. F.; AHMAD, A. Performance characteristics of cementitious composites modified with silica fume: A systematic review. **Case Studies in Construction Materials**, Volume 18, e01753, 2023.
- LU, J.; YAN, X.; HE, P.; POON, C. S. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, Volume 234, pp. 1102-1112, October 2019.
- MARQUES, H. F.; RIBEIRO, C.C.; OLIVEIRA, D.M.; BAMBERG, P.; ALMEIDA, M.L.B. Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v.6, p. 21912-21930, 2020
- MOURA, J. M. B. M.; GOHR PINHEIRO, I.; CARMO, J. L. Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. **Waste management**, v. 74, p. 98-109, 2018.
- ONU (2015). Agenda das Nações Unidas de 2030. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Objetivo 12: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso em: 01 de maio de 2023.
- PMGIRS. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Rio Verde – Goiás. Expert – Consultoria e Treinamentos Ltda, Rio Verde, 2018.
- SILVA G.T.M., RIBEIRO, C.C., RIBEIRO, S.E.C., OLIVEIRA, D.M., OLIVEIRA, W.S., ALMEIDA, M.L.B. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v.6, p. 21912-21930, 2020.
- SILVA, R.V., de BRITO, J., DHIR, R.K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 1-15, 2019.
- VIEIRA, G. L.; SCHIAVON, J. Z.; BORGES, P. M.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, Volume 271, 122665, October 2020.
- WANG, J.; WU, H.; TAM, V.W.Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p.1004-1014, 2019.
- YANG, L.; KOU, S.; SONG, X.; LU, M.; WANG, Q. Analysis of properties of pervious concrete prepared with difference paste-coated recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, Volume 269, 121244, 2021.
- YAP, S. P.; CHIEN, P. Z. C.; GOH, Y.; IBRAHIM, H. A.; MO, K. H.; YUEN, C. W. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, Volume 181, pp. 155-165, 2018.
- ZAETANG, Y.; SAJA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycle concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Volume 111, 15, 2016.

7. CAPÍTULO I - ARTIGO 1

Estudo da adição de sílica ativa na performance de concretos permeáveis

ISSN 1415-8876 - Revista Ambiente Construído

Qualis A3 - Engenharias I - quadriênio 2017-2020

RESUMO

O concreto permeável permite a passagem de água por suas camadas, que infiltra parcial ou totalmente no solo, contribuindo de maneira positiva com o sistema de drenagem urbano e redução de enchentes. O objetivo deste estudo é determinar a faixa ideal de adição de sílica ativa em concreto permeável. Para a análise realizada utilizou-se concreto permeável com aditivo superplastificante e acréscimo de sílica ativa nos níveis de 5%, 7% e 10%. Os ensaios avaliados foram absorção, índices de vazios, permeabilidade, resistência à compressão, resistência à tração, análise térmica (TG/DTG), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicaram que o concreto permeável com acréscimo de 10% de sílica ativa apresentou o melhor resultado dentre as propriedades analisadas, e todas as amostras apresentaram valores superiores ao estabelecido na norma ABNT NBR 16416/2015 para utilização em concreto permeável em áreas de tráfego para pedestres.

Palavras-chave: Concreto permeável, sílica ativa e resistência à compressão.

ABSTRACT

Pervious concrete allows water to pass through its layers, which partially or completely infiltrates the soil, making a positive contribution to the urban drainage system and reducing flooding. The objective of this study is to determine the ideal range of addition of silica fume in pervious concrete. To carry out the analysis, we used permeable concrete with superplasticizer admixture and the addition of silica fume at 5%, 7%, and 10%. The tests evaluated were absorption, void ratios, permeability, compressive strength, tensile strength, thermal analysis (TG/DTG), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). The results indicated that the pervious concrete with an addition of 10% of silica fume presented the best result among the properties analyzed, and all samples presented values higher than those established in the ABNT NBR 16416/2015 standard for use in pervious concrete in traffic areas for pedestrians.

Keyword: Pervious concrete, silica fume, and compressive strength.

7.1. INTRODUÇÃO

A aplicação de concreto permeável favorece a melhoria da infiltração e escoamento das águas pluviais, aumento da resistência à derrapagem da superfície do pavimento, qualidade da água subterrânea e redução do efeito ilha de calor (XIE et al., 2019). O uso do concreto permeável em pavimentação está em destaque e continua crescendo por causa dos benefícios ambientais e práticas sustentáveis (COSTA et al., 2021).

Esse material possui alto índice de vazios e alta permeabilidade se comparado ao concreto convencional, permitindo a passagem de água e ar através de sua capilaridade, permitindo que parte ou a totalidade da água infiltrada seja captada e devolvida ao solo, contribuindo com a descarga pluvial. O concreto permeável também é considerado um material ecológico, durável, sustentável, que pode ser usado em diversas aplicações na engenharia civil e na arquitetura, como em áreas de parques, áreas com pouco tráfego, passarelas para pedestres e ciclovias (ZAETANG et al., 2016).

Na China, o concreto permeável foi empregado para mitigar alguns problemas urbanos, como onde aconteciam enchentes e também em alguns locais onde o sistema de drenagem estava sobrecarregado, obtendo, assim, excelentes resultados (WANG et al., 2017; ZHONG et al., 2018). O grande acúmulo de águas pluviais que afeta regiões adensadas por construções que são normalmente muito povoadas causa enchentes. Segundo o relatório de desastres naturais relacionados ao clima acontecidos entre 1995-2015, as cheias e desastres naturais afetaram 2,3 bilhões de pessoas no mundo; já no Brasil, em 2017, cerca de três milhões de pessoas foram afetadas por algum desses três eventos: alagamentos, enxurradas ou inundações (IPEA, 2020).

Na realidade atual, buscar medidas para prevenir e reduzir a ocorrência de enchentes e evitar estragos é de extrema importância; para tanto, o desenvolvimento do setor de saneamento das cidades e assentamentos humanos torna os locais de uso humano mais seguros, resilientes e sustentáveis (IPEA, 2020).

Essa tecnologia de pavimentação tem estimulado os profissionais da Engenharia Civil e pesquisadores a investirem esforços na busca de conhecimentos e soluções para o desenvolvimento de materiais que atendam às normas vigentes de acordo com as devidas utilizações, com foco na permeabilidade, resistência e durabilidade. Alguns estudos vêm abordando o desenvolvimento de dosagens de concreto permeável, com foco na incorporação

de resíduos da construção civil, uma vez que são materiais volumosos e encontrados em abundância nos grandes centros urbanos, que podem contribuir com o meio ambiente em dois aspectos: a destinação adequada dos resíduos e a permeabilidade para o pavimento urbano, possibilitando a devolução de águas pluviais ao solo através de percolação (ALSHAREEDAH et al., 2021).

A infiltração da água no solo através do concreto permeável é favorecida pela estrutura de poros conectados no seu interior. Esse material é produzido com os seguintes materiais: cimento Portland, agregado graúdo (natural ou reciclado) e pouco ou nenhum agregado miúdo (WANG et al., 2019). A baixa quantidade de agregados finos no concreto permeável é que o caracteriza como concreto permeável, permitindo assim a passagem de água através dos vasos comunicantes. Outro componente contribuinte é o aditivo modificador de reologia, que melhora a densificação e fluidez da mistura. O uso de adição como a sílica ativa favorece ganhos de resistência à compressão com o efeito de preenchimento e reações pozolânicas, quando adicionada a materiais cimentícios (COSTA et al., 2021; BILAL et al., 2021).

O objetivo deste estudo é determinar a faixa ideal de adição de sílica ativa na dosagem do concreto permeável. Para a análise realizada utilizou-se concreto permeável com aditivo superplastificante e acréscimo de sílica ativa nos níveis de 5%, 7% e 10%, investigando as propriedades através dos ensaios absorção, índices de vazios, permeabilidade, resistência à compressão, resistência à tração, análise térmica (TG/DTG), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para, através de análise laboratorial, desenvolver a melhor mistura aqui testada.

7.2. MATERIAIS E MÉTODOS

7.2.1. Materiais utilizados

Para a dosagem de concreto permeável utilizou-se cimento Portland, agregado graúdo natural denominado brita 9,5 mm, sílica ativa, aditivo superplastificante e água. O cimento utilizado foi o de estrutura CP II F 40, embalagem de 40 kg, da marca Goiás. O agregado graúdo foi obtido a partir de um conjunto granular de origem basáltica adquirido em pedreira localizada na região de Rio Verde, estado de Goiás, Brasil. A sílica ativa foi da marca Tecnosil e o aditivo

superplastificante, solução de policarboxilatos em meio aquoso, foi o Sika ViscoCrete-5700. A água veio de abastecimento local.

7.2.2. Dosagem dos materiais

Neste estudo verificou-se a influência da adição de sílica ativa nas propriedades do concreto permeável. A Figura 1 mostra o fluxograma da dosagem dos materiais e ensaios realizados.

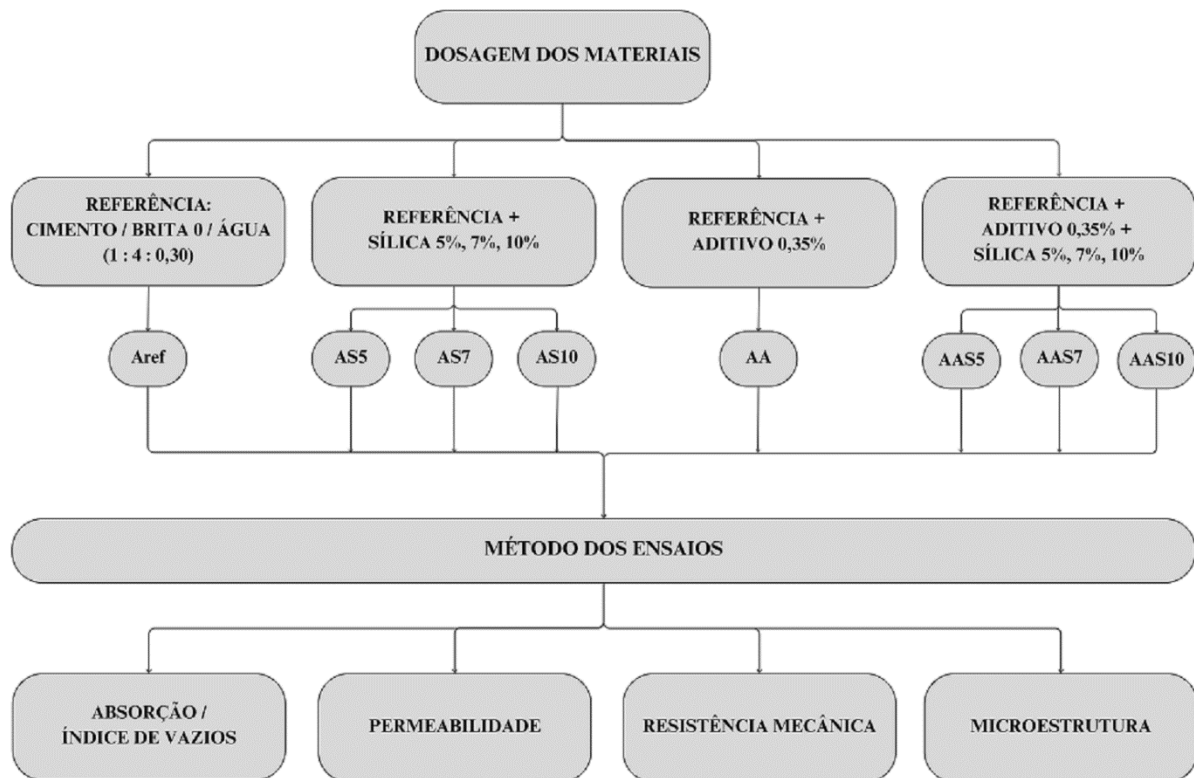


Figura 1 - Fluxograma dosagem dos materiais.

Fonte: Próprio Autor.

Para a confecção do concreto permeável utilizou-se o traço 1:4, sendo para cada uma parte de cimento quatro partes de agregado graúdo brita 9,5 mm. A amostra referência (Aref) foi produzida com cimento, brita 9,5 mm e água, com relação água/cimento igual a 0,30. Foram produzidas amostras com acréscimo de 5%, 7% e 10% de sílica no traço referência, denominadas AS5, AS7, AS10, respectivamente. Também foram produzidas amostras com acréscimo de 0,35% de aditivo superplastificante no traço referência, denominada AA. Outro lote de amostras foi produzido com acréscimo de aditivo e também com adição de 5%, 7% e 10% de sílica no traço referência, denominadas AAS5, AAS7, ASS10, respectivamente. As diferentes dosagens de concreto permeável serão apresentadas na Tabela 1, que demonstra as quantidades de materiais a serem utilizados por metro cúbico de concreto permeável.

Tabela 1: Quantidade materiais para cada um metro cúbico de concreto permeável.

Composição	Cimento (g)	Agregado natural brita 0 (Kg)	Relação a/c água (g)	Aditivo Superplastificante (g)	Sílica ativa (g)
A _{ref}	374,80	1.499,20	112,44		
AS5	374,80	1.499,20	112,44		18,740
AS7	374,80	1.499,20	112,44		26,236
AS10	374,80	1.499,20	112,44		37,480
AA	374,80	1.499,20	112,44	1,312	
AAS5	374,80	1.499,20	112,44	1,312	18,740
AAS7	374,80	1.499,20	112,44	1,312	26,236
AAS10	374,80	1.499,20	112,44	1,312	37,480

Fonte: Próprio autor.

7.2.3. Procedimento da mistura

Para a produção do concreto permeável utilizou-se misturador de tambor giratório, betoneira, misturando os agregados graúdos com pequena quantidade do cimento e sílica por 30 segundos. Acrescentou-se o restante do cimento com a sílica e misturou-se a seco por 3 minutos. Adicionou-se o aditivo e a água, aos poucos, misturou-se por 3 minutos. Em seguida, o concreto foi deixado em repouso por 2 minutos. Por último, o concreto foi misturado por mais 3 minutos. Esse procedimento foi descrito com a utilização de todos os materiais para um ciclo completo (IBRAHIM et al., 2020).

Os corpos de prova foram moldados em formas cilíndricas com diâmetro de 10 cm e altura 20 cm, onde foram compactadas três camadas com 1/3 do volume e com 25 golpes cada, com a utilização de uma haste de compactação. As amostras ficaram em câmara úmida por 24 horas e depois desmoldadas e submersas em água para cura úmida do concreto até um dia antes da data do rompimento, de acordo com a programação.

Foram produzidas 152 amostras divididas em 8 diferentes dosagens, totalizando 19 amostras cilíndricas para cada dosagem, considerando-se 3 amostras para o ensaio de resistência à compressão e 3 para o ensaio de resistência à tração na flexão por compressão diametral, para o tempo de cura de 7, 28 e 56 dias, e 1 amostra para o teste de permeabilidade aos 28 dias.

7.2.4. Métodos dos ensaios absorção e índice de vazios

Para os ensaios absorção de água e índice de vazios, adotou-se a NBR 9778/2005. Após 28 dias de cura, as amostras foram secas em estufa de laboratório à temperatura de 105

°C por 3 dias, e seu peso foi medido para a condição seca. Na sequência, foram colocadas imersas em água. Após 3 dias, foram feitas as medidas para a condição saturada e imersa. Os valores da absorção de água (A) e índice de vazios (I) foram obtidos pelas Equações 1 e 2.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

A = absorção em porcentagem (%);

I = índice de vazios em porcentagem (%);

m_{sat} = massa da amostra saturada após imersão em água;

m_s = massa da amostra seca;

m_i = massa da amostra imersa em água.

Para o cálculo da densidade endurecida aos 28 dias, adotou-se a ISO 17785-2 (2018) e aplicação da Equação 3 (NAZEER *et al.*, 2023).

$$d = m_s / v \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

d = densidade endurecida da amostra em kg/m^3 ;

m_s = massa da amostra seca em estufa em kg;

v = volume da amostra em m^3 .

7.2.5. Método do ensaio de permeabilidade

A avaliação do coeficiente de permeabilidade foi realizada através do método proposto na American Concrete Institute, ACI - 522R-10, que utiliza um permeâmetro de queda simples como mostrado na Figura 2.

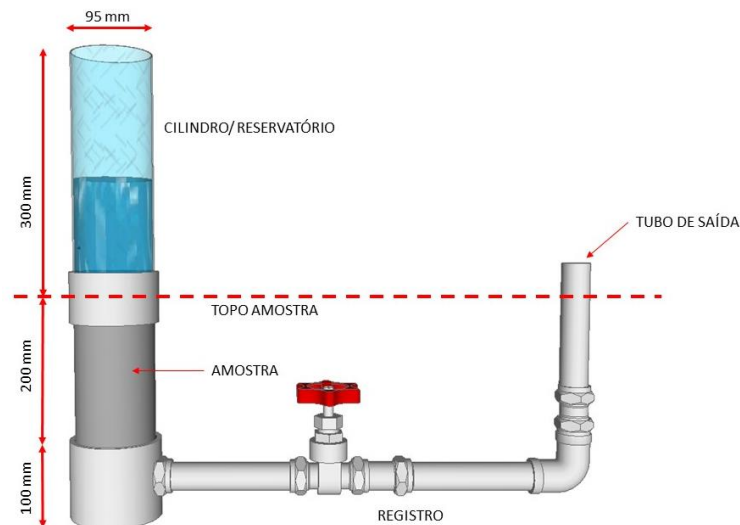


Figura 2 - Ilustração permeâmetro. Fonte: Adaptado de ACI - 522R (2010).

