



**PROPRIEDADES DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO
RESÍDUO DE CAULIM**

Por

Diego de Paiva Bezerra

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2023



**PROPRIEDADES DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO
RESÍDUO DE CAULIM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Diego de Paiva Bezerra

Orientadora: Profª. Drª. Aline Figueirêdo da Nóbrega

João Pessoa – Paraíba

Março de 2023

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

B574p Bezerra, Diego de Paiva.

Propriedades de concreto permeável contendo resíduo
de caulim / Diego de Paiva Bezerra. - João Pessoa,
2023.

122 f. : il.

Orientação: Aline Figueirêdo da Nóbrega.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia civil. 2. Resíduo de caulim. 3.
Concreto permeável. I. Nóbrega, Aline Figueirêdo da.
II. Título.

UFPB/624BC

CDU (043)

Aos meus pais Marizo e Judite, e irmã,
Maysa que sempre foram e serão minha
motivação para alcançar meus objetivos.

“Combati o bom combate, terminei a corrida, guardei a fé.” (2 Timóteo 4:7)

AGRADECIMENTOS

A Deus e Maria Santíssima por sempre me protegerem e me guiaram nessa trajetória.

*Aos meus pais **Marizo** e **Judite** por serem meu alicerce e acreditarem na minha capacidade.*

*A minha irmã, **Maysa**, e a minha prima, **Deborah**, por serem apoio nos momentos de estresse tornando a caminhada mais leve.*

*A minha orientadora, e amiga, **Aline Nóbrega** por sempre ser acessível na orientação desta pesquisa.*

*Aos companheiros de laboratório e pesquisa: **Beatriz Wanderley**, **Fabíola**, **Leane**, **Nely**, **Iranilza**, **Lucas Moura**, **Pedro**, **Caroline** e **Orlando** por dividirem comigo os momentos de alegrias e dificuldades encontrados durante a jornada.*

*Ao **Eng. Erveton Vitor** e a **Júnior**, proprietário da Kaoling, por terem me ajudado no fornecimento do resíduo de caulim.*

Aos amigos e familiares que sempre depositaram confiança em mim e contribuíram com essa conquista.

*Aos funcionários do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em especial a **Sebastião** e **Delby** por terem me auxiliado nos ensaios laboratoriais.*

Ao (LABEME/UFPB) por ter concedido os aparelhos necessários para desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa/UFCG) por ter realizado o ensaio de FRX das amostras.

À CAPES por ter concedido a bolsa de mestrado através do programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba.

A todos que não mencionei, mas que me ajudaram direta ou indiretamente, meu muito obrigado!

RESUMO

O desenvolvimento dos centros urbanos teve como uma de suas consequências o crescimento das áreas impermeáveis do solo e dessa forma o surgimento de problemas como inundações e alagamentos. Nesse contexto, surge o termo “*Water Sensitive Cities*”, que são medidas sustentáveis adotadas para que o desenvolvimento das cidades interfira o mínimo no ciclo hidrológico natural, dentre essas medidas pode-se citar o concreto permeável (CoPe). Somado a isso, a inclusão de materiais alternativos, a exemplo dos resíduos industriais, na composição do CoPe tem sido tema relevante nas pesquisas, com intuito de potencializar as propriedades dos concretos permeáveis e estabelecer uma política de reciclagem desses resíduos. Dentre os vários resíduos industriais, no estado da Paraíba, merece destaque a fração grossa do resíduo de caulim (RC), conhecida por birra. O RC apresenta bom desempenho quanto à adsorção, podendo contribuir na permeabilidade do CoPe. Diante do exposto, a pesquisa teve como objetivo investigar a influência do RC nas propriedades dos concretos permeáveis. Para isso, foi definida uma mistura referência na proporção de 1:2:2:0,3 (cimento: brita 0: brita 1: a/c). Em sequência, foram realizadas substituições do agregado convencional pelo RC nas proporções de 10, 20, 30 e 40% em relação à quantidade em massa da brita 0, essas misturas foram avaliadas nos estados fresco e endurecido. Após comparação dos resultados das misturas com RC e a referência foi verificado que as misturas com 10 e 20% de substituição apresentaram os maiores acréscimos de coeficiente de permeabilidade. Essas misturas atingiram as menores resistências mecânicas, enquanto que o inverso ocorreu nas misturas com 30 e 40% de substituição. A mistura RC30 alcançou maiores valores de resistência à compressão uniaxial (9,44 MPa) e à tração na flexão (2,56 MPa), com coeficiente de permeabilidade de $1,03 \times 10^5$ mm/h no estado seco, representando acréscimo de 55% em relação a mistura de referência e se mantendo dentro dos valores exigidos por norma, classificando-a para uso em pavimentos de tráfegos leves conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015). Assim, a substituição parcial do agregado miúdo de 9,5mm por 30% de RC contribuiu na funcionalidade drenante sem comprometer o desempenho mecânico do CoPe, indicando que esse resíduo tem potencial para ser utilizado neste tipo de concreto.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento permeável, Permeabilidade, Resíduo industrial.

ABSTRACT

The development of urban centers had as one of its consequences the growth of impermeable soil areas and thus the emergence of problems such as flooding and waterlogging. In this context, the term "Water Sensitive Cities" appears, which are sustainable measures adopted so that the development of cities interferes the least in the natural water cycle, among these measures can be mentioned the permeable concrete (CoPe). In addition, the inclusion of alternative materials, such as industrial waste, in the composition of CoPe has been a relevant theme in research, in order to enhance the properties of pervious concrete and establish a recycling policy for this waste. Among the various industrial wastes, in the state of Paraíba, the coarse fraction of kaolin waste (RC), known as tantrum, deserves to be highlighted. The RC presents characteristics of porous aggregate, and good performance regarding adsorption, and may contribute to the permeability of CoPe. Given the above, the research aimed to investigate the influence of RC on the properties of permeable concretes. For this, a reference mixture was defined in the proportion 1:2:2:0.3 (cement: gravel 0: gravel 1: w/c). Subsequently, substitutions of conventional aggregate by RC were performed in the proportions of 10, 20, 30 and 40% in relation to the mass amount of gravel 0. These mixtures were evaluated in the fresh and hardened states. After comparing the results of the mixtures with RC and the reference, it was verified that the mixtures with 10 and 20% of substitution presented the highest increases in permeability coefficient. These mixtures reached the lowest mechanical strengths, while the opposite occurred in mixtures with 30 and 40% substitution. The RC30 mixture reached the highest values of uniaxial compressive strength (9.44 MPa) and flexural tensile strength (2.56 MPa), with a permeability coefficient of 1.03×10^5 mm/h in the dry state, representing an increase of 55% compared to the reference mixture and remaining within the values required by standard, classifying it for use in sidewalks for light traffic according to NBR 16416 (ABNT, 2015). Thus, the partial replacement of 9.5 mm fine aggregate by 30% RC contributed to the drainage functionality without compromising the mechanical performance of CoPe, indicating that this waste has the potential to be used in this type of concrete.

KEYWORDS: Permeable sidewalk, Permeability, Industrial waste.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	A URBANIZAÇÃO E SEUS EFEITOS PROBLEMÁTICOS	18
3.2	A SUSTENTABILIDADE E O SURGIMENTO DAS CIDADES-ESPONJA.....	19
3.3	ESTRUTURA E TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	21
3.4	CONCRETO PERMEÁVEL: DEFINIÇÃO E HISTÓRICO	23
3.5	CONCRETO PERMEÁVEL: APLICAÇÕES, VANTAGENS E DESVANTAGENS	26
3.6	DOSAGEM DE CONCRETOS PERMEÁVEIS	28
3.7	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS	31
3.7	PROPRIEDADES DE CONCRETOS PERMEÁVEIS CONTENDO RESÍDUOS	41
3.9	O RESÍDUO DE CAULIM.....	43
3.10	UTILIZAÇÃO DO RC EM CONCRETOS PERMEÁVEIS	44
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
4.1	ETAPA 1: MATERIAIS UTILIZADOS	49
4.2	ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	50
4.2.1	Análise física	51
4.2.2	Análise mineralógica	54
4.2.3	Análise química	56
4.3	ETAPA 3: ENSAIOS NAS AMOSTRAS NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO	58
4.3.2	Ensaios no estado fresco.....	59
4.3.2	Ensaios no estado endurecido.....	61
4.3.3	Determinação da mistura referência	66
4.3.4	Análise estatística	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1	TRABALHABILIDADE	72
5.2	ÍNDICE DE VAZIOS.....	74
5.3	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	76
5.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	80
5.4.1	Relação entre resistência à compressão uniaxial e coeficiente de permeabilidade	82
5.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	84
5.5.2	Relação entre resistência à tração por compressão diametral e coeficiente de permeabilidade.....	87