A análise foi realizada em laboratório com permeâmetro construído com tubos de PVC que reproduziu o equipamento citado. Desta forma, foi possível obter a medida do coeficiente de permeabilidade do concreto, utilizando a mesma metodologia proposta na norma. Para a realização do ensaio de permeabilidade, adicionou-se água no cilindro graduado permitindo que a água percorresse toda a tubulação com o registro aberto para retirada de ar. O registro foi fechado e o permeâmetro ficou com água até o nível desejado. Na sequência, o registro foi aberto e o tempo foi medido em segundos necessários para que a água percorresse a distância marcada no cilindro entre a altura manométrica inicial h_1 até a altura manométrica final h_2 . O equipamento foi calibrado para a altura inicial de 290 mm e altura final de 70 mm. A permeabilidade k foi obtida através da Equação 4:

$$k = A/t \quad \text{(Equação 4)}$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade mm/s ou cm/s;

A = área constante igual a 192 mm ou 19,2 cm;

t = tempo em segundos.

O coeficiente de permeabilidade exigido para o pavimento permeável na norma ACI - 522R-10 cita o intervalo 0,001 a 10 cm/s. O coeficiente de permeabilidade mínimo exigido para o pavimento permeável na norma ABNT NBR 16416/2015 - Pavimentos Permeáveis de Concreto é de 10^{-3} m/s.

7.2.6. Métodos dos ensaios de resistência mecânica

Para o ensaio de resistência à compressão foram adotados os procedimentos da norma ABNT NBR 5739/2018. Os corpos de prova foram capeados com enxofre. Já para o ensaio de resistência à tração na flexão, através da compressão diametral, foram adotados os procedimentos da norma ABNT NBR 12816/2012.

A resistência mecânica mínima recomendada na norma ABNT NBR 16416/2015 para concreto permeável moldado no local é de 1 MPa para tráfego de pedestre e de 2 MPa para tráfego leve, submetendo a determinação da resistência à tração na flexão, conforme ABNT NBR 12142/2010.

7.2.7. Métodos dos ensaios de microestrutura

Para a realização dos ensaios de microestrutura, foram separadas amostras de 3 a 10 mm dos corpos de provas submetidos ao ensaio de resistência à compressão, na idade de cura de 28 dias. Para interromper a hidratação do cimento, as pequenas amostras foram submersas

em acetona por 40 minutos, em temperatura ambiente, depois secas em estufa de laboratório e embaladas a vácuo. As amostras foram encaminhadas para o CRTI — Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal do Estado de Goiás para a realização dos ensaios de análise térmica (TG/DTG), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A análise térmica foi realizada com análise termogravimétrica (TG), utilizando equipamento Netzsch STA 449 F3 Nevio. As medições foram realizadas na faixa de temperatura de 25 °C a 800 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, fluxo de gás nitrogênio de 50 mL/min em cadinho aberto de alumina 85µL.

As medidas de difração de raios X (DRX) foram realizadas em difratômetro Bruker D8 Discover, utilizando radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$ operando em 40 kV e 40 mA, configuração Bragg-Brentano θ - 2θ , no intervalo de 2θ de 10° a 80°, com passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida.

A microestrutura foi obtida em microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) Jeol JSM 7100F com tensão de aceleração de elétrons de 10 kV no modo de detecção de elétrons secundários (SED). As análises composicionais foram realizadas pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS), com detector de raios-X Oxford Instruments XMax-n 80 acoplado ao microscópio. As amostras foram recobertas com carbono para a realização da análise composicional por EDS e, posteriormente, recobertas com ouro para a aquisição de imagens.

7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise realizada em concreto permeável contendo aditivo e sílica ativa são apresentados e discutidos para os ensaios índices de vazios, absorção, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, permeabilidade e microestrutura através do TG/DTG, DRX e MEV.

7.3.1. Ensaios de absorção e índice de vazios

A relação do ensaio de absorção e o índice de vazios foi apresentada na Figura 3.

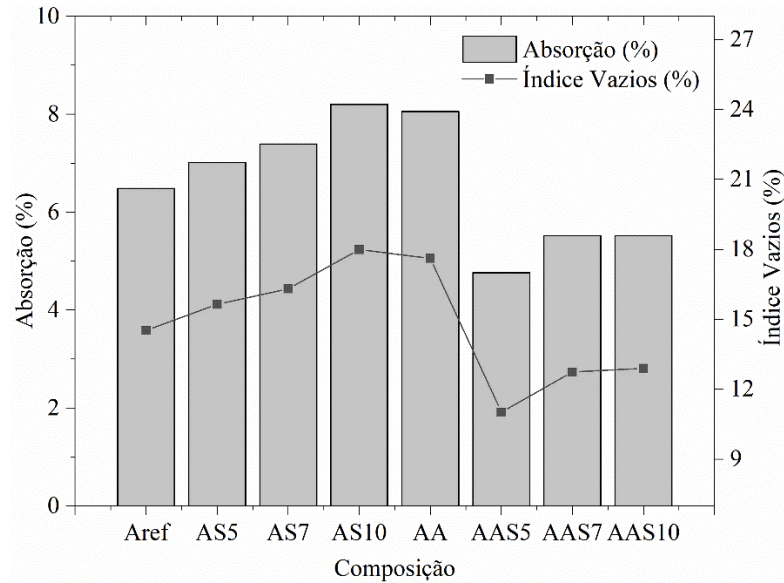


Figura 3 - Valores de absorção e índice de vazios aos 28 dias. Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica.

Fonte: Próprio autor.

Verificou-se aumento da absorção de água para as amostras somente com sílica ou aditivo (amostras AS5, AS7, AS10 e AA) em comparação à amostra referência, enquanto as amostras com adição de sílica e aditivo tiveram diminuição da absorção (amostras AAS5, AAS7 e AAS10). Um comportamento semelhante foi verificado para o ensaio de índice de vazios.

Resultados semelhantes foram encontrados por Nazeer et al. (2023) e Costa et al. (2021), em que o aumento da absorção em amostras com adição de sílica foi ocasionada pela diminuição da trabalhabilidade da mistura, pois a superfície específica da sílica é maior em relação aos valores da do cimento, sendo necessária maior quantidade de água para as reações de hidratação. No entanto, para as misturas com adição de sílica e aditivo a absorção foi menor, uma vez que o aditivo melhora a trabalhabilidade e a fluidez das misturas de concreto permeável.

7.3.2. Permeabilidade

A Figura 4 apresenta os valores encontrados para o ensaio de permeabilidade em concreto permeável para a idade de 28 dias.

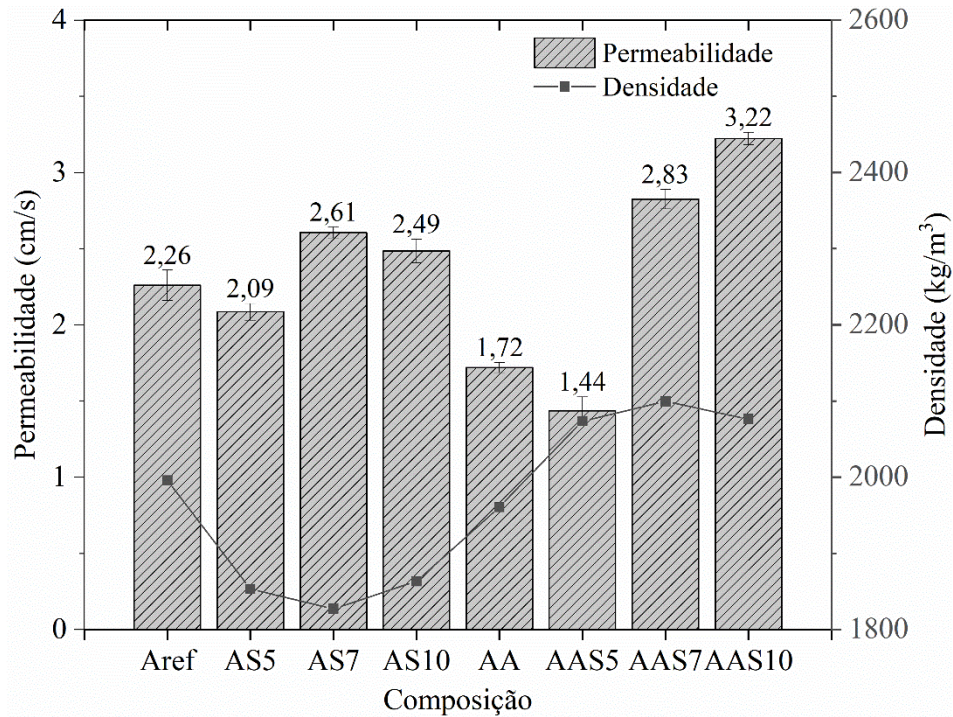


Figura 4 - Permeabilidade para o tempo de cura úmida 28 dias. Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica.

Fonte: Próprio autor.

Bilal et al. (2021) estudaram concreto permeável com adição de 5% de sílica ativa e encontraram redução no coeficiente de permeabilidade em comparação à mistura referência. Nazeer et al. (2023) também analisaram a permeabilidade em concreto permeável em amostras com 5% e 10% de sílica ativa e encontraram redução de 5% e 9%, respectivamente.

O concreto com maior trabalhabilidade pela presença do aditivo favorece a permeabilidade. Contudo, o uso excessivo do aditivo ou aumento da relação água cimento resulta na maior trabalhabilidade do concreto permeável, podendo obter misturas muito fluidas, permitindo também que a pasta escoe ou acumule na parte inferior do corpo de prova, dificultando a infiltração de água e reduzindo a permeabilidade, como cita Costa et al. (2021).

Os resultados da densidade para o estado endurecido visualizados na Figura 4 variam entre 1.800 e 2.100 kg/m³, que é menor que a densidade do concreto endurecido convencional, que varia normalmente entre 2.400 kg/m³ e 2600 kg/m³, em função dos vazios observados no concreto permeável. As amostras AAS7 e AAS10 apresentaram os maiores resultados de permeabilidade, aliadas a um crescimento de densidade, o que sugere um melhor adensamento da pasta, mas sem prejudicar os resultados de permeabilidade.

A adição de sílica resulta em aumento na densidade em comparação com a amostra de referência. Ocorre pelo efeito do encaixe da sílica na mistura, e também por melhorar a composição química, favorecendo a formação de fases C-S-H do concreto permeável, em função da granulometria das partículas mais finas. Além disso, o empacotamento mais denso da matriz contribui para o aumento na espessura da área de contato entre a pasta e os agregados, resultando em microestrutura interna mais adensada. Esse processo leva ao desenvolvimento da densidade endurecida do concreto (NAZEER et al., 2023).

7.3.3. Resistência à compressão

Os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão para as idades de 7, 28 e 56 dias estão ilustrados no gráfico da Figura 5. As amostras que continham somente adição de sílica ou aditivo superplastificante, denominadas AS5, AS7, AS10 e AA, sofreram redução no valor de resistência à compressão quando comparadas à amostra de referência. Essa diminuição da resistência à compressão em amostras que contém somente sílica deve-se a possíveis reações incompletas da pasta, quando comparada à mistura de referência (ADIL et al., 2020). Já as misturas com adição de sílica e aditivo, denominadas amostras AAS5, AAS7 e AAS10, apresentaram valores superiores à amostra de referência.

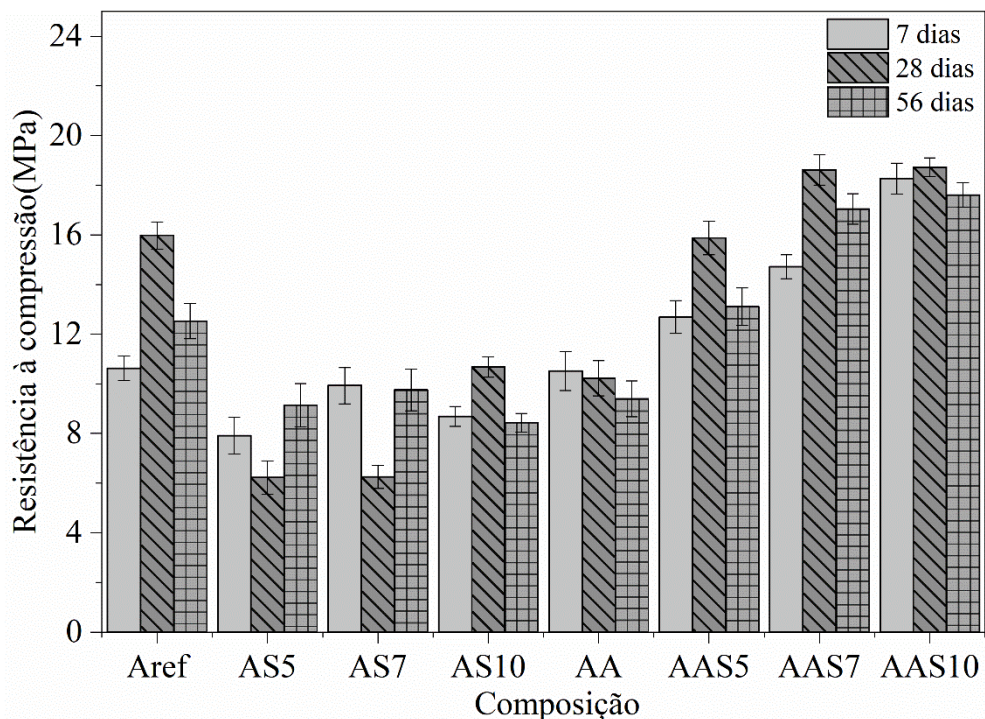


Figura 5 - Resultados resistência à compressão em função do tempo de cura em amostras de concreto permeável: Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 2 mostra os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão e a análise de variância para o concreto permeável nas idades de 7, 28 e 56 dias. Verificou-se estatisticamente que pelo menos um dos valores apresenta diferença entre os valores médios, através do intervalo de confiança de 95% com p-valor menor que 0,05. Utilizou-se o teste de Tukey pois compara e indica a diferença entre dois pares de médias e verifica se alguma dessas diferenças ficou acima do valor da diferença mínima significativa (DMS) encontrada no teste.

Tabela 2: Análise de variância (ANOVA) de dados da resistência à compressão.

Idade	Amostras	Média	Variância	Grupos	GL	SQ	QM	F	p-valor	fc	DMS
7 dias	Aref	10,62	0,24490	Entre grupo Mesmo grupo	7	245,1362	35,0194	22,368	0,0001	2,66	3,53
	AS5	7,91	0,02645		16	25,0491	1,5655				
	AS7	9,93	0,85663								
	AS10	8,68	0,17405								
	AA	10,51	0,55125								
	AAS5	12,69	0,00320								
	AAS7	14,72	0,41645								
	AAS10	18,27	0,00405								
28 dias	Aref	15,97	0,86633	Entre grupo Mesmo grupo	7	561,4419	80,2059	19,959	0,0001	2,66	5,66
	AS5	6,22	0,95080		16	64,295	4,0184				
	AS7	6,25	0,21370								
	AS10	10,67	0,17293								
	AA	10,22	0,19220								
	AAS5	15,87	0,46080								
	AAS7	18,62	0,35445								
	AAS10	18,73	0,82824								
56 dias	Aref	12,53	0,50413	Entre grupo Mesmo grupo	7	265,9305	39,77	15,306	0,0001	2,66	4,45
	AS5	9,14	0,75293		16	39,7132	2,482				
	AS7	9,75	0,71303								
	AS10	8,43	0,80645								
	AA	9,39	0,00980								
	AAS5	13,11	0,42320								
	AAS7	17,04	0,79202								
	AAS10	17,61	0,35645								

GL = grau de liberdade; SQ = soma do quadrado; QM = quadrado médio.

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os dados para a idade de 7 dias, verificou-se que as amostras AAS5, AAS7 e AAS10 apresentaram a diferença de valores médios acima do DMS encontrado no teste de Tukey quando comparadas com a amostra referência, com o incremento nos valores da resistência à compressão de 19%, 38% e 72%, respectivamente, comparadas à amostra referência. Assim, nota-se um melhor desempenho da amostra AAS10 na idade de 7 dias.

As amostras AAS5, AAS7 e AAS10, que consistem nos traços com aditivo e sílica, apresentaram também aumento de resistência à compressão nas idades de 28 dias de cura. Entre essas misturas, as composições AAS7 e AAS10 destacaram-se pelo maior ganho de resistência - tiveram ganhos de 16% e 17% respectivamente, comparadas à amostra de referência. Ao alcançar o tempo de cura de 56 dias, os traços com aditivo e adição de 7% e 10% de sílica merecem destaque ainda maior, apresentando aumentos aproximados de resistência à compressão de 36% e 40% respectivamente, quando comparados com a amostra de referência.

Bilal et al. (2021) encontraram resultados semelhantes, com aumento de resistência à compressão em concreto permeável, quando utilizaram sílica e aditivo superplastificante, o que favoreceu o efeito de enchimento e sinergia na reação pozolânica dos materiais cimentícios. Costa et al. (2021) pressupõem que a incorporação do aditivo aumentou a fluidez da mistura, fortalecendo a ligação entre a pasta e o agregado.

A incorporação do aditivo aumentou a viscosidade da mistura, fortalecendo a ligação entre a pasta e o agregado. Vale destacar também a estabilidade da resistência à compressão quando se relaciona às idades de 28 dias e 56 dias, onde todas as amostras com aditivo e adição apresentam perdas em função do processo de cura do concreto permeável — exceto as amostras com apenas adição de sílica, que apresenta um incremento, mas com baixa efetividade, quando comparada com as demais amostras. Entretanto, quando se compara a amostra de referência em relação à amostra AAS10, aos 56 dias, é notório que a amostra de referência obteve uma perda de aproximadamente 5,08 MPa, indicando que a composição AAS10 obteve uma reação mais efetiva e estável

7.3.4. Resistência à tração na flexão

Os valores encontrados no ensaio de resistência à tração para as idades de 7, 28 e 56 dias estão ilustrados no gráfico da Figura 6.

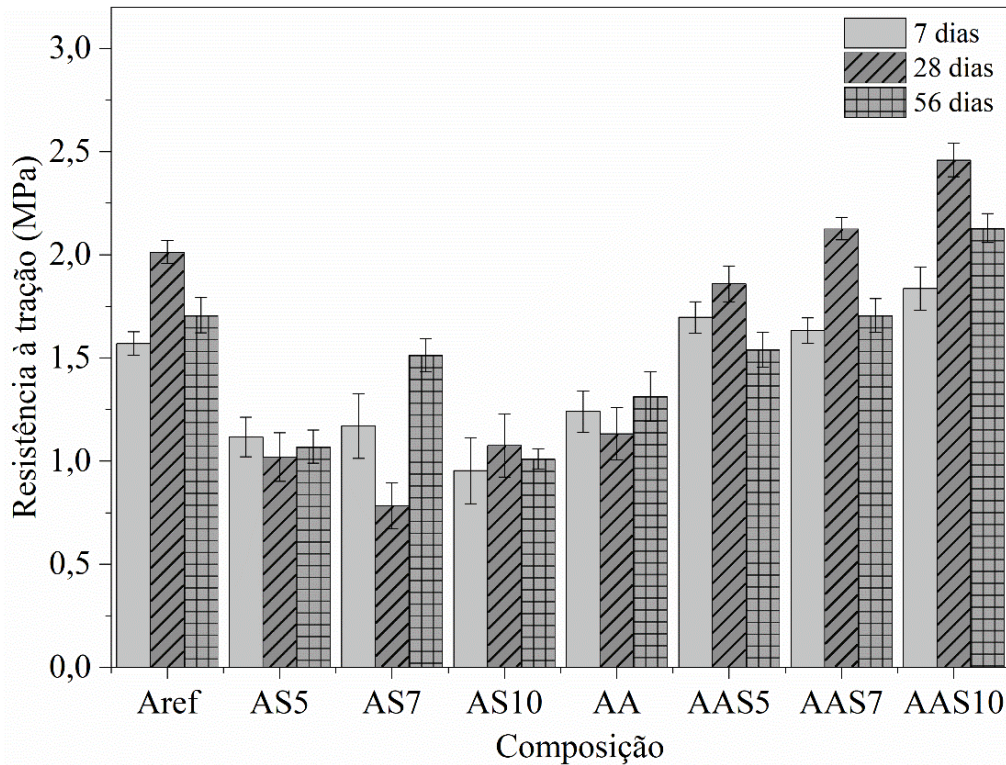


Figura 6 - Resultados resistência à tração em função do tempo de cura em amostras de concreto permeável: Aref = referência, AS5 = 5% sílica, AS7 = 7% sílica, AS10 = 10% sílica, AA = aditivo superplastificante, AAS5 = aditivo e 5% sílica, AAS7 = aditivo e 7% sílica, AAS10 = aditivo e 10% sílica.

Fonte: Próprio autor.

A amostra referência apresentou valores maiores quando comparados às amostras em que foram dosadas somente adição de sílica e ou adição de aditivo superplastificante no ensaio de resistência à tração, através de compressão diametral. As misturas dosadas com adição de sílica e aditivo apresentaram valores próximos ou superiores à amostra de referência.

A Tabela 3 mostra os valores encontrados no ensaio de resistência à tração e a análise de variância para o concreto permeável nas idades de 7, 28 e 56 dias. Verificou-se estatisticamente que pelo menos um dos valores possui diferença entre os valores médios, através do intervalo de confiança de 95% com p-valor menor que 0,05. O teste de Tukey foi utilizado pois compara e indica a diferença entre dois pares de médias e verifica se alguma dessas diferenças ficou acima do valor da diferença mínima significativa (DMS) encontrada no teste.

Tabela 3: Análise de variância (ANOVA) de dados da resistência à tração.

Idade	Amostras	Média	Variância	Grupos	GL	SQ	QM	F	p-valor	fc	DMS
7 dias	Aref	1,57	0,00320	Entre grupo	7	2,1542	0,3077	8,391	0,0002	2,66	0,54
	AS5	1,12	0,03843	Mesmo grupo	16	0,5868	0,0366				
	AS7	1,17	0,03130								
	AS10	0,95	0,02563								
	AA	1,24	0,09610								
	AAS5	1,70	0,03103								
	AAS7	1,63	0,01853								
	AAS10	1,84	0,05063								
28 dias	Aref	2,01	0,00303	Entre grupo	7	8,2112	1,173	36,69	0,0001	2,66	0,51
	AS5	1,02	0,01390	Mesmo grupo	16	0,5115	0,0319				
	AS7	0,78	0,01443								
	AS10	1,08	0,02343								
	AA	1,13	0,01623								
	AAS5	1,86	0,01480								
	AAS7	2,13	0,02403								
	AAS10	2,46	0,14590								
56 dias	Aref	1,71	0,00723	Entre grupo	7	2,8317	0,4045	7,625	0,0004	2,66	0,65
	AS5	1,07	0,00640	Mesmo grupo	16	0,8488	0,0530				
	AS7	1,51	0,01963								
	AS10	1,01	0,00250								
	AA	1,31	0,13843								
	AAS5	1,54	0,06010								
	AAS7	1,71	0,16103								
	AAS10	2,13	0,02910								

GL = grau de liberdade; SQ = soma do quadrado; QM = quadrado médio.

Fonte: Próprio autor.

Para idade de 7 dias, as amostras apresentaram incremento nos valores da resistência à tração, para as dosagens com adição de sílica e aditivo, com destaque para a mistura com adição de 10% de sílica (AAS10) e aditivo, que obteve um ganho de 17% quando comparada com a amostra de referência. Já para as amostras com 28 dias de idade, somente duas misturas obtiveram a resistência à tração superior à amostra de referência, sendo que as amostras com adição de sílica 7% e 10% e aditivo apresentaram ganho de 5% e 22%, respectivamente. Quando observadas as amostras com idade de 56 dias, a dosagem com adição de 7% de sílica e aditivo, amostra AAS7, atingiu resultado semelhante da amostra de referência. As amostras

com adição de 10% de sílica e aditivo (AAS10) apresentaram resistência à tração superior à amostra de referência, com ganho de 24%.

Resultados semelhantes foram obtidos por Bilal et al. (2021), que observaram que o concreto permeável modificado com o uso de sílica ativa apresentou aumento na resistência à flexão pela densificação da pasta, causada pelo preenchimento com partículas finas e fortemente ligada aos agregados.

A Tabela 3 traz resultados da resistência à tração, análogos aos da resistência a compressão, destacando-se o desempenho das amostras AAS10 com relação às demais amostras, onde para as idades de 7, 28 e 56 dias foram obtidas as seguintes resistências à tração: 1,84 Mpa, 2,46 Mpa e 2,13 Mpa, respectivamente, uma vez que foram os resultados de maiores valores. Nesse estudo, a dosagem de concreto permeável que resultou em maior resistência tanto à compressão quanto à tração, e também com melhor permeabilidade, foi a que utilizou agregado graúdo de D_{max} de 9,5mm, com adição de sílica ativa e concomitantemente com uso de superplastificante.

7.3.5. Microestrutura

A Figura 7 apresenta as curvas de análise TG/DTG para as amostras referência e com adição de sílica 5%, 7% e 10% para a idade de 28 dias, sendo possível identificar as perdas de massa das fases de decomposição na matriz cimentícia. Os produtos que volatilizam estão presentes na fase sólida, em vazios e na forma de água. A água quimicamente combinada faz parte dos produtos de hidratação do cimento, volatilizada pela decomposição de hidratos, e a água livre é aquela que ocupa os grandes vazios (MEHTA E MONTEIRO, 2013).

Para análise das curvas termogravimétricas apresentadas na Figura 7, considerou-se três faixas de temperatura: a primeira de até 380 °C, em que é possível determinar a água quimicamente combinada que foi volatilizada na formação dos hidratos de tobermorita e etringita; a segunda entre 380 °C e 570 °C, em que o hidróxido de cálcio é desidratado; e a última a partir de 570 °C, que é a decomposição do carbonato de cálcio através da eliminação do CO₂. A Figura 7 mostra a delimitação das três faixas de temperatura e a quantificação dos teores de compostos hidratados, como portlandita remanescente e carbonato de cálcio, encontrados por meio da análise termogravimétrica TG/DTG (SILVA et al., 2020; TANG et al., 2023).

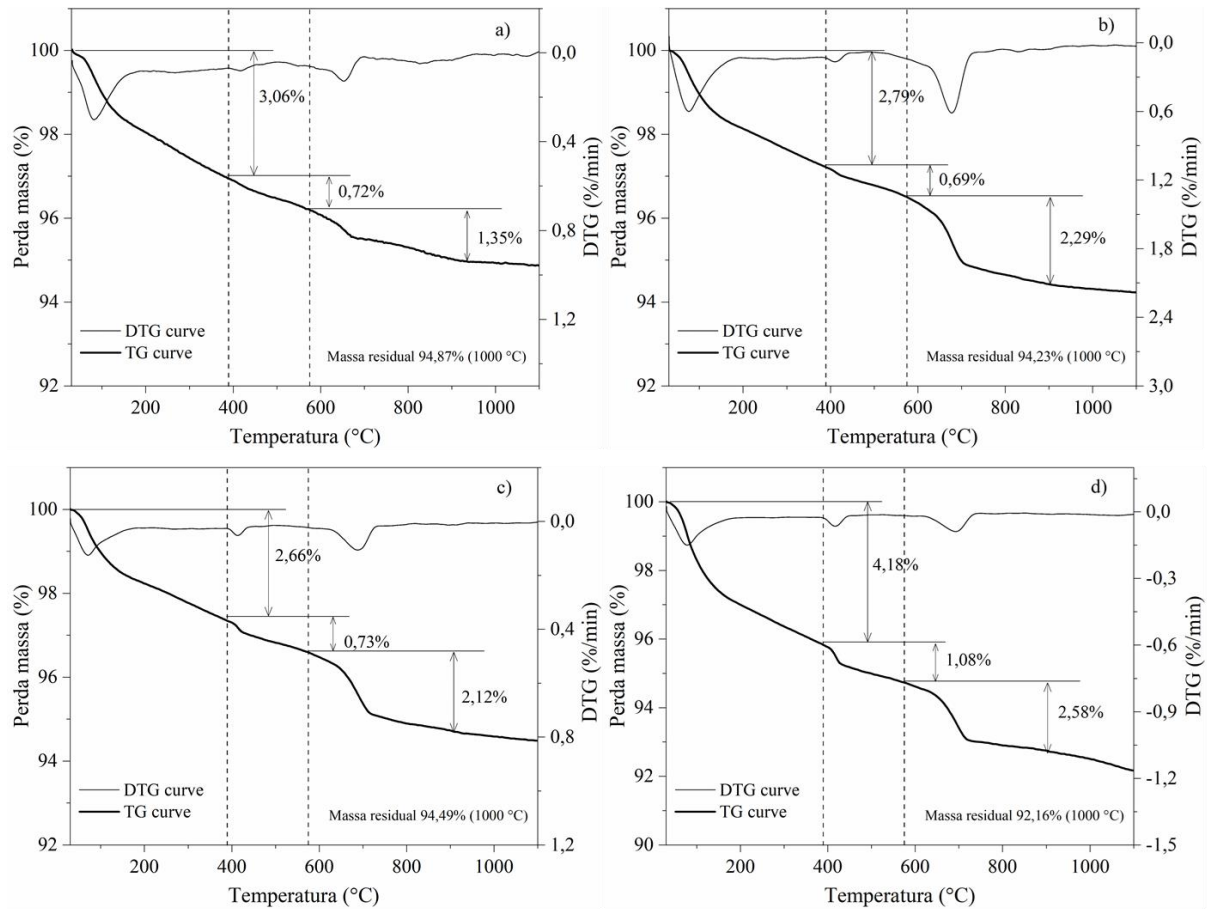


Figura 7 - Curvas de TG e DTG para as misturas de concreto permeável aos 28 dias: Aref, (b) AAS5, (c) AAS7 e (d) AAS10.

Fonte: Próprio autor

A amostra de referência apresentou massa residual igual a 94,87%, a amostra AAS5 igual a 94,23%, a amostra AAS7 igual a 94,49% e a amostra AAS10 igual a 92,16%, que foi a que apresentou maior perda de massa. As massas residuais apresentaram valores semelhantes e, para uma análise comparativa, Taylor (1997) recomenda que os valores sejam normalizados quando não estiverem na mesma base não volátil, discriminados na Tabela 4, que mostra os dados percentuais de perda de massa encontrados na Figura 7.

O teor restante de Ca(OH)_2 , indicado na Tabela 4, foi encontrado multiplicando o valor encontrado na segunda faixa de temperatura do gráfico da Figura 7, entre 380 °C e 570 °C, referente à desidratação do hidróxido de cálcio, por 4,11, que é a razão da massa molecular de Ca(OH)_2 e H_2O . O teor de carbonato de cálcio foi encontrado multiplicando o valor encontrado na terceira faixa de temperatura, a partir de 570 °C, referente à perda de massa de CO_2 , por 2,27, que é a razão da massa molecular de CaCO_3 e CO_2 . O valor da coluna do fator de normalização, para encontrar a perda de massa corrigida, foi normalizado para 100%,

relacionando o valor total de massa (100%) pela massa residual das amostras (SILVA et al., 2020).

Tabela 4: Teor dos produtos de hidratação em concreto permeável.

Amostras	Perda de massa	Água quimicamente combinada (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual (%)	Fator
			H ₂ O	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃		
Aref	Perda de massa	3,06	0,72	2,96	1,35	3,06	94,87	1,0541
Aref	Perda de massa corrigida	3,23	0,76	3,12	1,42	3,23	100,00	
AAS5	Perda de massa	2,79	0,69	2,84	2,29	5,20	94,23	1,0612
AAS5	Perda de massa corrigida	2,96	0,73	3,01	2,43	5,52	100,00	
AAS7	Perda de massa	2,66	0,73	3,00	2,12	4,81	94,49	1,0583
AAS7	Perda de massa corrigida	2,82	0,77	3,17	2,24	5,09	100,00	
AAS10	Perda de massa	4,18	1,08	4,44	2,58	5,86	92,16	1,0851
AAS10	Perda de massa corrigida	4,54	1,17	4,82	2,8	6,36	100,00	

Fonte: (SILVA *et al.*, 2020) /Adaptado pela autora.

O gráfico da Figura 8 apresenta os valores percentuais em massa de água quimicamente combinada, portlandita remanescente e calcita, encontrados nos gráficos da Figura 7, curvas de TG e DTG e Tabela 4.

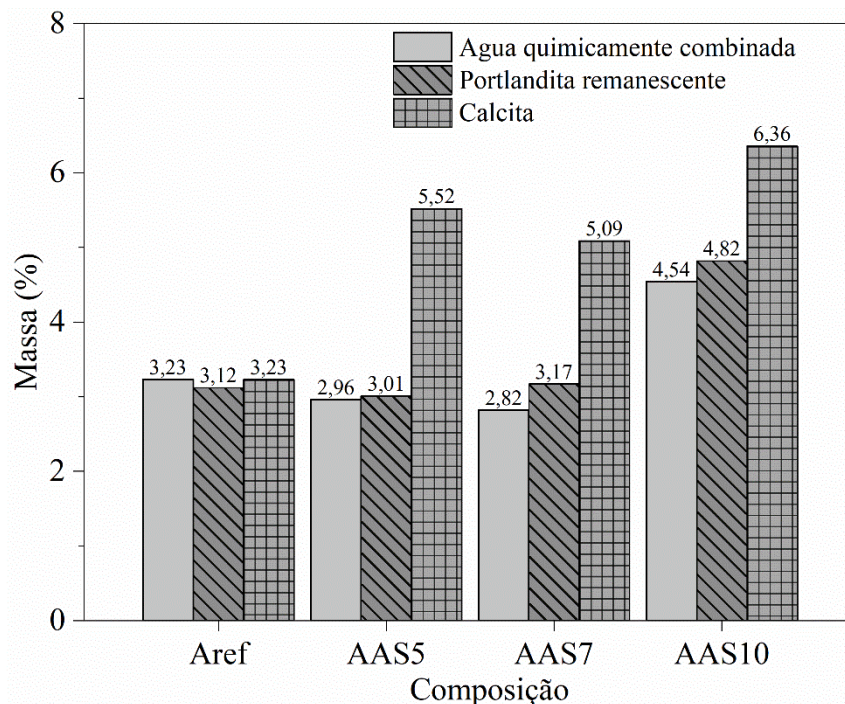


Figura 8 - Teor em massa de água quimicamente combinada, portlandita remanescente e calcita após 28 dias de cura.