5.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	88
5.6.2 Relação entre resistência à tração na flexão e coeficiente de permeabilidade	91
5.7 PERDA DE MASSA POR ABRASÃO.....	92
5.7.2 Relação entre resistência à abrasão e coeficiente de permeabilidade.....	95
6 CONCLUSÕES.....	97
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de um pavimento permeável	21
Figura 2 - Sistema de canais em pavimentos com concreto permeável	22
Figura 3 – Linha do tempo do uso do concreto permeável.	25
Figura 4- Aplicações do concreto permeável	27
Figura 5 - Imagem esquemática sobre a adsorção do RC em comparação ao fenômeno de absorção.....	45
Figura 6 - Fluxograma geral do planejamento experimental.....	48
Figura 7 - Agregados graúdos: brita 0 e brita 1.....	49
Figura 8 - Processo esquemático para obtenção da birra.....	50
Figura 9 - Frações de resíduo de caulin retidas nas malhas das peneiras.....	53
Figura 10 - Curvas granulométricas do resíduo de caulin, brita 0 e brita 1.	53
Figura 11 - Resultado do DRX para o resíduo de caulin.....	55
Figura 12 - Resultado do DRX para o CP V ARI.	56
Figura 13 - Ensaio de perda ao fogo.....	57
Figura 14 - Fluxograma esquemático dos ensaios de trabalhabilidade nas misturas de concreto permeável.....	59
Figura 15 - Ensaio de trabalhabilidade realizado pelo abatimento do tronco de cone.	60
Figura 16 - Ensaio de trabalhabilidade por VeBe.....	60
Figura 17 - Fluxograma esquemático dos ensaios no estado endurecido.....	61
Figura 18 - Formas utilizadas para moldagem dos CPs	62
Figura 19 - Dimensões dos corpos de prova	62
Figura 24 - Ensaio do coeficiente de permeabilidade.....	63
Figura 21 - Ensaios de resistência mecânica	64
Figura 22 - Equipamento adaptado para o ensaio de perda de massa por abrasão.....	65
Figura 23 - Adaptação do ensaio de perda de massa por abrasão	66
Figura 24 - Fluxograma da metodologia utilizada para determinação da mistura referência.	67
Figura 25 – Misturas testes no estado fresco	68
Figura 26 - Resultados do ensaio de trabalhabilidade realizado nas misturas de concreto permeável.....	72
Figura 27 - Resultados do ensaio de índices de vazios realizado nas misturas de concreto permeável.....	75
Figura 28 - Resultados do ensaio coeficiente de permeabilidade realizado nas misturas de concreto permeável no estado seco e saturado.	77
Figura 29 - Resultados da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.	80
Figura 30 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à compressão nas misturas de concretos permeáveis.	83
Figura 31 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral para diferentes misturas.....	84
Figura 32 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à tração por compressão diametral nas misturas de concretos permeáveis.....	87
Figura 33 - Resultados da resistência à tração na flexão para diferentes misturas.....	88
Figura 34 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à tração na flexão nas misturas de concretos permeáveis.	92
Figura 35 - Resultados da perda de massa por abrasão para diferentes misturas.....	93
Figura 36 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e a perda de ...	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens do uso do concreto permeável	27
Tabela 2 - Proporções de componentes nas misturas de concretos permeáveis para diferentes autores.....	29
Tabela 3 – Análise da consistência de concretos permeáveis.	32
Tabela 4 - Índice de vazios de concretos permeáveis para diferentes autores.	33
Tabela 5 - Coeficiente de permeabilidade de concretos permeáveis encontrados em diferentes pesquisas.	35
Tabela 6 - Resistências de concretos permeáveis encontrados para diferentes pesquisas... ...	37
Tabela 7 - Comparativo das propriedades dos concretos permeáveis entre a NBR 16416 e a ACI 522R-06	41
Tabela 8 - Ensaios de caracterização.	51
Tabela 9 - Resultado do ensaio de massa específica dos agregados, RC e cimento e da massa unitária dos agregados e RC.	52
Tabela 10 - Coeficientes de uniformidade e de curvatura nas amostras.	54
Tabela 11 - Resultado da composição química do RC e CPV ARI.	57
Tabela 12 - Comparativo entre os valores encontrados nos ensaios e os estabelecidos pela NBR 16697 (2018) para o FRX do CP V ARI.	58
Tabela 13 - Análise das misturas no estado fresco e endurecido.	58
Tabela 14 - Porcentagens de agregados graúdos nos traços pilotos.	67
Tabela 16- Resultados dos ensaios nas misturas testes.	68
Tabela 16 - Nomes e composições das misturas.	70
Tabela 17 – Análise de trabalhabilidade para o método de VeBe para diferentes misturas.	74
Tabela 18 - Análise do índice de vazios para diferentes misturas.....	76
Tabela 19 - Análise do coeficiente de permeabilidade para diferentes misturas.....	78
Tabela 20 - Resultados da variância para o coeficiente de permeabilidade de diferentes misturas.....	79
Tabela 21 – Análise da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.....	81
Tabela 22 - Resultados da variância para a resistência à compressão de diferentes misturas.	82
Tabela 23 – Comparação entre literatura e ensaio dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.	85
Tabela 24 – Análise da resistência à compressão diametral para diferentes misturas.	86
Tabela 25 – Análise da resistência à tração por compressão diametral para diferentes misturas.....	86
Tabela 26 - Comparação entre literatura e ensaio dos resultados de resistência à tração na flexão.	89
Tabela 27 - Análise da resistência à tração na flexão para diferentes misturas.....	90
Tabela 28 - Resultados da variância para a resistência à tração na flexão para diferentes misturas.....	91
Tabela 29 - Análise da perda de massa por abrasão para diferentes misturas.....	94
Tabela 30 - Resultados da variância para a perda de massa por abrasão para diferentes misturas.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dosagem para concreto permeável.....	28
Quadro 2 - Valores da resistência e espessura mínima do revestimento permeável..	40

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação para ensaio de permeabilidade.	63
Equação 2 – Relação entre a resistência à compressão uniaxial e à tração por compressão diametral.	84
Equação 3 – Relação entre a resistência à compressão uniaxial e à tração na flexão.....	89

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização resultou no crescimento desordenado das cidades, e um dos grandes problemas é o aumento das áreas impermeáveis do solo. Isso tem influência nas inundações urbanas, visto que torna desafiador absorver os picos de descargas pluviais que transbordam dos corpos hídricos (PEREIRA e BARBOSA, 2015). Segundo Tavares e Kazmierczak (2016), a impermeabilização do solo é responsável por mudanças no ciclo hidrológico, pois diminui o tempo de infiltração da água que reabastece os lençóis freáticos e resulta em alterações nos leitos dos rios e dos canais, acarretando no desequilíbrio ambiental.

No intuito de diminuir os problemas causados no ciclo da água, países como: China, Estados Unidos e França estudam mecanismos que amenizem os efeitos causados pela impermeabilização dos solos (BENEVENUTO, 2018). Nesse contexto, se origina a expressão “*Water Sensitive Cities*”, que segundo Janusziewicz e Golebiewski (2019) relaciona ambientes construídos com desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, novas tecnologias estão sendo implementadas, a exemplo de poços de infiltração, trincheiras de infiltração, bacias de detenção e pavimentos permeáveis, com uso do concreto permeável, que permite a maior taxa de infiltração da água pluvial para o solo, menor taxa de escoamento, diminuição da necessidade de tanques de detenção. Esse concreto pode ser aplicado em calçadas, estacionamentos e vias de tráfegos leves e já é temática de estudo para Candian Filho *et al.* (2022), Xu Cai *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2020).

Segundo Lamb (2014), o concreto permeável é um material com ausência ou pouca quantidade de agregado miúdo, isso forma uma estrutura porosa, com grandes poros conectados entre si, que permite o fluxo de fluidos no seu interior. Essa propriedade drenante associada aos aspectos mecânicos dos concretos permeáveis já são alvos de estudo nas pesquisas de Yi Zhang *et al.* (2021) e Costa *et al.* (2018).

Ademais, são diversas as pesquisas que estudam a introdução de novos materiais como componentes dos concretos permeáveis a exemplo de Santos (2017), Tavares e Kazmierczak (2016), Pereira e Barbosa (2015) e Ribeiro (2014). Nesse direcionamento, trabalhos como os de Faria *et al.* (2019), Oliveira (2017), utilizaram resíduo da construção. A introdução desses resíduos nas misturas dos concretos permeáveis além de contribuir para sua reutilização pode potencializar as propriedades drenantes dos concretos permeáveis, a depender das suas características físicas. Nesse contexto, o

resíduo de caulim (RC) pode ser visto como alternativa viável a essa aplicação, pois segundo Patrício (2016) o RC apresenta potencial de adsorção, isso pode auxiliar na propriedade de permeabilidade em concretos permeáveis.

As principais reservas de caulim no Brasil encontram-se nos estados do Pará e Amazonas, juntas, no ano de 2017, representavam 98,4% da reserva total brasileira (CAMPOS *et al.*, 2018). Desse contexto, pode ainda ser levantada a falta de política ambiental no gerenciamento do RC que é depositado em contato direto com o solo, próximo de mananciais de água e de residências, fato negativo no aspecto social e ambiental que torna a reciclagem do RC sustentavelmente necessária (AZERÊDO, 2012).

Diante disso, esta pesquisa propõe investigar as propriedades mecânicas e físicas de concretos permeáveis contendo a fração grossa do RC em substituição parcial do agregado graúdo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a influência do resíduo de caulim nas propriedades do concreto permeável.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Averiguar a melhor proporção de aglomerante, agregado graúdo e resíduo de caulim para obter um concreto permeável;
- ✓ Investigar as propriedades do concreto permeável no estado fresco e endurecido, substituindo parcialmente o agregado graúdo pelo resíduo de caulim;
- ✓ Propor uma mistura de concreto permeável com resíduo de caulim que possa ser aplicada em pavimento permeável de vias urbanas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em tópicos que contextualizaram a pesquisa. Serão abordados os fatores históricos e os efeitos problemáticos do crescimento urbano. Em sequência, serão expostos os principais mecanismos de solução para os problemas oriundos do processo da urbanização, com foco no estudo das Cidades-Esponja e implementação dos pavimentos permeáveis. A partir disso, serão discutidas as principais vantagens e desvantagens dos concretos permeáveis, presente na camada de revestimento desses pavimentos, assim como suas propriedades e características. Ainda acerca da temática serão abordados estudos sobre a introdução de resíduos nas misturas de concretos permeáveis com enfoque no resíduo de caulim.