Fonte: Próprio autor.

A amostra AAS10 apresentou maior perda de massa de água quimicamente combinada comparada às demais, por causa da absorção inicial de água na mistura pela grande área superficial desses materiais suplementares e pela reação de desidratação (ASHRAF et al., 2022). A redução de portlandita para a amostra AAS5 em relação à amostra referência indica que essa fase não foi consumida com a adição de pouca sílica (SILVA et al., 2020). Já as amostras AAS7 e AAS10 tiveram aumento do teor portlandita comparadas à amostra referência, que mostra reatividade pozolânica. O teor de carbonato de cálcio aumentou à medida que aumentou os níveis de acréscimo de sílica. O aumento da perda de massa na última faixa de temperatura pode ser atribuído à redução dos íons de cálcio pelo consumo de carbonato de cálcio, uma vez que a atividade pozolânica foi aumentada (ASHRAF et al., 2022).

A Figura 9 ilustra a difração de raios-X para as amostras referência e com adição de sílica 5%, 7% e 10%, com idade de 28 dias, em que se observou a presença de diferentes fases: portlandita, calcita e Quartzo/SiO₂.

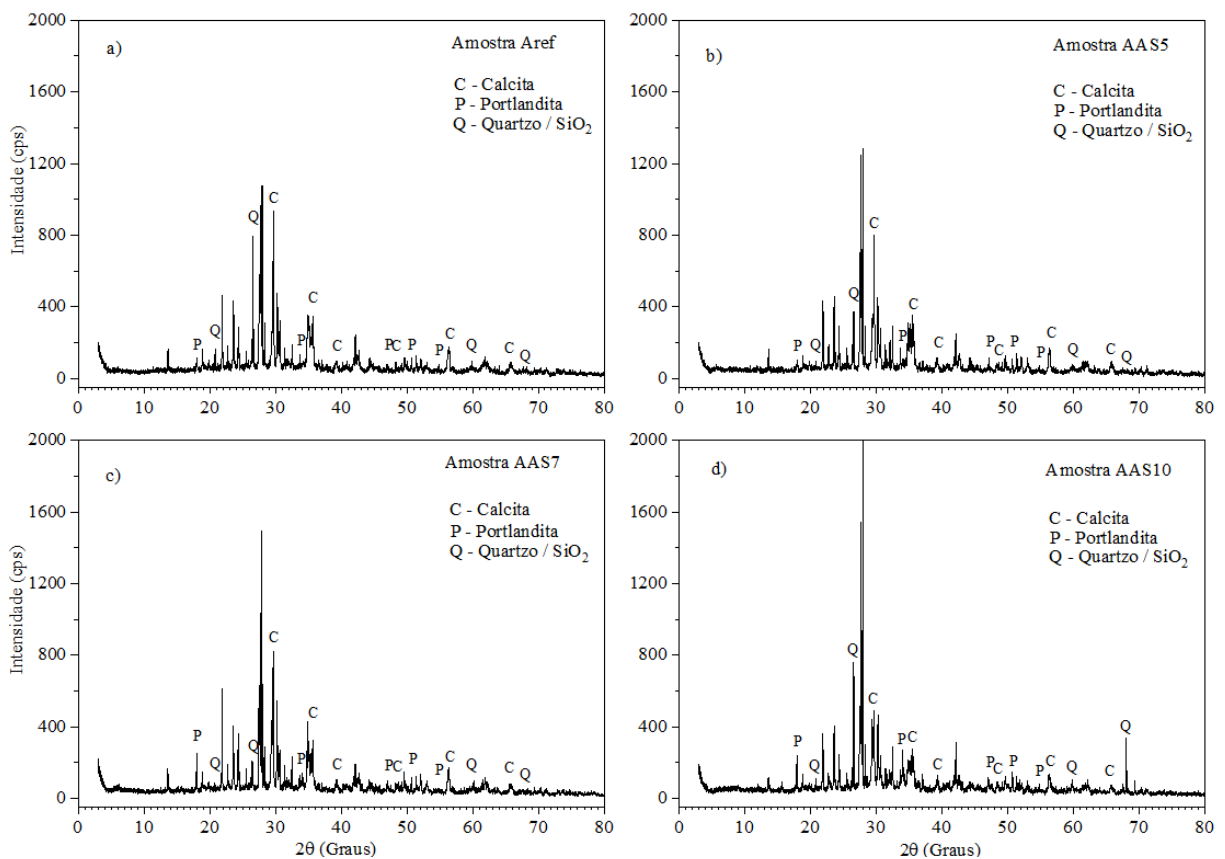


Figura 9 - Difração de raios-X em concreto permeável após 28 dias de cura úmida. (a) Aref, (b) AAS5, (c) AAS7 e (d) AAS10.

Fonte: Próprio autor.

Verificou-se que o uso de sílica não alterou a característica do pico, mas, na mesma idade, tiveram intensidades diferentes em algumas posições. O aumento de intensidade de SiO_2 pode estar atribuído às partículas de sílica que não combinaram totalmente. A intensidade de portlandita foi maior para as amostras com sílica, em que CH foi consumido como matéria-prima da reação de hidratação secundária (BAI et al., 2022). Os picos de calcita indicam que o CaCO_3 foi produzido durante o processo de carbonatação (TANG et al., 2023), sendo uma das características do concreto permeável.

A Figura 10 ilustra as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras Aref, AAS5 e AAS7, tempo de cura úmida de 28 dias.

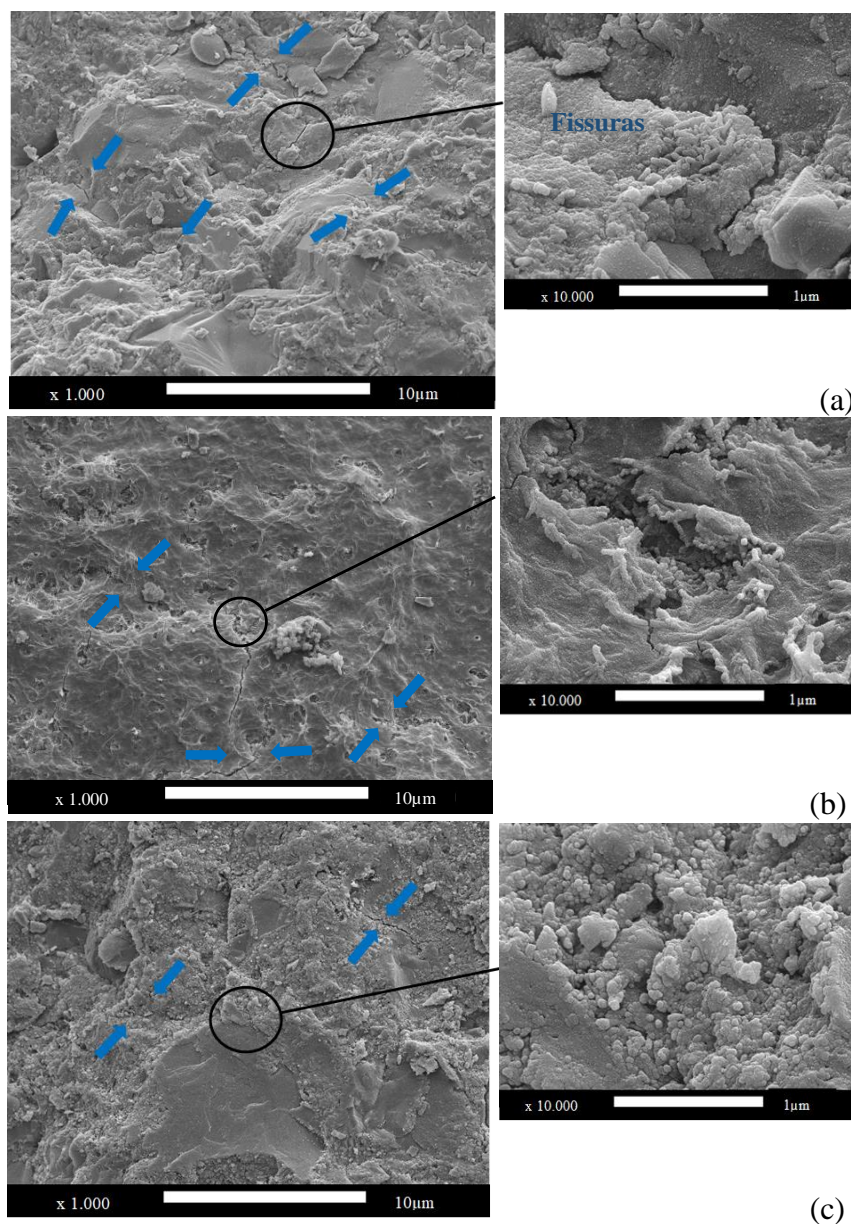


Figura 10 - Microestruturas por microscopia eletrônica de varredura em concreto permeável após 28 dias de cura úmida. (a) Aref, (b) AAS5 e (c) AAS7.

Fonte: Próprio autor,

A estrutura do concreto permeável é formada por agregado graúdo, pasta de cimento e vazios, sendo a matriz responsável pela ligação agregado/pasta. A qualidade da morfologia determina a resistência da ligação entre o agregado e a matriz, que por sua vez afeta a resistência macroscópica. A expansão das microfissuras e a estrutura solta com alta porosidade ocorrida na ZIT são os principais motivos para a redução da resistência do concreto (WU et al., 2022).

A Figura 11 ilustra as imagens obtidas por MEV para as amostras Aref e AAS10, com idade de 28 dias. Ao observar as imagens, verificou-se que a adição de sílica e aditivo superplastificante tiveram influência positiva no adensamento da matriz, que gerou microestrutura uniforme, compacta e densa, o que pode ser um indicativo do ganho de resistência à compressão e tração, apesar da presença de microfissuras pontuais. Os resultados avaliados por Bilal et al. (2021) apresentaram resultados semelhantes

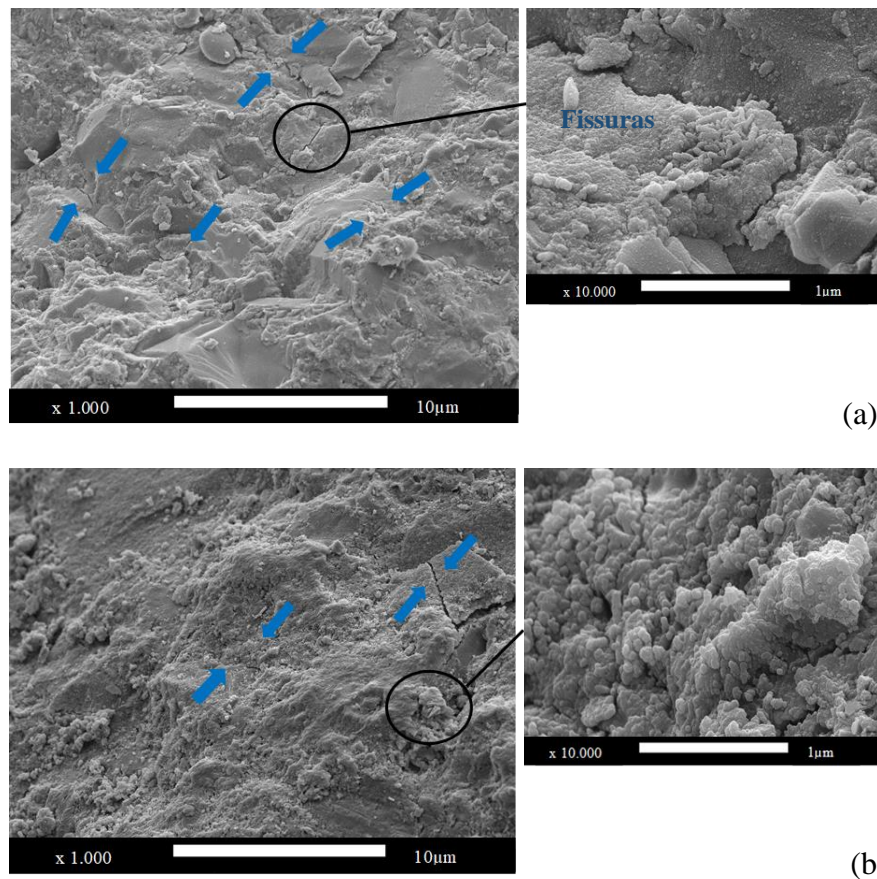


Figura 11 - Microestruturas por microscopia eletrônica de varredura em concreto permeável após 28 dias de cura úmida. (a) Aref e (b) AAS10.

Fonte: Próprio autor.

A contribuição da sílica com o preenchimento dos poros é esperada, conforme observado por BAI et al. (2022), uma vez que reduziu os vazios da amostra, densificou a matriz

de cimento, aumentou a coesão entre as partículas e promoveu o incremento da resistência. A presença de microfissuras pontuais sugere a falta de água suficiente para hidratação aos 28 dias de cura; já quanto ao contexto de microestrutura densa, sugere uma boa acomodação da sílica ativa. Nas amostras com adição de 10% de sílica, foi encontrada, de modo geral, microestrutura densificada, mas com a presença de fissuras curtas e pontuais (NAZEER et al., 2023).

A análise sugere os benefícios de usar adição de sílica combinada com aditivo superplastificante, o que pode melhorar substancialmente o comportamento microscópico e também macroscópico, como observado nos ganhos de resistência à compressão, à tração, e também na permeabilidade, resultando em materiais que indicam uma melhor durabilidade

7.4. CONCLUSÃO (CAPÍTULO I)

Esse estudo analisou o efeito do uso de adição de sílica, e também sílica + aditivo superplastificante em concreto permeável, através dos ensaios de resistência mecânica, permeabilidade e microestrutura, onde a dosagem com adição de 10% de sílica ativa e aditivo apresentou os melhores resultados. Os valores encontrados nos ensaios realizados estão dentro da faixa recomendada pelas normas ABNT NBR 16416/2015 e ACI — 522R-10.

O concreto permeável com adição de 10% de sílica e aditivo, denominada AAS10, obteve aumento de 17% de resistência à compressão aos 28 dias e, aumento de 40% de resistência à compressão aos 56 dias, comparados à amostra referência. Os valores de resistência à compressão variaram de 15,97 MPa a 18,73 MPa aos 28 dias e 12,53 MPa a 17,61 MPa aos 56 dias.

Em relação à resistência à tração na flexão, aos 28 dias, a amostra AAS10 apresentou aumento de 22%, comparada à amostra referência, e um ganho de 24% aos 56 dias. Os valores de resistência à tração na flexão variaram de 2,01 MPa a 2,46 MPa aos 28 dias e 1,71 MPa a 2,13 MPa aos 56 dias.

A permeabilidade aumentou em concreto com adição de sílica e aditivo, com destaque para a amostra AAS10, que apresentou ganho de valores de 42% comparada à amostra referência, sendo os valores de permeabilidade iguais a 3,22 cm/s e 2,26 cm/s, respectivamente. Verificou-se diminuição da absorção e dos índices de vazios e aumento da densidade para as amostras com adição de 10% de sílica e aditivo.

As análises de microscopia mostraram que o uso de sílica e aditivo superplastificante teve influência positiva no adensamento da matriz e melhorou a força, sendo um indicativo do ganho de resistência à compressão e à tração, apesar da presença de fissuras.

7.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (CAPÍTULO I)

ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 247, 118453, 2020.

ALSHAREEDA, O.; NASSIRI, S. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. **Journal of Cleaner Production**, Volume 288, 125095, 2021.

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

ASHRAF, M.; IQBAL, M. F.; RAUF, M.; ASHRAF, M. U.; ULHAQ, A.; MUHAMMAD, H.; LIU, Q. Developing a sustainable concrete incorporating bentonite clay and silica fume: Mechanical and durability performance. **Journal of Cleaner Production**, Volume 337, 130315, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – Argamassa e concreto endurecidos. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido - determinação da capacidade de deformação de concreto submetido à tração na flexão – método de ensaio. NBR 12816. Rio de Janeiro, 2012.

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

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

BAI, W.; LU, X.; GUAN, J.; YUAN, C. Experimental study on uniaxial compression mechanical properties of recycled concrete with silica fume considering the effect of curing age. **Construction and Building Materials**, Volume 350, 128758, 2022.

BILAL, H.; CHEN, T.; REN, M.; GAO, X.; SU, A. Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 275, 122124, 2021.

COSTA, F. B. P., HASELBACH, L. M., FILHO, L. C. P. da S. Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. **Construction and Building Materials**, Volume 268, 121084, 2021.

- IBRAHIM, H. A.; GOH, Y.; NG, Z. A.; YAP, S. P.; MO, K. H.; YUEN, C. W.; ABUTAHA, F. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, Vol.253, 119251, 2020.
- INTERNATIONAL STANDARD ISO 17785-2;2018 - TESTING METHODS FOR PERVIOUS CONCRETE - PART 2: DEMSITY AND VOID CONTENT.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. Controle de Enchentes. Publicado 03 de dezembro de 2020. Acesso em: 17 de março de 2021.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. CONCRETE: MICROSTRUCTURE, PROPERTIES, AND MATERIALS, FOURTH ED., MCGRAW-HILL PROFESSIONAL PUBLISHING, 2013.
- NAZEER, M.; KAPOOR, K.; SINGH, S. P. Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, volume 69, 106275, 2023.
- SILVA, L. A.; NAHIME, B. O.; FELIPE, A. S.; ELIAS, C. N.; CARMO, D. R.; LIMA, E. C.; SANTOS, I. S.; LIMA, K. L.; ISTUQUE, D. Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste. **Construction and Building Materials**, volume 265, 120119, 2020.
- TANG, B.; FAN, M.; YANG, Z.; SUN, Y.; YUAN, L. A comparison study of aggregate carbonation and concrete carbonation for the enhancement of recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, volume 371, 130797, 2023.
- TAYLOR, H. F. W, **Cement Chemistry**, 2^a ed., Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- WANG, H.; LI, H.; LIANG, X.; ZHOU, H., XIE, N.; DAI, Z. Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. **Construction and Building Materials**, Volume 202, 387, 2019.
- WANG, Y.; SUN, M.; SONG, B. Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China. **Resour. Conserv. Recycl.** Volume 122, 11, 2017.
- WU, C.; JIANG, W.; ZHANG, C.; LI, J.; WU, S.; WANG, X.; XU, Y.; WANG, W.; FENG, M. Preparation of solid-waste-based pervious concrete for pavement: A two-stage utilization approach of coal gangue. **Construction and Building Materials**, Volume 319, 125962, 2022.
- XIE, N., AKIN, M., SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, Volume 210, 1605, 2019.
- ZAETANG, Y.; SAJA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycle concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Volume 111, 15, 2016.
- ZHANG, Y.; LI, H.; ABDELHADY, A.; YANG, J. Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods. **Construction and Building Materials**, Volume 263, 120614, 2020.
- ZHONG, R.; LENG, Z.; POON; C. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: a state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, Volume 183, 544, 2018.

8. CAPÍTULO II - ARTIGO 2

Influence of recycled aggregates and silica fume on the performance of pervious concrete

ISSN 2352-7102 - Revista Journal of Building Engineering

Qualis A1 - Engenharias I - quadriênio 2017-2020

ABSTRACT

This work proposes the evaluation of pervious concrete with construction waste aggregates from the recycling plant in the city of Rio Verde, state of Goiás. In view of the large amount of waste produced daily, it is important to reuse it, favoring the correct destination for waste that would be discarded incorrectly, polluting the environment or occupying areas that could be destined for another purpose. It is a proposal that unites the use of construction waste with the positive contribution of pervious concrete that allows rainwater to infiltrate it. In search of the appropriate mix for resistant and pervious concrete, pervious concrete with a superplasticizer additive, 10% silica fume, natural aggregate crushed stone 0, and the replacement of natural aggregates with 40%, 50%, and 60% recycled aggregates was analyzed. The tests carried out were absorption, void ratios, permeability, compressive strength, flexural tensile strength, thermal analysis, X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The performance of the material in the field was also evaluated by building an experimental track with pervious concrete made with natural aggregate crushed stone 0 and the replacement of natural aggregates with 40% and 60% recycled aggregates. The pervious concrete with 40% recycled aggregates presented the best result among the properties analyzed and all samples presented values higher than those established in the ABNT NBR 16416/2015 standard for use in pervious concrete in pedestrian traffic areas.

Keywords: Paving, recycled aggregate, pervious concrete, resistance.

8.1. INTRODUCTION

The use of pervious concrete in external paving has numerous environmental benefits, including reducing the runoff of rainwater and minimizing the urban heat island effect (PARK et al., 2022). In addition, it helps reduce urban flooding and contributes to replenishing groundwater resources (LU et al., 2019; XIE et al., 2019). This technique is considered a sustainable alternative for paving, as it allows permeability and infiltration of water, which can then return to the water table or be reused. For its proper application, it is necessary to optimize its properties and design (VIEIRA et al., 2020).

The use of pervious concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste is a sustainable solution that has multiple environmental benefits in nonstructural applications (YAP et al., 2018). Because of large-scale construction and demolition, it becomes increasingly challenging to find a suitable destination for this waste. Jike et al. (2022) used recycled aggregates as coarse aggregates in pervious concrete, obtaining properties similar to those created made with natural aggregates, for use in paving urban spaces with light traffic, such as sidewalks and bicycle lanes.

The pervious concrete project with partial replacement of gravel aggregates with aggregates from the recycling of construction and demolition waste aims at the reuse and recycling of this waste, reducing the impacts generated by the activity and by all sectors involved in the process in a sustainable way. This process also reduces the extraction areas of natural aggregates, preserving natural resources (MATAR & BARHOUN, 2020).

With the aim of using the recycled aggregates produced by the recycling plant in the municipality of Rio Verde, Goiás, and finding an adequate destination for the waste, in compliance with Resolution 307 - CONAMA 2002, this work analyzed the mechanical and microstructural properties of pervious concrete with superplasticizer additive, 10% silica fume, natural aggregate gravel 0 and the replacement of natural aggregates with 40%, 50% and 60% recycled aggregates, aiming for future application in pedestrian traffic areas. The tests carried out were absorption, void ratios, permeability, compressive strength, flexural tensile strength, thermal analysis (TG/DTG), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM).

8.2. MATERIALS AND METHODS

In this section, the materials used in the production of pervious concrete will be described, as well as the proportions of natural aggregates replaced with recycled aggregates. In addition, the tests carried out to evaluate the mechanical and microstructural properties of recycled pervious concrete will be presented.

8.2.1. Materials used

For the production of pervious concrete, cement, a coarse natural aggregate called gravel 0, recycled aggregates, silica fume, a superplasticizer additive, and water were used.

To determine the appropriate amount of silica to be used in pervious concrete with construction waste, a preliminary experimental step was carried out in the laboratory. During this initial study, pervious concrete was dosed with 5%, 7%, and 10% silica, and a superplasticizer additive was used. Based on the results obtained, the silica addition level was set at 10%, and active silica from the Tecnosil brand was used.

The cement used for the production of pervious concrete was Portland Cement CP II F 32, from the brand Goiás. The additive applied to the compositions was a polycarboxylate superplasticizer in aqueous medium, specifically Sika ViscoCrete-5700. Gravel of basaltic origin was used as natural coarse aggregate, type 0, with a maximum dimension of 9.5 mm, from a quarry located in the municipality of Rio Verde, state of Goiás.

The recycled concrete aggregate was purchased at the local recycling plant, also with a maximum dimension of 9.5 mm. To determine the type and concentration of materials that would make up the recycled aggregate, a visual analysis was carried out on 1 kg of the material collected at the recycling plant. The material classification verified that the sample had a composition of 42.6% rocky material, 21.4% cementitious material, and 36% combination of rocky and cementitious material. This result was expected because the construction and demolition waste sample collected at the plant came from concrete waste. To verify whether the construction and demolition waste complied with the normative recommendation, the fraction selected for the material composition analysis was also used to verify the existence of undesirable materials, and no type of contaminating material was observed.

Table 1 provides the density and absorption properties for the natural and recycled aggregates, norm NBR 16917/2021.

Table 1: Aggregate properties.

Properties	Natural Aggregate	Recycled Aggregate
Dry specific mass (g/cm ³)	2,830	2,310
Specific saturated mass (g/cm ³)	2,880	2,488
Water absorption (%)	1.69	7.70

Source: Author himself.

8.2.2. Dosage of materials

In this study, the influence of recycled aggregates on the properties of pervious concrete was verified. Figure 1 shows the flowchart of the dosage of materials and tests performed.

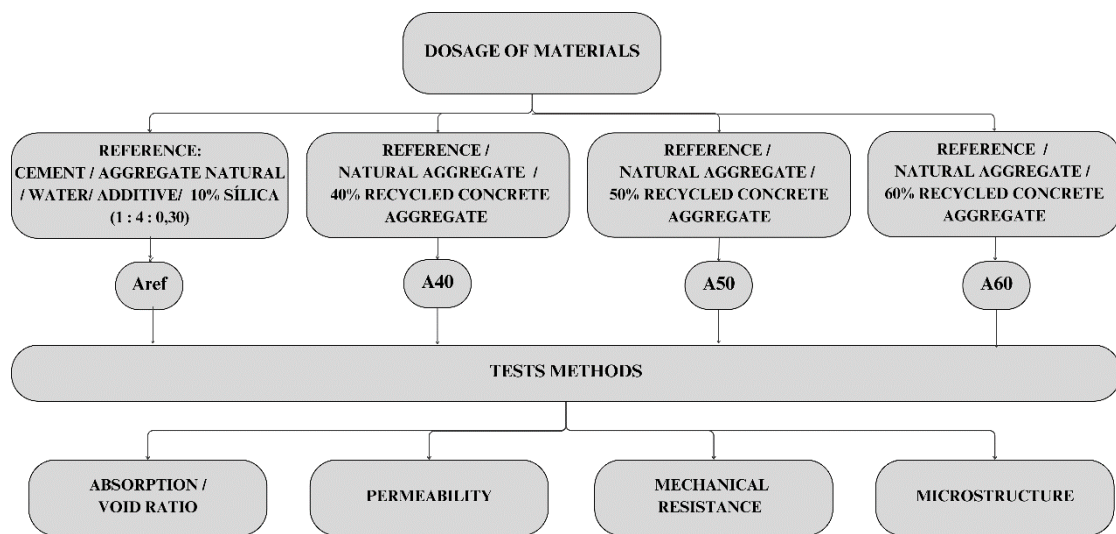


Figure 1 - Flowchart of the dosage of materials.

Source: Author himself.

For the production of pervious concrete, a 1:4 ratio was used (one part cement to four parts coarse aggregate), as well as an amount of active silica equal to 10% of the cement mass, a superplasticizer additive factor of 0.35% in relation to the cement mass, and a water/cement ratio equal to 0.30. The natural coarse aggregates were replaced with recycled concrete aggregates at levels of 40%, 50%, and 60%.

Table 2 presents the quantity of materials used in the production of pervious concrete with construction waste. The nomenclature Aref was used for the reference sample with cement, gravel 0, silica fume, superplasticizer additive and water/cement factor 0.30. The other samples A40, A50, and A60 follow the reference mix, with the replacement of gravel 0 by aggregates of concrete residues in percentages of 40%, 50%, and 60%, respectively.

Table 2: Material quantity of the samples.

Samples	Cement (Kg/m ³)	Natural aggregate (Kg/m ³)	Recycled aggregate (Kg/m ³)	w/c ratio	Additive (%)	Silica (%)
A _{ref}	374.80	1,499.20		0.30	0.35	10.00
A40	374.80	899.52	599.68	0.30	0.35	10.00
A50	374.80	749.60	749.60	0.30	0.35	10.00
A60	374.80	599.68	899.52	0.30	0.35	10.00

Source: Author himself.

8.2.3. Mixing procedure

The aggregates were added to the mixer along with a small amount of cement and silica and mixed for 30 seconds. Subsequently, the remaining cement and silica were added and stirred for 3 minutes. The additive mixed with water was gradually incorporated while the mixer was running, mixed for another 3 minutes and left to rest for 2 minutes. Finally, the concrete was mixed for another 3 minutes (IBRAHIM et al., 2020). For the mixes that contained recycled aggregates, it was necessary to treat the dry saturated surface before proceeding with the mixture, in order to match the percentage of gravel absorption.

The cylindrical specimens were compacted in three layers with 25 blows each, using a compacting rod. The compaction for the prismatic specimens was done with a socket in 4,5 kg layers of 25 strokes each. All samples remained in a humid chamber for 24 hours, after which they were demolded and submerged in water to cure the concrete until the days of the tests.

8.2.4. Absorption and void ratio test methods

For the water absorption and void ratio tests, NBR 9778/2005 was adopted. After 28 days of curing, the samples were dried in a laboratory oven at a temperature of 105 °C for 3 days, and their weight was measured for the dry condition. Afterward, they were immersed in

water. After 3 days, measurements were made for the saturated and immersed conditions. The values of water absorption (A) and void index (I) were obtained by Equations 1 and 2.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equation 1})$$

$$I = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{Equation 2})$$

in which A = absorption in percentage (%), I = percentage of voids (%), m_{sat} = mass of the saturated sample after immersion in water, m_s = mass of the dry sample, and m_i = mass of the sample immersed in water.

To calculate the hardened density at 28 days, ISO 17785-2 (2018) and the application of Equation 3 (NAZEER et al., 2023) were adopted.

$$d = m_s / v \quad (\text{Equation 3})$$

in which d = sample hardened density (kg/m³), m_s = mass of the oven-dried sample (kg), and v = sample volume (m³).

8.2.5. Laboratory permeability test method

The permeability test was carried out by applying the method proposed by the American Concrete Institute (ACI 522R-10), which uses a single-drop permeameter. A permeameter was built using PVC pipes to replicate the equipment mentioned in the ACI 522R-10 standard presented in Figure 2.

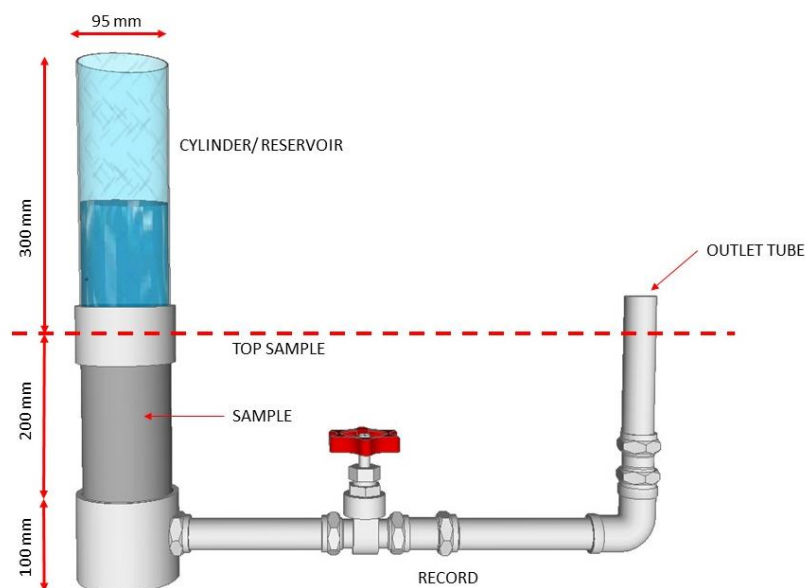


Figure 2 - Permeameter illustration. Source: Adapted from ACI 522R (2010).

Carrying out the permeability test consisted of adding water to a graduated cylinder and allowing the water to run through the entire pipe with the valve open to remove air. The damper was closed and the permeameter was filled with water up to the desired level specified by the standard dimensions. Next, the valve was opened and the time, in seconds, required for the water to travel the distance marked on the cylinder between the initial head (h1) and the final head (h2) was measured. The equipment was calibrated for an initial height of 290 mm and final height of 70 mm. The permeability coefficient k was obtained by Equation 4:

$$k = A/t \quad \text{(Equation 4)}$$

in which k = permeability coefficient (mm/s or cm/s), A = constant area equal to 192 mm or 19,2 cm, and t = time in seconds.

The permeability coefficient required for the pervious pavement in the ACI 522R-10 standard cites an interval of 0,001 a 10 cm/s, whereas the permeability coefficient required for the pervious pavement in the ABNT NBR 16416/2015 standard-Pervious Concrete Pavements must be greater than 10^{-3} m/s.

8.2.6. Methods of mechanical resistance tests

The compressive strength and the tensile strength in bending of pervious concrete in the hardened state at 28 and 56 days were analyzed. The compressive strength test complied with the recommendations of the ABNT NBR 5739/2018 standard and the flexural tensile strength test complied with the ABNT NBR 12142/2010 standard. Figure 3 illustrates the equipment used in the tests.

The minimum mechanical strength recommended in the ABNT NBR 16416/2015 standard for pervious cast-in-place concrete is 1 MPa for pedestrian traffic and 2 MPa for light traffic, values determined for flexural tensile strength.