3.1 A urbanização e seus efeitos problemáticos

A urbanização é o processo de ocupação das cidades e está relacionada com o êxodo rural da população (MONTEIRO, 2010). Um dos fatores que contribuiu para o crescimento desordenado dos centros urbanos, no cenário europeu, foi o desenvolvimento da indústria durante o século XVIII, mas é a partir da década de 50 que as atividades industriais ganharam escala mundial e atraíram mais pessoas para as cidades (LAMB, 2014).

No Brasil, o crescimento urbano intensificou depois da década de 60 (IBGE, 2010). Segundo dados do IBGE (2020), no ano de 2020 a densidade populacional brasileira nos centros urbanos era de 76% da população geral. O processo migratório e acelerado das pessoas para as cidades, em busca de novas oportunidades, fez com que ocorresse uma ocupação sem planejamento que alavancou no aumento da quantidade de edificações e na expansão dos centros urbanos (LAMB, 2014). Esse contexto acarretou na posse sobre os recursos naturais disponíveis no local, ocasionando degradação da biodiversidade natural e o aumento das áreas impermeabilizadas, isso promoveu alterações no ciclo hidrológico natural (TUCCI, 2005).

Polastre e Santos (2006) afirmam que o aumento das áreas impermeáveis dos solos é um dos principais fatores de impacto que a área urbanizada pode causar na biodiversidade local, visto que muda significativamente o volume das águas pluviais nas diferentes etapas do ciclo hidrológico.

De acordo com Tucci (2003) o ciclo hidrológico sofre grandes alterações nas áreas urbanas, devido, principalmente, à alteração da superfície e da canalização do escoamento. Tavares e Kazmierczak (2016) acrescentam que a impermeabilização sob o solo diminui o tempo de infiltração da água que reabastece os lençóis freáticos. Ainda conforme Esteves (2006), as impermeabilizações são responsáveis por maiores velocidades de escoamento superficial das águas, devido as menores rugosidades dos pavimentos impermeáveis, que resulta na erosão do solo exposto nas margens dos cursos d'água, e em alterações nos leitos dos rios, acarretando um desequilíbrio ambiental.

Outro problema derivado da impermeabilização dos solos é a sobrecarga hídrica nas redes e canais de escoamento, podendo ocasionar inundações e enxurradas em casos de sistemas de drenagem deficitários (HOLTZ, 2011) e (MENDONÇA, 2004). Entretanto, segundo Lamb (2014), as inundações e alagamentos podem ser influenciados também pelo nível de poluentes, visto que com o aumento da densidade populacional ocorre o aumento na produção de lixo que são descartados no meio ambiente e obstrui os canais de águas pluviais.

Com intuito de aliviar as redes de drenagem, os sistemas tradicionais que são voltados para canalização do escoamento estão sendo substituídos por sistemas sustentáveis. Nesse paradigma, surgem as “*Best Management Practices*” (BMPs) que tratam de técnicas cujo propósito é impedir a transferência dos problemas de montante para jusante por meio do controle do escoamento na bacia, mais próximo de sua fonte, e não no curso d'água (BATEZINI e BALBO, 2015). Outras técnicas sustentáveis são as bacias de detenção, poços de infiltração e pavimentos drenantes (LAMB, 2014).

As técnicas de drenagem sustentáveis se enquadram nos estudos sobre “*Sponge Cities*” (Cidades-Esponja) que é tema pesquisado por Filho Candian *et al.* (2022), Xu Cai *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2020) e será discutido no próximo tópico.

3.2 A sustentabilidade e o surgimento das Cidades-Esponja

As técnicas de drenagem convencionais podem ser ineficazes e insuficientes para suprir as demandas dos centros urbanos. Pesquisas como as de Canholi (2005) e Tucci (2007) afirmam que é necessário mudar as formas atuais do gerenciamento da drenagem urbana e começar a adotar visões mais abrangentes na gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, busca-se por um sistema que envolva todo manancial e promova um equilíbrio entre a água infiltrada e a escoada (SOUSA e BAHIENSE, 2013).

Nessa abordagem se encaixa os termos de “*Sponge Cities - SC*” (Cidades-Esponja). Esse conceito surgiu na China, em 2012, após inundações e alagamentos ocorridos na cidade de Pequim. No entanto, mesmo sendo um termo recente o método sustentável já havia sido aplicado em 1974, em Montgomery County, próximo de Houston, EUA, em um empreendimento privado que constituiu de um sistema de drenagem que absorve as águas nas áreas baixas, prevenindo as enchentes. Outra aplicação foi no projeto do Coffee Creek, localizado na cidade de Chicago, EUA (GALDINO, 2022).

Sponge Cities é um termo recente e sua aplicação é inovadora, pois alinha o planejamento urbano à gestão hídrica das águas pluviais. Além disso, essa abordagem se encarrega em gerir todo o ciclo hidrológico com intuito de controlar os períodos de secas e os chuvosos (GALDINO, 2022). Fogeiro (2019) relata que o conceito de *SC* além de abordar sobre a captação de grandes volumes de água, também engloba a reutilização das águas de chuva para mitigar os impactos de escassez ou de águas contaminadas e sujas.

Zhang *et al.* (2018) afirmam que a *SC* é o sistema que busca resolver os problemas causados pelo aumento das inundações pontuais, poluição e escassez da água. Zhang *et al.* (2018) ainda apresenta cinco pontos para desenvolver uma Cidade-Esponja, são eles:

1 – Multi escalas: para construir uma Cidade-Esponja precisa ter o apoio da população;

2 - Amplo período de reaparecimento de chuvas: a Cidade-Esponja necessita lidar com as precipitações no período de baixas e altas intensidades;

3 – Versatilidade: a Cidade-Esponja deve funcionar de tal forma que impeça ou alivie inundações urbanas, reduza a poluição das chuvas e melhore o ambiente ecológico da água.

4 - Sistemático: o projeto deve promover a conservação da água, arquitetura, jardins e paisagens. Além disso, o projeto requer profissional técnico para planejar, projetar, construir, operar e manter as instalações de engenharia, bem como supervisionar, organizar e coordenar os vários departamentos;

5 - Natureza de longo prazo: a Cidade-Esponja é um conceito de desenvolvimento e gestão da água urbana que deve ser desenvolvido a partir de medidas de médio e longo prazo (ZHANG *et al.*, 2018, p. 3).

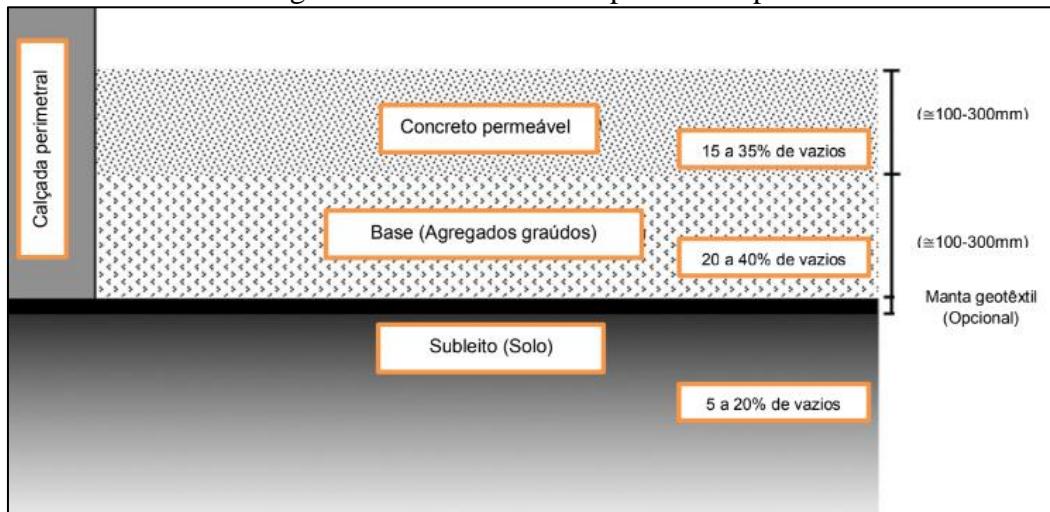
Januszkiewicz e Golebiewski (2019) afirmam que o surgimento do conceito *SC* se relaciona com a expressão “*Water Sensitive Cities*”, que envolve o desenvolvimento

sustentável com ambientes construídos. Nesse paradigma, novas tecnologias, como a dos pavimentos permeáveis, estão sendo implementadas. O tópico a seguir abordará sobre a estruturação desses pavimentos permeáveis, bem como os seus principais tipos. Essa abordagem foi realizada com intuito de contextualizar a aplicação e uso dos concretos permeáveis.

3.3 Estrutura e tipos de pavimentos permeáveis

De acordo com Silva (2019), os pavimentos permeáveis são constituídos pela camada de rolamento ou revestimento em concreto permeável; base, que geralmente é constituída de agregados graúdos e subleito ou solo. É importante salientar que deve existir uma constância entre os coeficientes de permeabilidade das diferentes camadas para que não ocorra a saturação de alguma dessas, e assim, a perda da funcionalidade drenante. Na Figura 1 é apresentado o esquema do sistema de drenagem sustentável com aplicação do concreto permeável (KIA *et al.*, 2017).

Figura 1 - Camadas de um pavimento permeável



Fonte: KIA *et al.* (2017).

Tennis *et al.* (2004) e Ferguson (2005) afirmaram que a espessura, resistência e permeabilidade da camada de concreto permeável dependerá dos esforços que a camada estará submetida e dos aspectos hidrológicos da região.

Ferguson (2005) ainda afirma que a camada de base servirá de suporte para camada de concreto permeável, atuando na distribuição de carga para o subleito e ainda contribuindo no controle da cura do concreto permeável, por isolar o concreto do contato

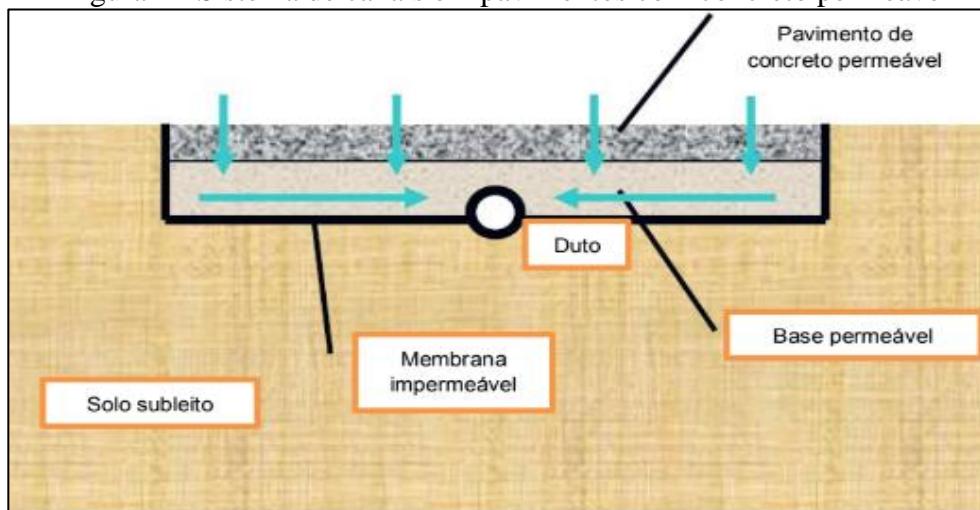
direto com o solo, evitando a perda de parte da água de amassamento do concreto por absorção do solo.

Por último existe a camada do subleito, onde se encontra o solo natural, que às vezes, dependendo das características deste e do concreto permeável, deve sofrer modificações. Essas mudanças servirão para satisfazerem as características hidráulicas e de resistência do pavimento permeável (SILVA, 2019).

Segundo a ACI (2010), para que o solo funcione como subleito de pavimentos permeáveis ele deve ter uma taxa de infiltração mínima de 1300 mm/h. Assim, solos argilosos podem apresentar subleitos com baixos índices de infiltração e são esses os sujeitos as modificações (TENNIS *et al.*, 2004).

As adaptações podem ser feitas pela troca do material ou por aplicação de mecanismos, como canais. Esses canais levam a água infiltrada para cursos d'água ou reservatório. Nesse último caso, quando o intuito é reutilizar a água é realizada a impermeabilização de geotêxtil entre a camada de base e o subleito, para que não ocorra infiltração para o solo (SILVA, 2019). Na Figura 2 é apresentado um esquema de como funciona o mecanismo de canais em pavimentos permeáveis.

Figura 2 - Sistema de canais em pavimentos com concreto permeável



Fonte: DELATTE *et al.* (2007).

Suzuki *et al.* (2013) sugerem que os pavimentos permeáveis podem ser divididos em três tipos, quanto a sua capacidade de infiltração, são eles:

- 1- Sistema de infiltração total: as águas de chuvas são totalmente encaminhadas para infiltração no solo;

- 2- Sistema de infiltração parcial: o subleito não consegue absorver toda a água infiltrada, tornando necessária a criação de canais para coletar a água excedente e encaminha-la para o curso d'água mais próximo;
- 3- Sistema de infiltração para controle da qualidade de água: é realizada a coleta das primeiras águas para verificação da sua qualidade e após captação deste fluxo inicial ocorre a coleta por meio de drenos (SUZUKI *et al.*, 2013).

A classificação do pavimento permeável se procede pela taxa de infiltração que está diretamente relacionada com a funcionalidade drenante das suas camadas, dentre essas, tem a camada de revestimento, que já foi discutida e é onde o concreto permeável é aplicado. Esse também pode ser classificado em três tipos, são eles (BATEZINI, 2013):

- 1- Concreto permeável hidráulico: utilizado para fins não estruturais com baixa resistência e alta permeabilidade;
- 2- Concreto permeável normal: possui resistência e permeabilidade com valores intermediários;
- 3- Concreto permeável estrutural: possui alta resistência e baixa permeabilidade (BATEZINI, 2013).

Apesar dessas definições, não existe um limite teórico de coeficiente de permeabilidade e resistência para diferenciar o concreto permeável quanto a tipologia. Exposto isso, os próximos tópicos abordarão definição, histórico e propriedades do concreto permeável.

3.4 Concreto Permeável: definição e histórico

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), concreto permeável é definido como concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade. Essa definição aproxima-se com a estabelecida pela *American Concrete Institute* que designa concreto permeável como concreto poroso que possui vazios interconectados entre si, que permitem que a água passe através da superfície (ACI 522, 2010).

Ainda acerca da definição de concreto permeável, Lamb (2014) acrescenta que esse é um material sustentável, uma vez que reduz o escoamento das águas pluviais, melhora a qualidade da água de recarga do lençol freático e pode reduzir o impacto da urbanização. Para que o concreto se configure como concreto permeável é necessário que esse possua alto volume de vazios, da ordem de 15 à 20%.

Dessa forma, para garantir esse volume de vazios autores como Chandrappa *et al.* (2016), Mehta e Monteiro (2006) e Tennis *et al.* (2004) estabelecem que concretos permeáveis devem ter em sua composição pouca quantidade ou ausência de agregado miúdo. Merighi *et al.* (2006) define concreto permeável como concreto drenante que possui em sua mistura aglomerante (Cimento Portland), agregado graúdo, água e em alguns casos aditivos.

O estudo do concreto com grande volume de vazios levanta alguns questionamentos quanto à nomenclatura desse material. Afinal, qual a nomenclatura correta? Concreto permeável ou concreto poroso?

De acordo com a etimologia, a palavra permeável faz referência aos corpos que deixam passar através de seus poros outros corpos (fluidos, líquidos e gases) (DICIO, 2017). Já o termo poroso se refere ao corpo que possui poros, é furado ou perfurado (DICIO, 2017).

Segundo Metha e Monteiro (2008), o concreto convencional pode apresentar pequenos poros (com dimensões menores que 50 ηm) e grandes poros (com dimensões maiores que 50 ηm). Ainda nessa análise dimensional, para classificar o concreto como permeável é necessário que o mesmo possua poros com dimensão maior que 0,01 μm (MODI *et al.*, 2018). Desse contexto, conclui que nem todo concreto poroso será permeável, entretanto, todo concreto permeável é poroso. Assim, pode ser justificado que o termo mais adequado é concreto permeável.

Apesar das evidências apresentadas, alguns autores como Monteiro (2010), nomeiam concreto permeável como concreto poroso. Já para Schackow *et al.* (2020), Sandoval *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2019) o concreto com alto índice de vazios é denominado de concreto permeável. Pils *et al.* (2019) nomeia-o como concreto drenante. Nesse trabalho serão usados os termos: concreto permeável e concreto drenante, pois são os mais cabíveis no contexto estudado.

O emprego do termo concreto permeável não é mencionado na literatura até 1923. Somente após o fim da Primeira Guerra Mundial que houve o primeiro registro do uso do

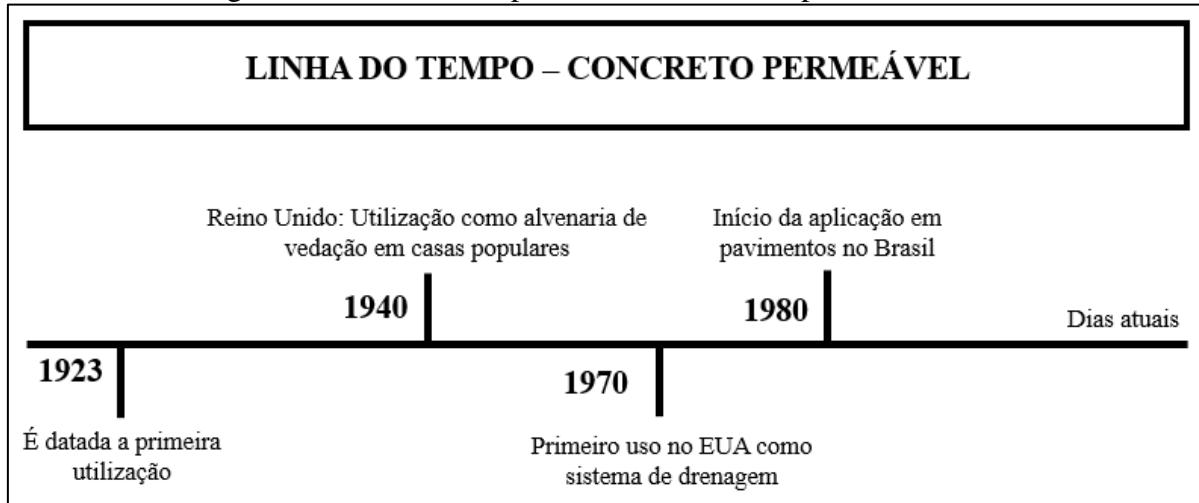
concreto com elevado volume de vazios, sem a presença de agregado miúdo (HOLTZ, 2011).