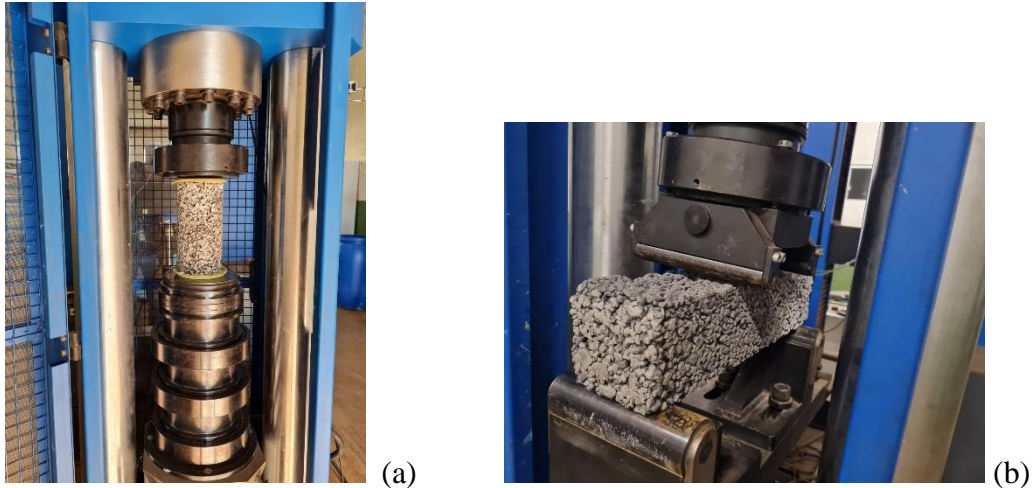


Figure 3 - Equipment used in the tests: (a) compressive strength and (b) tensile strength. Source: Author's own photo - Materials Laboratory.

8.2.7. Microstructure test methods

Fragments of 3 and 10 mm of the specimens ruptured in the compressive strength test, at 28 and 56 days, were separated to carry out the SEM, DRX, and TG/DTG tests. To interrupt the hydration process of the samples, acetone was used.

For the SEM tests, the images were obtained using a Jeol JSM IT300LV scanning electron microscope, operating in low vacuum with an electron accelerating voltage of 15 kV in the backscattered electron detection mode. For the TG/DTG differential thermal and thermogravimetric analysis test, the Netzsch STA 449 F3 Nevio equipment was used, Alumina crucible 85 μ L, open, with a temperature range of 30-1100°C, heating rate at 10 K/min, and flow of Nitrogen gas of 50 mL/min. XRD measurements were performed in a Bruker D8 Discover diffractometer, using monochromatic radiation from a copper anode tube coupled to a Johansson monochromator for $K\alpha_1$ operating at 40 kV and 40 mA, Bragg-Brentano θ -2 θ configuration, Lynxeye ® unidimensional detector, 2 θ range from 3° to 100°, with pitch of 0.01°. The samples were kept rotating at 15 rpm during the measurement.

8.2.8. Field permeability test methods

This field stage involved evaluating the permeability coefficient of the pavement built with pervious concrete and construction waste, called the test track. After the tests were carried out in the laboratory, three mixtures were chosen for the execution of the test track: the reference mix and the mixes of samples A40 and A60, which presented the best results of mechanical

resistance. The pavement was built on the sidewalk of a square on Avenida Paulo Roberto Cunha for pedestrian traffic, illustrated in Figure 4.



Figure 4 - Pervious concrete test track with construction waste.
Source: Author himself.

After delimiting the area, the execution of the test track began with the preparation of the land and manual excavation, by which 27 cm of earth was removed. Next, a 20 cm layer of gravel 0 was added, and a 7 cm layer of pervious concrete was applied. The concrete for each chosen mix was dosed and prepared as described in the laboratory stage for the production of the analyzed samples. A compactor roller was used to compact and finish the concrete pavement, made with PVC pipe 200 mm in diameter and 1 m long, filled with conventional concrete. Another PVC tube of 40 mm in diameter was positioned inside the tube, allowing the free passage of the metallic rod connected to the metallic support. Figure 5 illustrates the compactor roller and the applied pervious concrete.

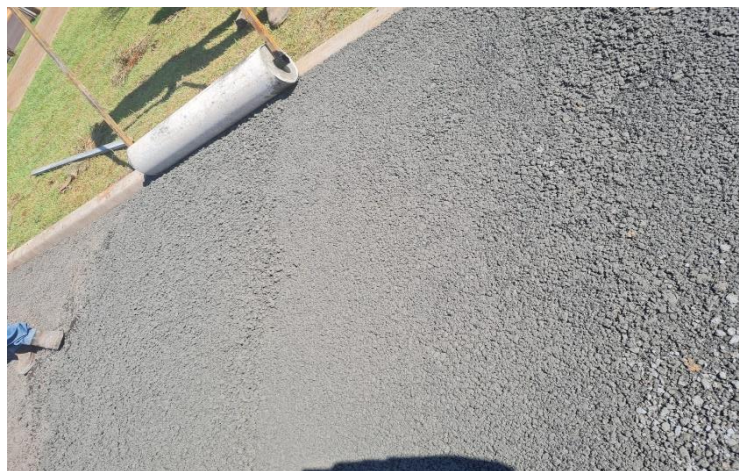


Figure 5 - Compaction of applied recycled pervious concrete.
Source: Author himself.

For the test to determine the permeability coefficient in the field of the pervious concrete pavement executed, the NBR 16416/2015 method was adopted. Six PVC pipe rings (300 mm in diameter and 50 mm in height) were fixed with caulk, as shown in Figure 6, to delimit the test area, with two rings for each type of concrete evaluated.



Figure 6 - PVC pipe ring used in the permeability test.
Source: Author himself.

Figure 7 presents a sketch of the test track measuring 7.50 m long and 1.90 m wide, the limitations of the evaluated concrete mixtures, and the chosen points for placement of the permeability test rings.

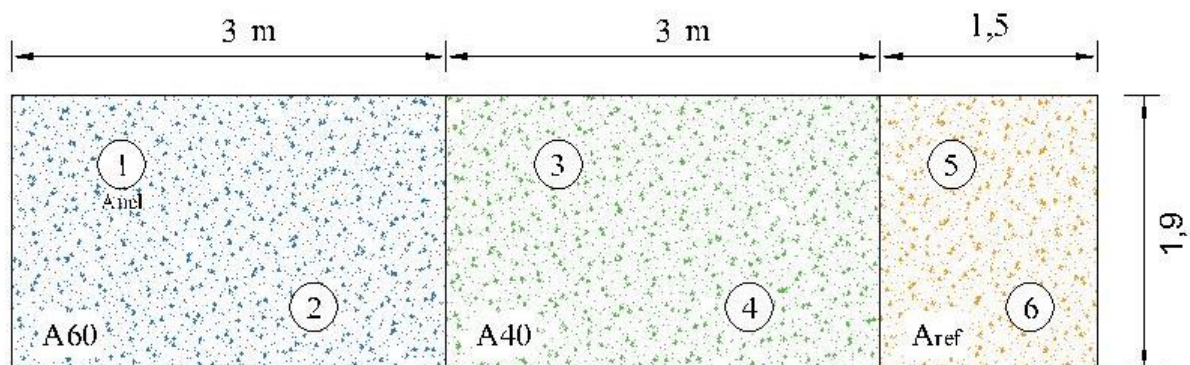


Figure 7 - Sketch of test track in pervious concrete with construction waste.
Source: Author himself.

Continuing with the preparation for the permeability determination test, the area defined for the test was pre-wet with 3.6 kg of water; then, the test began by pouring 3.6 kg of

water into the infiltration ring with sufficient speed to maintain the water level between the two internal markings of the ring (10 mm to 15 mm). The time interval was marked in seconds, activating the stopwatch as soon as the water reached the surface of the pervious pavement and stopping it when there was no more free water on the surface. To calculate the permeability coefficient (k), Equation 5 was used.

$$k = \frac{C.m}{(d^2.t)} \quad (\text{Equation 5})$$

in which k = permeability coefficient, expressed in millimeters per hour (mm/h), m = mass of infiltrated water expressed in kilograms (3.6 kg), d = internal diameter of the infiltration cylinder, expressed in millimeters (300 mm), t = time required for all the water to percolate, expressed in seconds (s), and C = SI system unit conversion factor, with a value equal to 4 583 666 000.

8.3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the analysis of pervious concrete containing recycled coarse aggregates from civil construction are presented and discussed for the void index tests, resistance to compression and traction in flexion, permeability, and microstructure, through TG/DTG, XRD, and SEM.

8.3.1. Absorption tests and void ratio

The relationship between the absorption and the void ratio is shown in Figure 8.

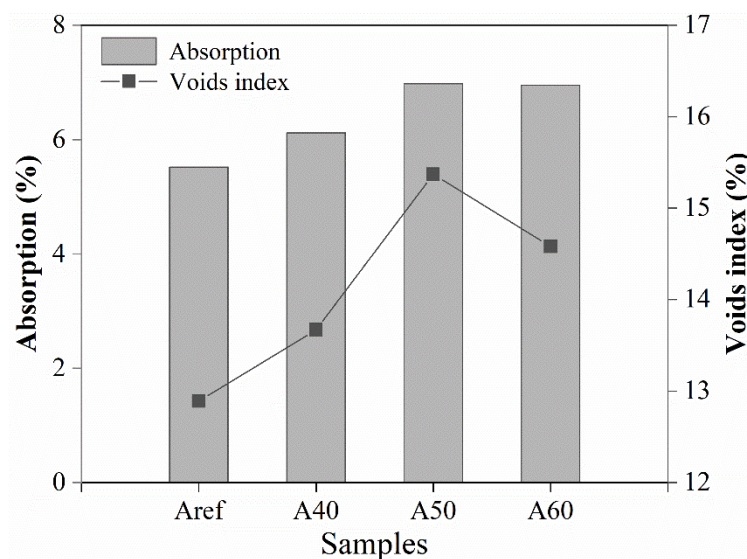


Figure 8 - Absorption and voids index relationship at 28 days.
Source: Author himself.

There is an increasing relationship between the absorption and the void ratio, in which the mixtures with recycled aggregates had higher values compared to the reference sample. El-Hassan et al. (2019) found similar results, in which replacing natural aggregates with recycled aggregates increased the void content due to the angular shape and rough texture of recycled aggregates, which introduced more air into the concrete. In addition, the increase in voids may be related to the mortar mass adhering to the recycled aggregate, which results in a more porous concrete structure.

8.3.2. Laboratory permeability test

According to the graph in Figure 9, referring to the permeability test with a curing time of 28 days, there was an increase in the value of the permeability coefficient of 10% and 3%, respectively, when the natural aggregates were replaced with recycled aggregates in samples A50 and A60 in relation to the reference sample. The permeability coefficient ranged from 2.81 to 3.54 cm/s, and all samples evaluated in this study reached values higher than those recommended in the NBR 16416 and ACI 522R-10 standards.

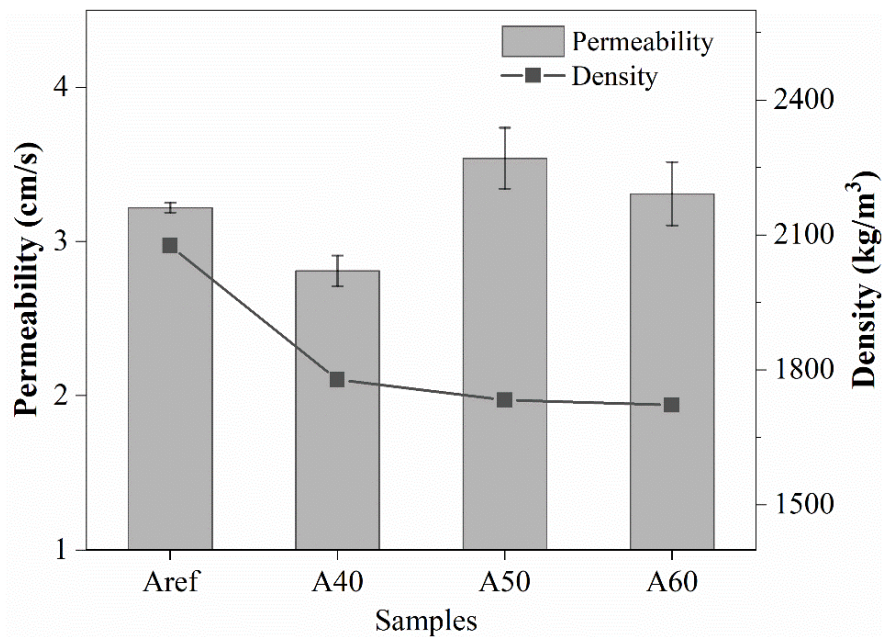


Figure 9 – Relationship between permeability and density at 28 days.
Source: Author himself.

Yap *et al.* (2018) cite permeability coefficient values between 1.42 cm/s and 2.64 cm/s, and Ibrahim *et al.* (2020) cite permeability coefficient values between 1.4 cm/s and 2.5 cm/s, in addition to observing an increase in the permeability rate for recycled aggregate content greater than 40%. The permeability of pervious concrete can be explained by the poor

aggregate-to-paste adhesion, the porous network, the pore size, the aggregate and mix proportions, and the heterogeneity of the material.

The relationship between permeability and density observed in Figure 9 shows increased permeability and decreased density. The density result found in pervious concrete samples with recycled aggregates can be justified by means of the aggregate characterization test, in which the recycled aggregates had a lower density than the natural aggregates. When comparing recycled pervious concrete with conventional pervious concrete, a decrease in density and an increase in absorption, void ratio, and permeability were observed.

Table 3 shows the analysis of variance for the results of the permeability test, which statistically verified that at least one of the values presents a difference between the mean values, the indicative factor being the 95% confidence interval with a p-value less than 0.05. Tukey's test was used to compare and indicate the differences between two pairs of means, and some of these differences were above the minimum significant difference (MSD) value found in the test. In this case, the p-value was less than 0.05, indicating that there was at least one value with a difference between the mean values: sample A50, which presented a difference in mean value above the MSD found in the Tukey test. The A50 sample had the highest permeability coefficient and the highest void index.

Table 3: Analysis of variance (ANOVA) of permeability data.

Age	Samples	Mean	Variance	Groups	DF	SQ	MS	F	p-value	fc	DMS
28 days	Ref	3.22	0.000133	between group	3	1.4150	0.471	9,217	0.0056	4.07	0.592
	A40	2.81	0.00980	same group	8	0.4094	0.051				
	A50	3.54	0.0392								
	A60	3.31	0.04205								

DF = degree of freedom; SQ = sum of square; MS = mean square.

Source: Author himself.

8.3.3. Compressive strength tests

The graph shown in Figure 10 indicates that there was a reduction in the compressive strength of concrete with the replacement of natural aggregates with recycled aggregates. For samples with 40%, 50%, and 60% recycled aggregates, the reduction was 48%, 56%, and 52%, respectively, compared to samples with natural aggregates at 28 days. There was an improvement in compressive strength for the samples at 56 days, especially for the A40 sample,

with a gain of 14%. The values found are sufficient for applications of pervious recycled concrete in lanes with light traffic, without structural function.

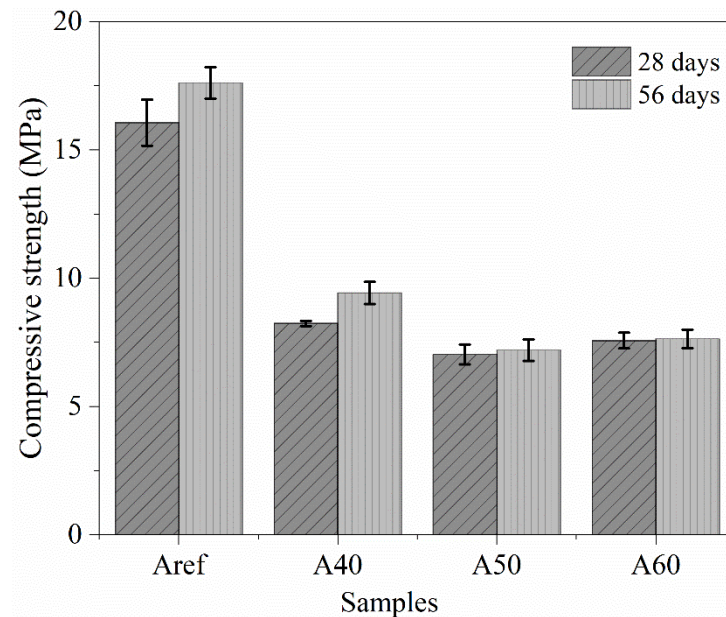


Figure 10 – Compressive strength results.
Source: Author himself.

Table 4 shows the results of the analysis of variance, which statistically verified that at least one of the values presents a difference between the mean values. The indicative factor was the 95% confidence interval, with a p-value less than 0.05. Tukey's test was used to compare and indicate the differences between two pairs of means and their significance and to check whether any of these differences were above the MSD value found in the test. In this case, the p-value was less than 0.05, indicating that there was at least one value with a difference between the mean values: the reference sample, which presented a difference in mean value above the MSD found in the Tukey test.

Table 4: Analysis of variance (ANOVA) of compressive strength data.