O concreto permeável, inicialmente denominado por concreto sem finos (*no-fines concrete*) teve seu primeiro uso técnico na Alemanha, na década de 20, mas foi na década de 40 que esse sistema passou a ser mais difundido na indústria da construção, no Reino Unido, para a construção de mais de 900 casas. Isso devido à estrutura porosa que contribuía para o isolamento térmico e acústico da alvenaria dessas casas. No entanto, em 1970 surgiu oposição ao uso do sistema devido a algumas falhas executivas e consequentemente surgimento de manifestações patológicas encontradas no método construtivo (BOTTEON, 2017).

Nesse mesmo período, década de 70, o Estados Unidos (EUA) passava por um processo acelerado de urbanização e um dos problemas encontrados foram as inundações e alagamentos originados da impermeabilização do solo. Nesse contexto, teve-se a necessidade de encontrar um sistema que amenizasse esse problema e permitisse o escoamento das águas pluviais nas áreas recém-construídas. A partir dessa problemática, o concreto permeável reaparece como um sistema de drenagem, retendo a água na fonte, impedindo-a de fluir para córregos e minimizando as enchentes (BOTTEON, 2017) e (LAMB, 2014).

No Brasil, a utilização dos concretos permeáveis iniciou em 1980, com aplicação em pavimentos de aeroportos e mais tarde em rodovias no sudeste do país. A Figura 3 apresenta a linha do tempo do uso do concreto permeável (LAMB, 2014).

Figura 3 – Linha do tempo do uso do concreto permeável.



Fonte: autoria própria (2023).

Com base nesse levantamento histórico, constata-se que o emprego dos concretos permeáveis para fabricação de pavimentos e de elementos drenantes é uma tecnologia relativamente nova, classificando-o na categoria de concretos especiais (LAMB, 2014).

Entretanto, mesmo após décadas, o estudo sobre concretos permeáveis ainda é escasso no país, um dos motivos é a falta de normatização para orientar a sua confecção ou o seu controle de qualidade (RAMOS, 2018).

A falta de estudos e normas sobre esse tema dificulta a fabricação, certificação e manutenção desse sistema, que tem maior abrangência de uso no EUA e na China (LAMB, 2014). Logo, torna-se necessário o entendimento sobre a utilização, vantagens e desvantagens desse material, pontos que serão apresentados no tópico seguinte.

3.5 Concreto Permeável: aplicações, vantagens e desvantagens

A maior usabilidade dos concretos permeáveis é em pavimentos e na composição do sistema de drenagem. Entretanto, o mesmo pode ser aplicado de diferentes formas conforme (LAMB, 2014):

- 1- Calçadas, estacionamentos e ruas de baixo tráfego;
- 2- Parques, praças, pátios residenciais, quadras de tênis, campos de golfe, painéis de enchimento;
- 3- Decks de piscinas;
- 4- Estabilização de encostas e muros de arrimo;
- 5- Bases permeáveis abaixo de pavimentos de alta resistência (camadas-base);
- 6- Isolamento térmico de paredes (alta porosidade).

A “*National Ready Mixed Concret Association*” (2010), destacou que o concreto permeável ganhou também destaque, no EUA, como material de vedação, sendo esse fabricado na forma de painéis para componente de paredes de edifícios altos. Existem também pesquisas que apresentam o uso do concreto permeável na vedação de prédios industriais e públicos com intuito de melhorar o isolamento térmico da edificação (ACI, 2006). Alguns exemplos de aplicações do concreto permeável podem ser vistos na Figura 4.

Figura 4- Aplicações do concreto permeável: a) uso em calçadas, b) uso em estacionamentos e c) uso em vias urbanas.



Fonte: TECNOSIL (2022).

Essas aplicações trazem consequências positivas e negativas de uso. A Tabela 1 apresenta uma sequência de vantagens e desvantagens do uso dos concretos permeáveis (MAUÁ, 2017).

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens do uso do concreto permeável

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Maior capacidade drenante; • Baixo custo de manutenções; • Uso em elementos que compõe a drenagem urbana; • Redução ou eliminação de tanques de detenção; • Possibilita a reutilização da água das chuvas; • Recupera a capacidade de infiltração do solo e realimenta os aquíferos; • Reduz o escoamento superficial; 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas resistências; • Baixa trabalhabilidade; • Susceptíveis à segregação;

<ul style="list-style-type: none"> • Atua como um filtro, impedindo que impurezas e metais pesados atinjam o lençol freático; • Minimiza obras de microdrenagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de normatização específica; • Manutenções frequentes; • Risco de entupimento entre os vazios.
--	---

Fonte: MUÁ (2017).

Para correta aplicação do concreto permeável é necessário entender como se procede a dosagem desse material, apresentada no item a seguir.

3.6 Dosagem de concretos permeáveis

A ACI 522R (ACI, 2010) sugere que os componentes utilizados na dosagem dos concretos permeáveis devem ser: cimento; agregado graúdo com diâmetro máximo entre 4,8 mm e 9,5 mm, sendo a fração mais fina dos agregados não utilizada; e água.

Segundo Alves (2016), a metodologia de dosagem em concretos permeáveis ainda é escassa, pois não existe uma norma específica sobre sua dosagem. Dessa forma, os procedimentos para dosagem desse tipo de concreto devem ser estabelecidos após revisões de literatura. No geral, essa dosagem pode utilizar os limites definidos por Oliveira (2017) (Quadro 1).

Quadro 1 – Dosagem para concreto permeável.

Materiais	Consumo/Proporção (Kg/m ³)
Cimento	270 – 415
Agregado graúdo	1190 – 1480
Relação água/cimento (em massa)	0,27 – 0,34
Relação cimento/agregado (em massa)	1:4 – 1:4,5
Relação agregado miúdo/graúdo (em massa)	Ausência de agregado miúdo – 1:1

Fonte: Oliveira (2017).

Essas proporções, apresentadas no Quadro 1, se assemelham às sugeridas por diferentes autores (Tabela 2).

Tabela 2 - Proporções de componentes nas misturas de concretos permeáveis para diferentes autores.

Autor	Traço utilizado (aglomerante:agregado:graúdo:a/c*)
Cordian Filho <i>et al.</i> (2022)	1:4,28:0,4
Batezini <i>et al.</i> (2021)	1:4:0,44
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	1:2,9:0,3 1:2,4:0,3 1:2:0,3
Pils <i>et al.</i> (2019)	1:4:0,25
Costa <i>et al.</i> (2019)	1:4:0,3
Faria <i>et al.</i> (2019)	1:3:0,3-0,4 1:4:0,3-0,4 1:5:0,3-0,4
Sandoval <i>et al.</i> (2019)	1:5:0,25
Tavares e Kazmierczak (2016)	1:4:0,3
Pereira e Barbosa (2015)	1:4:0,3
Batezini e Balbo (2015)	1:4:0,4

*a/c – relação água cimento

Fonte: próprio autor (2023).

Faria *et al.* (2019) analisou o desempenho mecânico e drenante de concretos permeáveis com agregado natural para diferentes proporções de componentes e apresentou a mistura 1:4 (aglomerante:agregado graúdo) como a que obteve melhor resultado mecânico sem comprometer o coeficiente de permeabilidade do sistema. Essa proporção foi realizada por Batezini *et al.* (2021), Pils *et al.* (2019), Costa *et al.* (2019), Tavares e Kazmierczak (2016), Pereira e Barbosa (2015) e Batezini e Balbo (2015).

Mesmo com proporções idênticas os componentes presentes em cada pesquisa variam em tipo, forma e granulometria. Isso implica em diferentes fatores água/cimento (a/c) que costumam variar entre 0,3-0,4 conforme as pesquisas de Cordian Filho *et al.* (2022), Martins Filho *et al.* (2020), Costa *et al.* (2019), Faria *et al.* (2019), Tavares e Kazmierczak (2016), Pereira e Barbosa (2015) e Batezini e Balbo (2015).

Entretanto, valores de a/c inferior a 0,3 foram constatados nos estudos de Pils *et al.* (2019) e Sandoval *et al.* (2019), isso devido a mudanças nas proporções do concreto (cimento: agregado graúdo), que no caso de Sandoval *et al.* (2019) chegou a ser de 1:5. Esses valores inferiores de a/c acarretaram em misturas mais secas com baixa trabalhabilidade, dificultando o manuseio e uso desse material.

As diferentes proporções entre os materiais, assim como seus tipos, implicam diretamente nos resultados de permeabilidade e resistência dos concretos permeáveis. Batezini *et al.* (2021), por exemplo, usou a composição 1:4:0,44, com dimensão máxima do agregado graúdo variando nos valores de 9,5 mm; 6,3 mm e 4,8 mm, obtendo maior resistência mecânica (8,68 MPa) para a amostra que utilizou o agregado de dimensão máxima igual a 6,3 mm.

Igualmente a Batezini *et al.* (2021), Pils *et al.* (2019) estudaram traços com proporções de 1:4, mas com a/c variando de 0,25 a 0,35 e dimensão máxima do agregado graúdo com valores de 9,5 mm e 19 mm. Pils *et al.* (2019) perceberam que as amostras que utilizaram agregado com dimensão máxima igual a 19 mm apresentaram menores resistência à compressão uniaxial (2,44 MPa), enquanto aquelas que usaram agregado graúdo com dimensão máxima igual a 9,5 mm obtiveram maior resistência à compressão uniaxial (4,66 MPa).

Dos resultados encontrados por Batezini *et al.* (2021) e Pils *et al.* (2019) foi verificado que as amostras de concreto permeável que utilizaram agregados graúdos de menores diâmetros máximos atingiram maiores resistências e menores coeficientes de permeabilidade, isso pode ser justificado pela forma dos grãos dos agregados graúdos que no caso das misturas que usaram grãos de menores diâmetros atingiram maior compacidade e consequentemente maior resistência e menor permeabilidade.

Acerca do aglomerante, as pesquisas de Aquino *et al.* (2019), Lamb (2014) e Holtz (2011) utilizaram o CPV-ARI, a justificativa dada pelos autores foi a rapidez em atingir altas resistências para as primeiras horas de hidratação do cimento.

A dosagem dos concretos permeáveis está diretamente relacionada com as propriedades desses. Assim, o próximo tópico, será discutido sobre essa temática para entender quais fatores interferem no seu desempenho.

3.7 Propriedades dos concretos permeáveis

As propriedades dos concretos permeáveis são definidas a partir da granulometria dos seus dos agregados, quantidade de cimento, relação água/cimento e volume de vazios (AZEÑEDO *et al.*, 2007). Monteiro (2010) completa que essas propriedades estão relacionadas com a graduação do agregado e isso interfere diretamente na resistência e permeabilidade do material como todo. A seguir estão apresentadas as principais propriedades dos concretos permeáveis.

O estudo da trabalhabilidade dos concretos permeáveis é pouco abordado, sendo a maior preocupação das pesquisas acerca dos parâmetros de resistência e de coeficiente de permeabilidade. A falta de documentos normativos traz questionamentos como: qual o método de ensaio mais adequado para o estudo do estado fresco de concretos permeáveis?

Dos poucos autores que realizaram essa análise pode ser citado Aquino *et al.* (2019), Sandoval *et al.* (2013) e Tennis *et al.* (2003). Esses obtiveram respostas sobre a trabalhabilidade dos concretos permeáveis após ensaio de abatimento. Diferentes desses, Tavares e Kazmierczak (2016) realizaram o ensaio de trabalhabilidade por meio do método de VeBe e perceberam que as amostras com agregado natural obtiveram os melhores resultados, com menor tempo para adensamento. Já as misturas que continham agregados reciclados com presença de fibras de vidros geraram maiores tempos para adensamento, isso devido ao envolvimento entre as fibras e o agregado que dificultou o adensamento da mistura.

A Tabela 3 apresenta a análise geral das pesquisas que realizaram ou não o estudo do estado fresco de concretos permeáveis.

Tabela 3 – Análise da consistência de concretos permeáveis.

Autor	Estudo da consistência	Resultado
		(espalhamento/tempo de adensamento)
Cordian Filho <i>et al.</i> (2022)	Não realizou	-
Batezini <i>et al.</i> (2021)	Não realizou	-
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	Não realizou	-
Bauer <i>et al.</i> (2020)	Realizou o abatimento do tronco de cone e o método de VeBe	0 – 20 mm / 4,31 s
Aquino <i>et al.</i> (2019)	Realizou o abatimento do tronco de cone	0 – 20 mm
Pils <i>et al.</i> (2019)	Não realizou	-
Costa <i>et al.</i> (2019)	Não realizou	-
Faria <i>et al.</i> (2019)	Não realizou	-
Sandoval <i>et al.</i> (2019)	Realizou o abatimento do tronco de cone	0 – 20 mm
Tavares e Kazmierczak (2016)	Realizou o método de VeBe	8,9 s
Batezini e Balbo (2015)	Não realizou	-
Tennis <i>et al.</i> (2003)	Realizou o abatimento do tronco de cone	0 – 20 mm

Fonte: autoria própria (2023).

Sandoval *et al.* (2013) e Tennis *et al.* (2003) afirmam que para garantir o elevado volume de vazios, o abatimento deve variar de zero a vinte milímetros (0 – 20 mm), o que compromete a facilidade e agilidade no momento da sua utilização. Esse fato também foi constatado por Batezini *et al.* (2013) e ACI (2006), que destacam que os concretos permeáveis apresentam uma difícil trabalhabilidade.

Para Tennis *et al.* (2004) os principais ensaios a serem empregados para estudar a consistência dos concretos permeáveis são: controle visual e massa unitária. Visto que, autores como Aquino *et al.* (2019) utilizaram o ensaio do abatimento do tronco de cone

de Abrams e verificaram inconsistências do método, com respostas não conclusivas, pois no momento do ensaio ocorria um desmoronamento da mistura, devido as suas características secas (baixa relação água/cimento).

Desse contexto, percebe-se que o ensaio de VeBe, proposto pelo DNIT 064 (2004), se enquadra como alternativa para medição da trabalhabilidade de concretos secos. Esse correlaciona o tempo de adensamento da mistura com a trabalhabilidade da mesma e é empregado para concretos de pavimentos.

Bauer *et al.* (2020) realizaram uma correlação entre o ensaio de trabalhabilidade realizado pelo método do abatimento e pelo método de VeBe e constataram que para abatimentos entre 130 e 170 mm (concretos convencionais) o tempo de adensamento médio foi de 1,5 s, enquanto que para misturas mais secas, com abatimento entre 0 e 20 mm o tempo de adensamento era em torno de 4,34 s.

A trabalhabilidade dos concretos permeáveis é importante para estudo, pois seus resultados interferem diretamente no índice de vazios, permeabilidade e resistências mecânicas, parâmetros fundamentais para funcionalidade dos mesmos.

Monteiro (2010) destaca que o vazio é a propriedade que a matéria tem de não ser contínua, havendo espaço entre as massas. Segundo a ACI 522 (2010), para uma amostra de concreto ser considerada permeável ela deve ter índice de vazios variando de 15% a 35%. Esses valores são pouco discutidos nas pesquisas e variam em cada trabalho (Tabela 4).

Tabela 4 - Índice de vazios de concretos permeáveis para diferentes autores.

Autores	Índice de vazios
Cordian Filho <i>et al.</i> (2022)	Não analisou
Batezini <i>et al.</i> (2021)	Na ordem de 25%
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	20 – 29%
Aquino <i>et al.</i> (2019)	15 – 25%
Pils <i>et al.</i> (2019)	Não analisou
Costa <i>et al.</i> (2019)	Não analisou
Faria <i>et al.</i> (2019)	Não analisou
Sandoval <i>et al.</i> (2019)	15 – 20%
Tavares e Kazmierczak (2016)	Não analisou

Batezini e Balbo (2015)	Não analisou
Tennis <i>et al.</i> (2003)	Na ordem de 20%

Fonte: autoria própria (2023).

Aquino *et al.* (2019) afirmam que o índice de vazios varia de 15% a 20%. Já Tennis *et al.* (2004) sugerem índices de vazios na ordem de 20 %, para garantir simultaneamente as boas características de resistência e de permeabilidade desse concreto.

O índice de vazios é calculado pela relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (MONTEIRO, 2010). Porém, Martins Filho *et al.* (2020) conseguiram verificar o volume de vazios pelo método do ultrassom e evidenciaram que quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à compressão de uma amostra de concreto permeável.

Sandoval *et al.* (2017) afirmam que em concretos permeáveis a existência de um elevado volume de vazios, pela carência total ou parcial de agregado miúdo na mistura, contribui para que exista uma capacidade de drenagem do concreto, ou seja, o mesmo adquire propriedades de ser permeável. Entretanto, não adianta apenas ter elevado índice de vazios, para que a propriedade de permeabilidade seja relevante.

Schwetz *et al.* (2015) explicam que para a produção do concreto permeável é muito importante que os vazios sejam conectados, caso fundamental para garantir a permeabilidade das águas pluviais. Assim, a permeabilidade neste tipo de concreto pode se configurar de maneiras diferentes para o mesmo índice de vazios e o fator interferente será a graduação e a forma dos agregados, que permitirá ou não a formação de canais no interior da amostra e a energia de adensamento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Apesar desse conhecimento, não existe uma metodologia de dosagem e adensamento que garanta a formação de canais no interior das amostras de concretos permeáveis. Porém, após os testes experimentais foi percebido que o adensamento intenso faz com que a pasta cimentícia preencha os vazios, diminuindo a permeabilidade do mesmo (COSTA *et al.*, 2019).

Modi *et al.* (2018) e Chang *et al.* (2014) propuseram em suas pesquisas uma elaboração 3D dos vazios e suas conexões nos concretos permeáveis e constataram que agregados com dimensões máximas maiores implicavam em mais vazios conectados, isso permitia um maior coeficiente de permeabilidade.

A permeabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do concreto permeável que permite a passagem do fluido (água) por meio de sua matriz (MARTINS

FILHO *et al.*, 2020). Monteiro (2010), acrescenta que essa passagem do fluido pode ser por filtração sob pressão ou por difusão através dos condutos capilares.