Age	Samples	Mean	Variance	Groups	DF	SQ	MS	F	p-value	fc	DMS
28 days	Ref	16.06	0.80645	between group	3	225,364	75.121	35,192	0.00001	4.07	3.82
	A40	8.24	0.00980	same group	8	17.077	2.134				
	A50	7.03	0.15125								
	A60	7.57	0.09245								
56 days	Ref	17.61	0.3613	between group	3	188,521	62,840	61,321	0.00001	4.07	2.65
	A40	9.43	0.18503	same group	8	8,198	1.024				
	A50	7.20	0.17405								
	A60	7.64	0.13000								

DF = degree of freedom; SQ = sum of square; MS = mean square.

Source: Author himself.

Due to the closeness of their values, samples with recycled aggregates can be considered statistically equal, as they present a minimal difference. The A40 sample had the best compressive strength value among the samples with recycled aggregates.

Vieira *et al.* (2020) reported that a decrease in strength may be related to the low density of recycled aggregates, which increases the volume of internal voids and makes the concrete more fragile to mechanical stresses. Yap *et al.* (2018) found that mixtures with more than 40% recycled aggregates showed greater losses in compressive strength, and this reduction may be related to the volume of the paste and the poor adhesion of the cement-aggregate paste to recycled aggregate mixtures.

Jike *et al.* (2022) observed that the resistances found were higher than specified in the ACI 522R/2010 standard, above 3.5 MPa. However, they highlighted that a decrease in the rate of natural aggregates always causes a decrease in the compressive strength of concrete because natural aggregates are more resistant and have less porosity compared to recycled aggregates.

8.3.4. Bend tensile strength test

According to the graph in Figure 11, the decrease in the tensile strength was verified for the samples with 40%, 50%, and 60% recycled aggregates in relation to the samples with natural aggregate—reductions of 5%, 27%, and 13%, respectively, at 28 days. It was found that, for samples with recycled aggregates, there was an increase in tensile strength in the period from 28 days to 56 days. The A40 sample presented a value close to the reference for 28 days, and it was the highest value compared to the samples with recycled aggregates.

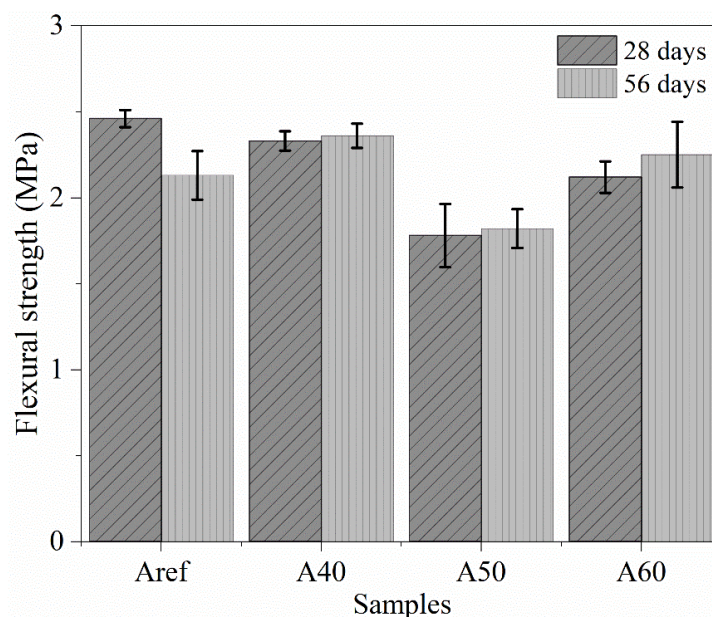


Figure 11 – Results of tensile strength in flexion.
Source: Author himself.

Flexural tensile strength is an important property, and the NBR 16416/2015 standard determines the minimum value of flexural tensile strength for pedestrian traffic to be 1 MPa. With this understanding, all samples showed values above the limits stipulated in the standard, in which the flexural tensile strength ranged from 1.78 to 2.46 MPa.

Table 5 shows the results of the analysis of variance for tensile strength, in which the p-value was greater than 0.05, and the difference in mean values was below the MSD found in the Tukey test, with a closeness of values, which can be considered statistically equal, with minimal differences. These are excellent results, indicating that traction was preserved.

Table 5: Analysis of variance (ANOVA) of flexural strength data.

Age	Samples	Mean	Variance	Groups	DF	SQ	MQ	F	p-value	fc	DMS
28 days	Ref	2.46	0.00245	between group	3	0.623	0.207	3,227	0.0823	4.07	0.664
	A40	2.33	0.04205	same group	8	0.515	0.064				
	A50	1.78	0.0338								
	A60	2.12	0.00845								
56 days	Ref	2.13	0.0200	between group	3	0.492	0.164	3,569	0.0667	4.07	0.561
	A40	2.36	0.0050	same group	8	0.368	0.046				
	A50	1.82	0.0128								
	A60	2.25	0.0684								

DF = degree of freedom; SQ = sum of square; MS = mean square.

Source: Author himself.

Table 6 presents the relationship between flexural tensile strength and compressive strength, which ranged from 15% to 28% at 28 days.

Table 6: Relationship between flexural strength and compressive strength.

Samples	Compression (MPa)	Flexural (MPa)	Relationship (%)
Ref	16.06	2.46	15.32
A40	8.24	2.33	28.28
A50	7.03	1.78	25.32
A60	7.57	2.12	28.01

Source: Author himself.

Lima *et al.* (2022) found that the relationship between compressive strength and flexural strength at 28 days was between 14% and 24%. The ratio increased with the reduction of compressive strength in relation to tensile strength, which had little variation.

8.3.5. Microstructure test

Figure 12 presents the TG/DTG analysis curves for the reference samples and with replacement by recycled aggregates at levels of 40%, 50%, and 60% at 56 days. The figure shows the mass losses of the decomposition phases in the cementitious matrix. The products that volatilize are present in the solid phase, in voids, and in the form of water. Chemically combined water is part of the hydration product of cement, volatilized by the decomposition of hydrates, and free water occupies the large voids (MEHTA E MONTEIRO, 2013).

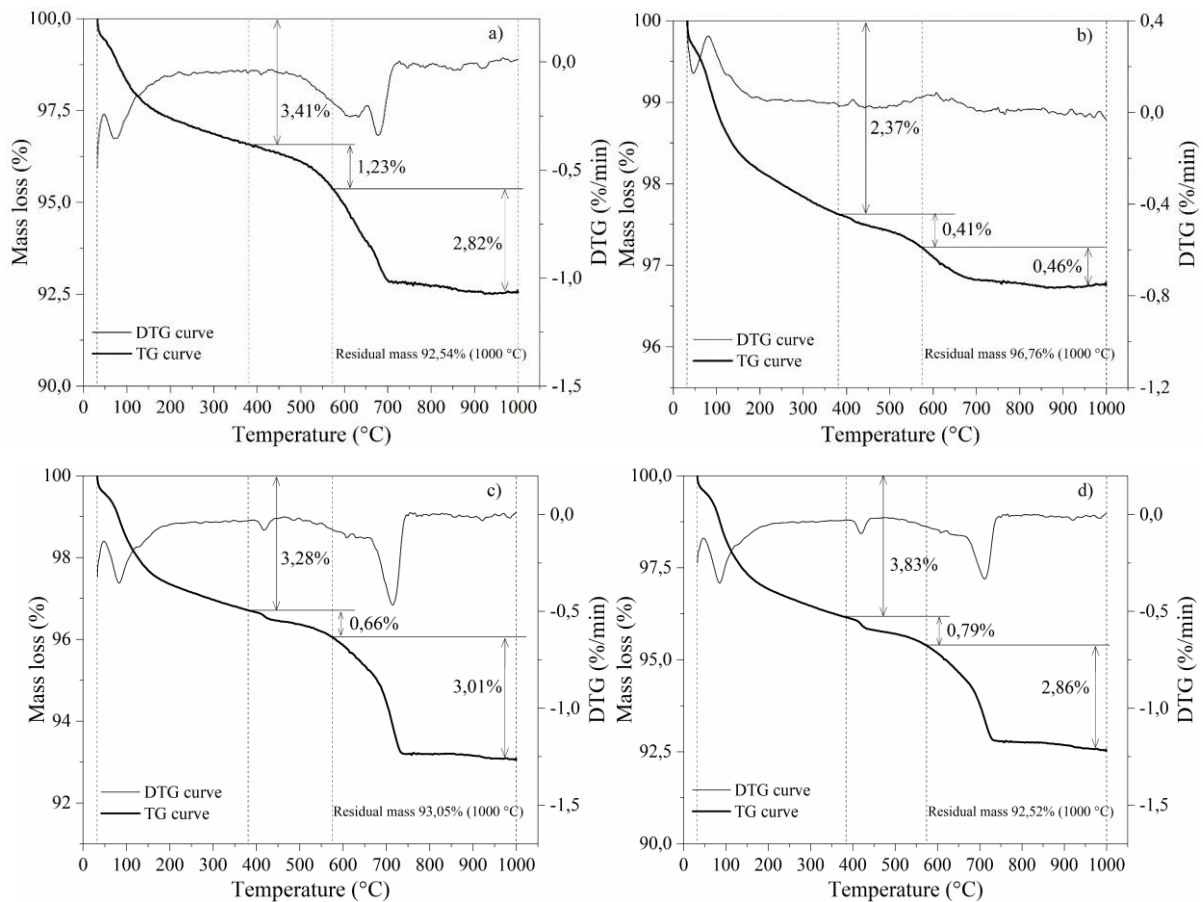


Figure 12 - TG/DTG test images at 56 days: (a) Aref, (b) A40, (c) A50, and (d) A60.
Source: Author himself.

For the analysis of the thermogravimetric curves shown in Figure 12, three temperature ranges were considered. The first was up to 380°C, with which it is possible to determine the chemically combined water that was volatilized in the formation of tobermorite and ettringite hydrates. The second temperature range was between 380°C and 575°C, where calcium hydroxide is dehydrated; and the last temperature range was from 575°C, which is where calcium carbonate is decomposed through the elimination of CO₂. Figure 12 shows the delimitation of the three temperature ranges and the quantification of the levels of hydrated

compounds formed, such as remaining portlandite and calcium carbonate, found through the TG/DTG thermogravimetric analysis (SILVA *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2023).

The reference sample presented a residual mass equal to 92.54%, sample A40 equal to 96.76%, sample A50 equal to 93.05%, and the A60 sample equal to 92.52%. The latter showed greater mass loss. The residual masses showed similar values. For a comparative analysis, Taylor (1997) recommends that the values be normalized when they are not on the same non-volatile basis. Table 7 shows the percentage data of mass loss shown in Figure 12 and the normalization of values.

Table 7: Percentage of hydration products in pervious concrete.

Samples	Mass loss	Chemically combined water (%)	Calcium hydroxide (%)		Calcium carbonate (%)		Residual mass (%)	Factor
			H ₂ O	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃		
Aref	Weight loss	3.41	1.23	5.06	2.82	6.4	92.54	1.081
Aref	corrected weight loss	3.68	1.33	5.47	3.05	6.92	100.00	
A40	Weight loss	2.37	0.41	1.69	0.46	1.04	96.76	1.034
A40	corrected weight loss	2.45	0.42	1.75	0.48	1.07	100.00	
A50	Weight loss	3.28	0.66	2.71	3.01	6.83	93.05	1.075
A50	corrected weight loss	3.53	0.71	2.91	3.23	7.34	100.00	
A60	Weight loss	3.83	0.79	3.25	2.86	6.49	92.52	1.081
A60	corrected weight loss	4.14	0.85	3.51	3.09	7.01	100.00	

Source: (SILVA *et al.*, 2020) /Adapted by the author.

The remaining Ca(OH)₂ content, indicated in Table 7, was found by multiplying the value found in the second temperature range of the graph in Figure 12, referring to calcium hydroxide dehydration, by 4.11, which is the ratio of the molecular mass of Ca(OH)₂ and H₂O. The calcium carbonate content was found by multiplying the value found in the third temperature range, referring to the CO₂ mass loss, by 2.27, which is the molecular mass ratio of CaCO₃ and CO₂. To find the corrected mass loss, the column value of the normalization factor was normalized to 100%, dividing the total mass value (100%) by the residual mass of the samples (SILVA *et al.*, 2020).

Figure 13 shows the percentage values by mass of chemically combined water, remaining portlandite, and calcite found in the TG/DTG test.

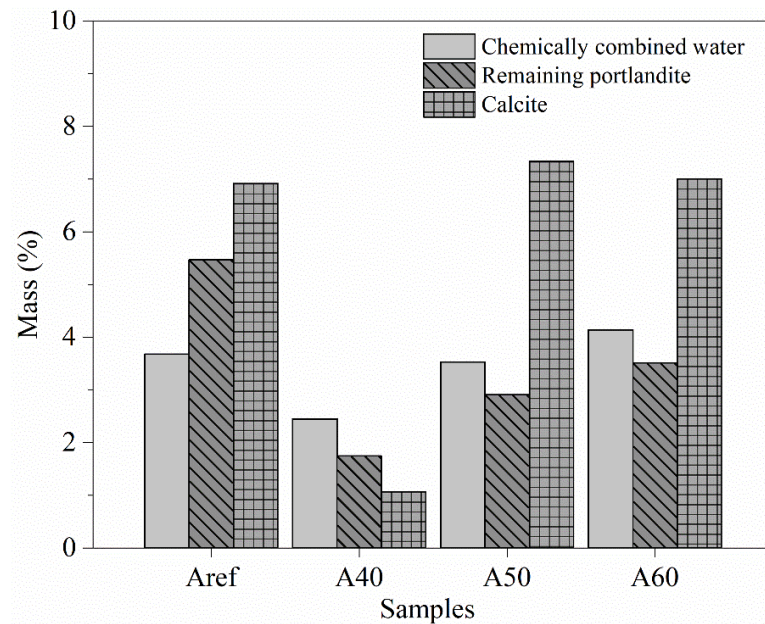


Figure 13 - Content by mass of chemically combined water, remaining portlandite, and calcite after 56 days.

Source: Author himself.

The thermal analysis showed lower mass losses of the chemically combined water for the samples with recycled aggregates compared to the reference sample. The reduction of portlandite for the samples with recycled aggregates in relation to the reference sample indicates low pozzolanic reactivity and that this phase was not consumed (SILVA et al., 2020). The calcium carbonate content increased as the levels of residues increased, verified in samples A50 and A60, showing that the replacement with the recycled aggregates favored the carbonation phase. The presence of calcite may also be related to the mortar that adhered to the recycled aggregates. Ibrahim et al. (2020) and Yap et al. (2018) found similar results, with high calcium content identified in hydration products, indicating that this phase contains adhered mortar, which has a weak aggregate-paste bond, favoring cracks and reduced strength of recycled pervious concrete.

Figure 14 illustrates the result of the XRD test, in which it was possible to observe the different phases present in the analyzed samples Aref, A40, A50, and A60 at 56 days. In this analysis, the presence of different phases is observed – C-S-H, ettringite, portlandite, calcite, and quartz/SiO – and the outlines of the peaks are similar, varying in intensity. There is an

increase in the intensity of quartz/SiO₂ as the amount of recycled aggregates increases in samples A40, A50, and A60 compared to the reference sample.

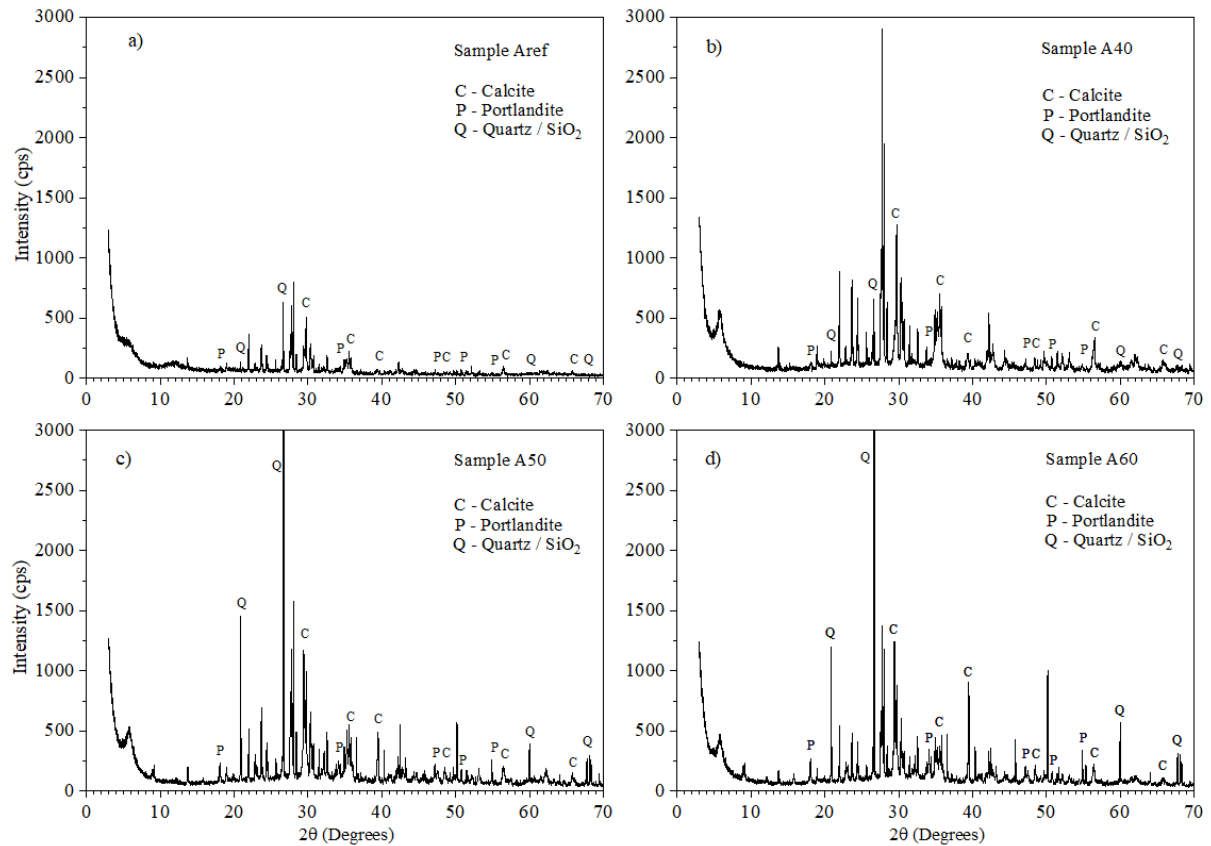


Figure 14 - XRD test images at 56 days: (a) A_{ref}, (b) A40, (c) A50, and (d) A60.
Source: Author himself.