Kia *et al.* (2018) designam a permeabilidade como a propriedade mais importante para concretos permeáveis, uma vez que tem a função de escoar águas pluviais e amenizar problemas causados por inundações. A permeabilidade é definida por meio da condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade, esse possui diferentes valores, para concretos permeáveis (Tabela 5).

Tabela 5 - Coeficiente de permeabilidade de concretos permeáveis encontrados em diferentes pesquisas.

Autores	Coeficiente de permeabilidade mm/h
Cordian Filho <i>et al.</i> (2022)	$3,852 \times 10^4$
Batezini <i>et al.</i> (2021)	$4,680 \times 10^3$
Dutra, <i>et al.</i> (2021)	$7,560 \times 10^3 - 1,944 \times 10^4$
Li, <i>et al.</i> (2019)	$3,60 \times 10^3 - 7,20 \times 10^4$
Pils <i>et al.</i> (2019)	$3,348 \times 10^3$
Faria <i>et al.</i> (2019)	$7,77 \times 10^7 - 4,60 \times 10^8$
Sandoval <i>et al.</i> (2017)	$3,60 \times 10^3 - 7,20 \times 10^4$
Batezini e Balbo (2015)	$4,680 \times 10^3$
Lamb (2014)	$7,20 \times 10^3 - 1,94 \times 10^4$
Huang <i>et al.</i> (2009)	$3,60 \times 10^3 - 7,20 \times 10^4$
Bean <i>et al.</i> (2007)	$2,52 \times 10^3 - 2,77 \times 10^4$
Tennis <i>et al.</i> (2004)	$2,52 \times 10^3 - 2,77 \times 10^4$

Fonte: autoria própria (2023).

Segundo a Tabela 5, a taxa mínima dos coeficientes de permeabilidade varia para diferentes autores. Lamb (2014) afirma que essas diferenças estão diretamente relacionadas com a forma dos grãos do agregado graúdo e os componentes utilizados nas misturas, proporcionando variações na formação das redes de canais que interferem na permeabilidade do sistema.

Pereira e Barbosa (2015), afirmam que a existência de um agregado graúdo mais poroso influencia no comportamento das propriedades de permeabilidade do concreto permeável, visto que, teoricamente, daria continuidade aos canais contribuindo assim

para o fluxo do fluido. Entretanto, do ponto de vista mecânico esses possuem resistência mecânica inferior ao dos agregados convencionais.

Desse contexto, Tavares e Kazmierczak (2016) constataram que concretos permeáveis com presença de agregados obtidos por meio da britagem do resíduo da construção civil (RCC) obtiveram ótimas respostas de permeabilidade, os autores justificam esse fato pela porosidade existente nos agregados de RCC.

Sandoval *et al.* (2019) afirmam que outro agregado que contribui para a permeabilidade são os resíduos derivados da escória de alto forno, segundo os autores grãos de 4,8 mm possuem relação com a permeabilidade das misturas.

Batezini e Balbo (2015) variaram a granulometria de agregados naturais em amostras de concretos permeáveis e verificaram que no ensaio de carga variável, onde variou a altura da coluna d'água, e no de carga constante as amostras que tinham grãos com dimensão máxima igual a 9,5 mm; 6,3 mm e 4,75 mm apresentavam melhores desempenhos de permeabilidade.

A permeabilidade do concreto permeável relaciona-se com o índice de vazios e com a resistência mecânica do material. Essa relação, entre os vazios e a resistência, é logarítmica e inversa (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Sabe-se que a aplicação de concretos permeáveis ocorre principalmente na camada de rolamento de pavimentos. Isso faz com que esse material esteja sujeito aos esforços de tração na flexão, compressão uniaxial e diametral, fazendo com que essas sejam as propriedades mecânicas mais estudadas nesse material (OLIVEIRA, 2017). Dessa forma, foi elaborada a Tabela 6 que apresenta as propriedades mecânicas desses concretos realizadas por diferentes autores.

Tabela 6 - Resistências de concretos permeáveis encontrados para diferentes pesquisas.

Autor	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametal (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
Cordian Filho <i>et al.</i> (2022)	15,2 – 27,6	Não analisou	Não analisou
Batezini <i>et al.</i> (2021)	7,51 – 8,68	0,25 – 1,24	2,03 – 2,22
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	7,77 – 11,73	1,49 – 2,33	Não analisou
Schackow <i>et al.</i> (2020)	Não analisou	Não analisou	2,18 - 2,42
Pils <i>et al.</i> (2019)	2,58 – 4,66	0,54 – 2,52	1,70 – 6,35
Faria <i>et al.</i> (2019)	14 - 27	Não analisou	Não analisou
Sandoval <i>et al.</i> (2019)	19 - 31	Não analisou	3 – 4
Tavares e Kazmierczak (2016)	8,98 – 22,11	Não analisou	Não analisou
Alves (2016)	11,61 - 15,33		
Vidal (2014)	7,88	Não analisou	1,63 - 1,78
Batezini (2013)	7,51 - 8,68	Não analisou	Não analisou
Polastre <i>et al.</i> (2006)	3,5 - 28	Não analisou	Não analisou
Tennis <i>et al.</i> (2004)	Não analisou	Não analisou	1 – 3,8

Fonte: autoria própria (2023).

Cardian Filho *et al.* (2022), Batezini *et al.* (2021) e Xu Cai *et al.* (2019) evidenciaram resultados de resistência à compressão inferiores aos encontrados nos concretos convencionais e a principal justificativa é o maior volume de vazios existentes nessas amostras. A ACI 522R-10 (2010) diz que a resistência à compressão para concretos permeáveis deve estar entre 2,8 MPa e 28 Mpa. Entretanto, esses valores mudam conforme o estudo, traço, composição e tipo de material utilizado nas misturas.

Alves (2016), por exemplo, realizou substituições de resíduo da construção e demolição (RCD), nas proporções de 5, 10 e 15% em relação ao agregado natural e obteve

resistências à compressão com valores entre 11,61 e 15,33 MPa, percebendo que a introdução do RCD implicou no decréscimo linear de resistência, entretanto houve um acréscimo no índice de vazios e no coeficiente de permeabilidade quando comparado com a amostra referência. Assim como Alves (2016), Vidal (2014), substituiu 100% dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados de RCD e obteve uma resistência à compressão média de 7,88 MPa.

Holtz (2011) estudou amostras de concreto permeável utilizando agregados convencionais, que obtiveram resistência à compressão uniaxial na faixa de 3,5 a 28 MPa e coeficiente de permeabilidade que variavam de 7200 mm/h até valores superiores a 43200 mm/h (SILVA *et al.*, 2019).

Batezini (2013), além da resistência à compressão, verificou também a variação do módulo de elasticidade e constatou que após variação da granulometria dos agregados foi obtido valores que variaram de 15,52 a 16,49 GPa para resistências que variavam de 7,51 a 8,68 MPa.

Em relação a resistência à tração por compressão diametral, são poucas as pesquisas que abordam essa análise, como exemplo pode ser citado Batezini *et al.* (2021), Martins *et al.* (2020) e Pils *et al.* (2019). Batezini *et al.* (2021) obtiveram valores de resistência à tração por compressão diametral na ordem de 8 MPa, mudando a dimensão máxima do grão do agregado graúdo. Já Pils *et al.* (2019) utilizou fibras de vidro com dimensões de 12 e 24 mm e obtiveram ganho de 470% na resistência em relação a mistura sem fibras de vidro.

Acerca da resistência à tração na flexão Batezini (2013) afirma que assim como nos estudos que envolvem resistências à compressão, a resistência à flexão para concretos permeáveis também resulta em valores inferiores dos encontrados nos concretos convencionais. O autor ainda faz a seguinte análise sobre a resistência à flexão na tração:

A resistência mecânica, principalmente de tração na flexão, e as propriedades elásticas são características importantes para o comportamento estrutural do concreto permeável para uso como revestimento de pavimentos, sendo influenciadas por muitos fatores, com atenção especial ao índice de vazios da mistura. Porém, nas pesquisas disponíveis sobre o assunto é escassa a existência de resultados de ensaios de módulo de elasticidade e de resistência à tração na flexão uma vez que, em função das características irregulares normalmente observadas nos corpos de prova de concreto permeável, torna-se difícil a execução destes tipos de ensaios em laboratório. Dessa maneira, são

mais comuns estudos de desempenho e comportamento referentes a resistência à compressão e às condições de permeabilidade das misturas (BATEZINI, 2013, p. 38).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece que para concretos permeáveis a resistência à tração na flexão mínima deve estar na faixa de 1,0 a 2,0 MPa. Esse baixo valor é justificado pelo elevado volume de vazios. Além disso, dependendo da metodologia adotada e da composição das misturas, as amostras podem apresentar diferentes valores.

Pesquisa como a de Vidal (2014) introduziu 100% de agregado graúdo do resíduo da construção e 100% de agregado graúdo de resíduo da demolição e obteve uma média de resistência à flexão de 1,78 MPa enquanto o seu concreto referência, com agregado natural, obteve 1,63 MPa.

Tennis *et al.* (2004) encontraram valores entre 1 e 3,8 MPa, utilizando agregados naturais com diferentes proporções. Já Schackow *et al.* (2020) utilizaram nas misturas substituições parciais do resíduo da indústria do papel, em relação ao aglomerante, nas proporções de 0%, 5% e 10% e obtiveram resultados de resistência à flexão variando de 2,18 à 2,42 MPa.

Além disso, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), a resistência à tração na flexão rege a resistência mecânica característica utilizada para definir em qual situação pode aplicar o concreto em estudo (Quadro 2).