The predominance of quartz and calcite through the intensity of the peaks, which increase as the replacement with recycled aggregates in concrete increases, may mean an incomplete reaction, in which silicon did not contribute to the reaction, due to porosity. Therefore, it is possible that the water from the hydration process was lost, so that calcite predominates. Calcite in incomplete structure is harmful, as CO₂ does not react with C-S-H, not filling the voids.

By analyzing the images from the SEM test on samples of recycled pervious concrete at 56 days, shown in Figure 15, it was possible to verify the increase in cracks according to the replacement of recycled aggregates, and the cracks became more intense and accentuated, making the microstructure fragile. This may be one of the indicators of the decrease in compressive strength analyzed in this work.

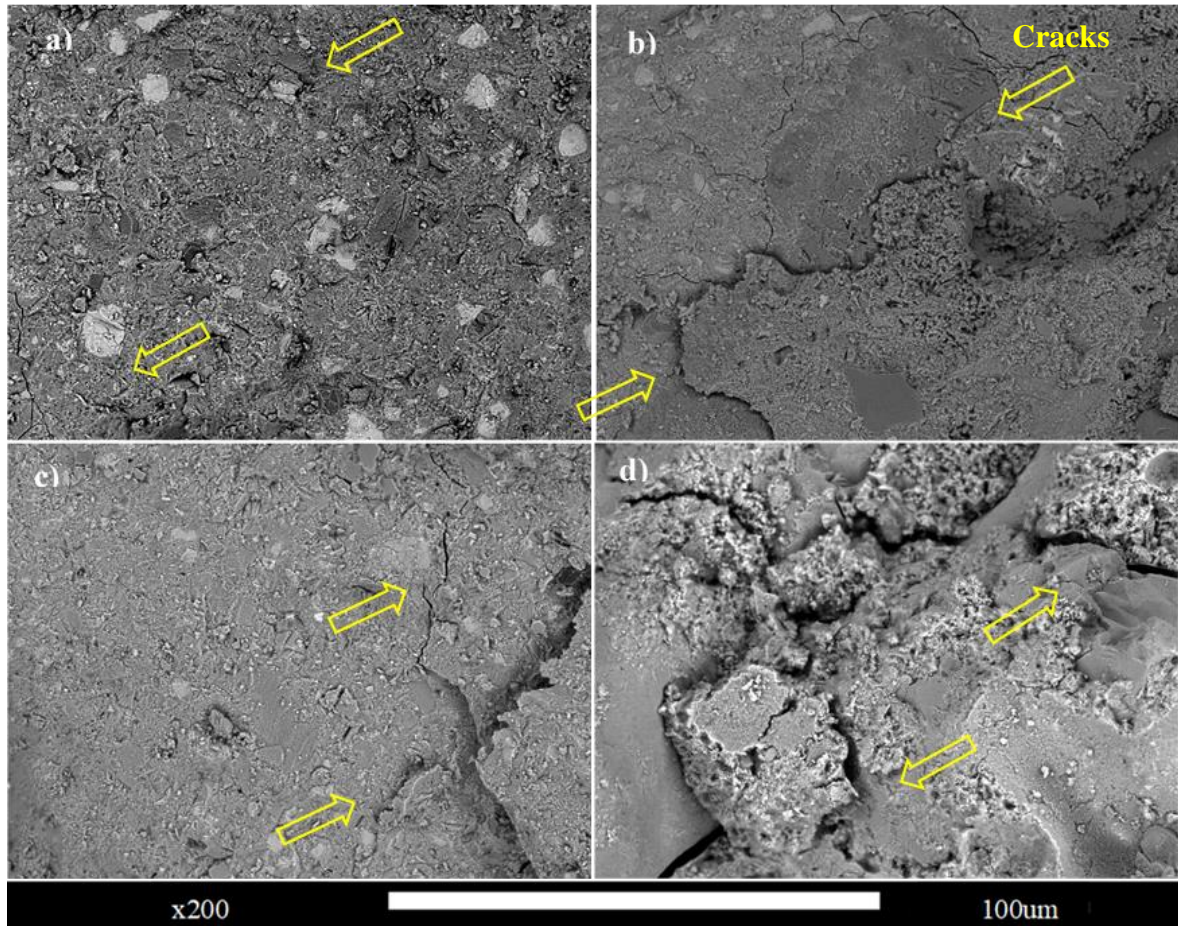


Figure 15 - SEM test images at 56 days: (a) A_{ref}, (b) A40, (c) A50, and (d) A60.
Source: The author/MEV images.

Vieira et al. (2022) analyzed samples with 0% to 100% recycled aggregates and found that the porosity of concrete increases, with the presence of large voids, as the replacement with recycled aggregates increases. Jalifar et al. (2021) understood that the porosity around the transition zone interferes with the microstructure and the reduction of mechanical strength.

Yap et al. (2018) found that the poor adhesion of the cement-aggregate paste in their studies was because the amount of binding decreases as the replacement with recycled aggregates increases. The mortar that adheres to the recycled aggregates absorbs part of the mixing water and reduces the amount of cement paste, resulting in a poor connection between the cement paste and the coarse aggregates, reducing the compressive strength.

The structure of pervious concrete is formed by aggregates, cement paste, and voids, with the matrix responsible for the aggregate/paste connection (WU et al., 2022). The microstructure of recycled aggregate concrete has several disadvantages, such as increased porosity and weak transition zone. Thus, the porosity of the recycled aggregates in pervious

concrete is beneficial, considering the permeability and infiltration criteria, but it has a fragile microstructure, as observed in the tests carried out, with a large number of microcracks, which impacted the mechanical properties.

8.3.6. Field permeability

The graph in Figure 16 shows the result of the permeability test for the field stage at 28 and 56 days and the laboratory stage at 28 days.

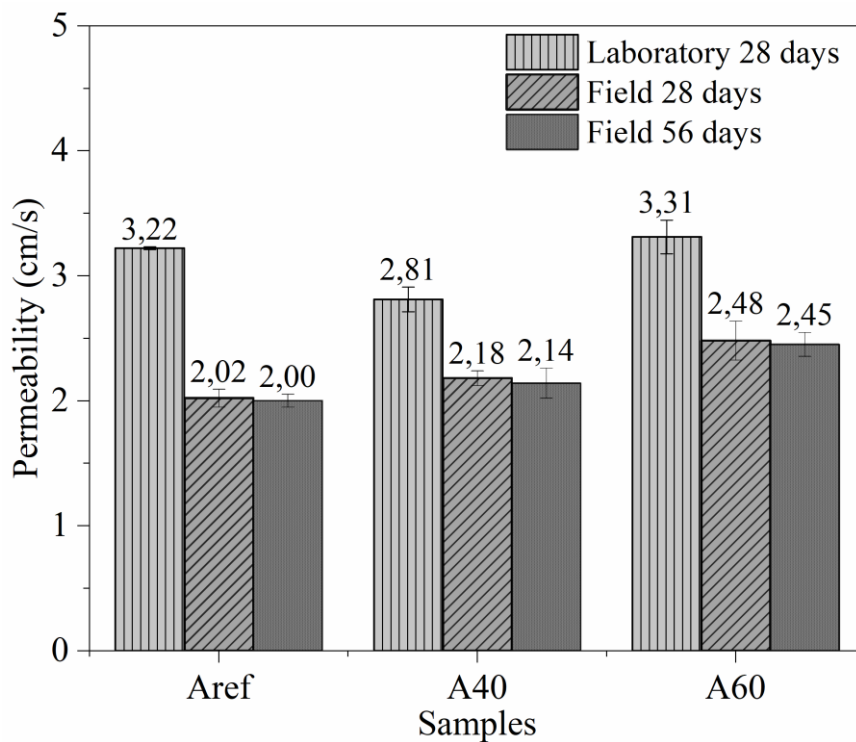


Figure 16 - Permeability test for the field and laboratory stages.
Source: Author himself.

The field stage showed an increase in the permeability coefficient for samples A40 and A60, compared to the reference sample, of 8% and 23%, respectively, with emphasis on the mix with 60% recycled aggregates, which presented the highest permeability coefficient. In the laboratory stage, the A60 sample also showed a higher permeability coefficient compared to the reference sample. Permeability values were higher than the minimum recommended in the NBR 16416 and ACI 522R-10 standards.

8.4 CONCLUSION (CHAPTER II)

This study evaluated the mechanical, permeability, and microscopy properties of pervious concrete with recycled concrete aggregates at replacement levels of 40%, 50%, and 60%, and the following was concluded:

- Permeability increased and maintained values close to the reference sample, ranging from 2.81 to 3.54 cm/s. The sample with 50% recycled aggregates showed the highest value, with a 10% increase in permeability. There was an increase in permeability, absorption, and the void index and a decrease in density.
- Samples with 40%, 50%, and 60% recycled aggregates showed a reduction of 48%, 56%, and 52%, respectively, in compressive strength, compared to samples with natural aggregates, at 28 days. There was an increase in compressive strength from 28 days to 56 days, especially for sample A40, with a gain of 14%. Among the samples with recycled aggregates, the A40 sample had the highest compressive strength value.
- There was a small variation in the tensile strength in flexion, and the traction was preserved. Results ranged from 1.82 to 2.36 MPa at 56 days. Among the samples with recycled aggregates, sample A40 had the highest value of tensile strength.
- Microscopy analyses showed the presence of several cracks, and the failure path followed the less rigidly adhered mortar, which caused poor aggregate-paste binding and increased porosity. The sample with 40% recycled aggregates showed fewer cracks and greater mechanical resistance compared to the other samples with recycled aggregates.
- All analyzed samples showed results with values above the minimum specified in the ABNT NBR 16416/2015 and ACI 522R-10 standards and can be used in pervious concrete pavement for pedestrian traffic.

8.5 REFERENCES (CHAPTER II)

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522, Farmington Hills, Michigan, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. NBR 16416. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. NBR 16917. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – Argamassa e concreto endurecidos. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.
- BAI, W.; LU, X.; GUAN, J.; YUAN, C. Experimental study on uniaxial compression mechanical properties of recycled concrete with silica fume considering the effect of curing age. **Construction and Building Materials**, Volume 350, 128758, 2022.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - Resolução nº307. Brasília, DF, 2002.
- EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOUI, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, Volume 212, pp. 164-175, 2019.
- IBRAHIM, H. A.; GOH, Y.; NG, Z. A.; YAP, S. P.; MO, K. H.; YUEN, C. W.; ABUTAHA, F. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, volume 253, 119251, 2020.
- INTERNATIONAL STANDARD ISO 17785-2;2018 - TESTING METHODS FOR PERVIOUS CONCRETE - PART 2: DEMSITY AND VOID CONTENT.
- JALILIFAR, H.; SAJEDI, F. Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, volume 267, 121041, 2021.
- JIKE, N.; XU, C.; YANG, R.; QI, Y.; DAI, Y.; PENG, Y.; WANG, J.; ZHANG, M.; ZENG, Q. Pervious concrete with secondarily recycled low-quality brick-concrete demolition residue: Engineering performances, multi-scale/phase structure and sustainability. **Journal of Cleaner Production**, volume 341, 130929, 2022.
- LIMA, G. T. DOS S.; R, J. C.; CHERIAF, M. Investigation of the properties of pervious concrete with a recycled aggregate designed with a new combination of admixture. **Construction and Building Materials**, Volume 340, 127710, 2022.

- LU, J. X.; YAN, X.; HE, P.; POON, C. S. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, volume 234, pp. 1102-1112, 2019.
- MATAR, P.; BARHOUN, J. Effects of waterproofing admixture on the compressive strength and permeability of recycled aggregate concrete. **Journal of Building Engineering**, volume 32, 101521, 2020.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **CONCRETE: MICROSTRUCTURE, PROPERTIES, AND MATERIALS, FOURTH ED.**, MCGRAW-HILL PROFESSIONAL PUBLISHING, 2013.
- NAZEER, M.; KAPOOR, K.; SINGH, S. P. Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, volume 69, 106275, 2023.
- PARK, S.; JU, S.; KIM, H.; SEO, Y.; PYO, S. Effect of the rheological properties of fresh binder on the compressive strength of pervious concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, volume 17, pp. 636-648, 2022.
- SILVA, L. A.; NAHIME, B. O.; FELIPE, A. S.; ELIAS, C. N.; CARMO, D. R.; LIMA, E. C.; SANTOS, I. S.; LIMA, K. L.; ISTUQUE, D. Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste. **Construction and Building Materials**, volume 265, 120119, 2020.
- TANG, B.; FAN, M.; YANG, Z.; SUN, Y.; YUAN, L. A comparison study of aggregate carbonation and concrete carbonation for the enhancement of recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, volume 371, 130797, 2023.
- TAYLOR, H. F. W, **Cement Chemistry**, 2^a ed., Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- VIEIRA, G. L.; SCHIAVON, J. Z.; BORGES, P. M.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, volume 271, 122665, October 2020.
- WU, C.; JIANG, W.; ZHANG, C.; LI, J.; WU, S.; WANG, X.; XU, Y.; WANG, W.; FENG, M. Preparation of solid-waste-based pervious concrete for pavement: A two-stage utilization approach of coal gangue. **Construction and Building Materials**, volume 319, 125962, 2022.
- XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, volume 210, pp. 1605-1621, 2019.
- YAP, S. P.; CHEN, P. Z. C.; GOH, Y.; IBRAHIM, H. A.; MO, K. H.; YUEN, C. W. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, volume 181, pp. 155-165, 2018.

9. CONCLUSÃO GERAL

Este estudo analisou amostras de concreto permeável com o uso de sílica ativa e concreto permeável com agregados reciclados e concluiu que:

- O uso de aditivo e 10% de sílica (AAS10) na dosagem de concreto permeável resultou em aumento de 17% de resistência à compressão aos 28 dias e, aumento

de 40% de resistência à compressão, aos 56 dias, comparadas à amostra referência (sem aditivo e sem sílica). Em termos de resistência à tração na flexão, a amostra AAS10 apresentou acréscimo de 10% e 24%, quando comparada à amostra referência aos 28 dias e 56 dias, respectivamente. Os valores encontrados nos ensaios realizados estão acima do mínimo especificado, em atendimento às normas ABNT NBR 16416/2015 e ACI – 522R-10;

- A avaliação das propriedades mecânicas e de permeabilidade em amostras de concreto permeável com agregados reciclados de concreto (ARC) em níveis de substituição 40%, 50% e 60% resultaram em: i) aumento da permeabilidade, absorção e índice de vazios em relação à amostra referência; ii) redução da resistência à compressão nas amostras com 40%, 50% e 60% de agregado reciclado em 48%, 56% e 52%, respectivamente, quando comparadas às amostras com agregados naturais, aos 28 dias; iii) pequena variação na resistência à tração na flexão entre as amostras com agregados reciclados e constituídas exclusivamente por agregados naturais, tendo os resultados variado de 1,82 a 2,36 MPa aos 56 dias.
- Nas análises de microestruturas (MEV, DRX e TG/DTG), para as amostras com ARC, foi observada a presença de várias fissuras e caminho de falha seguindo a argamassa aderida menos rígida, o que possivelmente causou fraca ligação agregado-pasta e aumento da porosidade. A amostra com 40% de ARC apresentou menos fissuras e maior resistência mecânica comparada às demais amostras com agregado reciclado. Estes resultados se distinguem das análises microscópicas realizadas nas amostras com agregados naturais, aditivo superplastificante e sílica, que tiveram influência positiva no adensamento da matriz, melhorando a força e resistência, apesar da presença de fissuras.
- Diante dos resultados, verifica-se ser possível utilizar os agregados reciclados em concreto permeável, obtendo propriedades mecânicas semelhantes às dos agregados naturais e com valores superiores aos limites recomendados nas normas vigentes (ABNT NBR 16416/2015 e ACI – 522R-10).