Quadro 2 - Valores da resistência e espessura mínima do revestimento permeável

Tipos de revestimentos	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de controle (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestre	60,0	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestre	60,0	$\geq 20,0^a$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestre	60,0	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		

Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestre	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	

a) Determinação da resistência à compressão, conforme a ABNT 9781.
b) Determinação da resistência à flexão, conforme a ABNT NBR 15805.
c) Determinação da resistência à tração na flexão, conforme a ABNT NBR 12142.

Fonte: NBR 16416, (ABNT, 2015).

É importante destacar que a utilização dos concretos permeáveis quando aplicados em pavimentos estarão sujeitos a desgastes superficiais, causado pelo atrito existente entre ele e os veículos. Porém, são poucos os autores que fazem essa análise de perda de massa.

A perda de massa por abrasão deve ser analisada para entender o comportamento das placas de concreto permeável submetidas aos esforços que resultam em um desgaste superficial. Todavia, são poucos os estudos que abordam sobre esse assunto. Isso pode ser justificado pela falta de aparatos para desenvolvimento dos ensaios experimentais.

Gaedicke, Marines e Miankodila (2014) realizaram o ensaio de perda de massa por abrasão por dois métodos: ASTM C944 (ASTM, 2012) e ASTM C1747 (ASTM, 2013). Os autores descreveram esse último como um método que apresentava menor variância dos resultados, a maior perda de massa para esses ensaios foi de 7,37 g.

Zaetang *et al.* (2016) fizeram a análise conforme a ASTM C944 (ASTM, 2012) e obtiveram melhores resultados para misturas que possuíam em sua composição 20% de agregado reciclado. Isso foi possível pois a introdução do agregado reciclado favoreceu melhor ligação com a pasta de cimento devido ao aumento da porosidade superficial e rugosidade desses agregados, fato importante em pavimentos permeáveis.

Como já mencionado, são poucas as normas técnicas que tratam sobre concretos permeáveis. No Brasil, por exemplo, a NBR 16416 (ABNT, 2016) trata sobre os requisitos e procedimentos para desenvolvimento de pavimentos permeáveis.

Assim, a Tabela 7 apresenta os limites estabelecidos para as principais propriedades de concretos permeáveis, a partir de uma comparação entre a norma brasileira, NBR 16416 (ABNT, 2016) e a norma norte-americana, ACI 522R-06 (2010).

Tabela 7 - Comparativo das propriedades dos concretos permeáveis entre a NBR 16416 e a ACI 522R-06

Propriedade	NBR 16416	ACI 522 R - 06
Trabalhabilidade	Slump Test entre 0 e 20 mm	Slump Test = 0 mm
Índice de vazios	18 a 36%	15 a 20%
Coeficiente de permeabilidade	$3,600 \times 10^3$ mm/h	$\geq 4,821 \times 10^3$ mm/h
Resistência à compressão uniaxial	Em função da aplicação e da resistência à tração na flexão	2,5 a 28 MPa
Resistência à tração por compressão diametral	$\geq 1,0$ MPa	Não menciona
Resistência à tração na flexão	$\geq 2,0$ MPa	$\geq 2,0$ MPa
Resistência à abrasão	Não menciona	Não menciona

Fonte: autoria própria (2023).

Pela Tabela 7 percebe-se que as variações nos valores limites das propriedades dos concretos permeáveis, propostos pelas normas, são em alguns casos semelhantes, a exemplo da trabalhabilidade, coeficiente de permeabilidade e resistência à tração na flexão e em outros distintos como o índice de vazios e a resistência à compressão uniaxial.

Além do entendimento sobre as propriedades dos concretos permeáveis torna-se necessário compreender como está o desenvolvimento das pesquisas com este tema. Essa abordagem será apresentada no próximo tópico, destacando as pesquisas mais atuais envolvendo concretos permeáveis com uso de resíduos.

3.7 Propriedades de concretos permeáveis contendo resíduos

São poucas as pesquisas atuais que abordam sobre concreto permeável, parte dessas pesquisas tratam da funcionalidade drenante de pavimentos permeáveis, já a outra explora o comportamento do concreto permeável utilizando componentes alternativos e sustentáveis. Nesse tópico serão abordadas pesquisas atuais sobre o concreto permeável, focando no uso de resíduos alternativos.

Jindal e Ransinchung (2022) investigaram as propriedades mecânicas de concretos permeáveis com presença de agregados reciclados e adições minerais de cinzas volantes, de casca de arroz e de bagaço da cana de açúcar. Após análise mecânica concluiu-se que houve aumento de 15 a 25% da resistência à compressão e à flexão das

misturas com adições minerais. Foi verificado um refinamento dos poros, isso fez diminuir a permeabilidade do concreto com essas adições.

Lin *et al.* (2022) estudaram as contribuições mecânicas que a introdução de 10, 20 e 30% de resina UP, compostas de epóxi e poliéster, podem trazer para misturas de concretos permeáveis. Após ensaios de resistência à compressão, à flexão e perda de massa por abrasão foi comprovado que as misturas com 30% tiveram ótimo ganho de resistência mecânica.

Lôbo e Silva (2021) analisaram o comportamento de concretos permeáveis contendo agregado miúdo natural e cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA), a substituição foi justificada pela aproximação granulométrica existente entre o agregado natural e a CBCA. Nesse trabalho as CBCA substituíram a areia em 0, 5, 10, 15 e 20% e após análise da resistência à compressão foi averiguado que a mistura com 20% de substituição atingiu melhores resultados, quando comparado com a mistura referência.

Fernandes (2020) investigou as propriedades mecânicas e permeáveis de concretos permeáveis que possuíam resíduo de Concretos de Pós Reativo (CPR). Foram avaliados oito traços diferentes de concreto permeável e concluiu que a resistência à compressão variou entre 18,21 MPa e 38,19 MPa. Além de apresentar uma elevada permeabilidade, variando de $6,12 \times 10^3$ mm/h até $2,80 \times 10^4$ mm/h, afirmado o potencial que há na aplicação do CPR para a produção de concreto permeável.

Araújo (2019) estudou o comportamento mecânico e drenante de concretos permeáveis quando introduzida a metacaulinita em substituição parcial do cimento. Os ensaios realizados nessa pesquisa foram o de resistência à compressão, à flexão e de permeabilidade. Após testes em misturas foi tomado como referência o traço que obteve resistência à compressão igual a 8 MPa e em seguida foi realizada a substituição de 15% de metacaulinita em relação à massa de cimento. Ao fim, a autora concluiu que houve um aumento de 25% da resistência à compressão, já os valores referentes a resistência à flexão e a taxa de infiltração foram próximos ao da mistura referência.

Aquino *et al.* (2019) realizaram testes em concreto permeável contendo resíduo de caulim (RC) fino. O RC substituiu o agregado graúdo nas proporções de 30% e 50%. Após ensaio de resistência à compressão e de permeabilidade verificou que a mistura com 50% obteve melhor resposta, com aumento da permeabilidade sem comprometer a resistência.

Nesta pesquisa também foi realizado o estudo com a introdução do resíduo de caulim. Entretanto, foram tomadas algumas precauções como: seleção do resíduo de

caulim (parte grossa); testes com outras proporções e ensaios da resistência à compressão diametral, à flexão e à perda de massa por abrasão. A seguir será apresentada as características e propriedades do resíduo de caulim.

3.9 O resíduo de caulim

O resíduo de caulim (RC) é derivado dos rejeitos do beneficiamento da sua matéria principal, o caulim. Segundo Andrade (2019) esse rejeito é obtido após a primeira etapa do tratamento de minérios e não serão úteis para determinada atividade industrial, nem tem valor comercial. Dessa forma, para entender as características e propriedades do RC é necessário estudar sobre o caulim.

Segundo Lima (2006) o caulim pode ser classificado quanto a sua formação geológica em dois tipos, são elas: Caulim residual, constituído na maioria das vezes por quartzo e é formado no próprio local de origem por meio da ação de intempérie e Caulim sedimentar: constituído na maioria das vezes por mica, quartzo e teor de 1 a 2% de dióxido de titânio e sua origem está diretamente relacionada com a ação de transporte, deposição e purificação.

Segundo Rezende (2013), no Brasil, as maiores reservas de caulim se encontram na forma de origem residual, advindos principalmente dos estados do Pará e Amapá, na região Norte do país. Entretanto, o Nordeste detém também parte dessas reservas, que estão presentes na região do Seridó, e abrange os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, sendo proveniente de rochas pegmatíticas. Ele é fruto de alteração dos silicatos de alumínio que passaram por processos de intemperismo (SANTOS *et al.*, 2016).

O Brasil ocupa papel fundamental no mercado de caulim. Segundo dados do Sumário Mineral (DNPM, 2018), no ano de 2015 o país exportou 1,88 milhões de toneladas de bens produzidos através do beneficiamento do caulim. Dentro do panorama nacional, o caulim tem utilização nas indústrias de cimento, cerâmicas brancas e de papel, (ANDRADE, 2019).

A indústria de beneficiamento do caulim produz grande volume de resíduo, que são descartados no meio ambiente sem a presença de uma política ambiental. Nesse aspecto, segundo Castro (2010), cerca de 75% do caulim extraído na região do Seridó é perdido no processo de beneficiamento, o que gera pilhas de rejeitos finos (borra) e grossos (birra) (AZERÊDO, 2012).

Azerêdo (2012) destaca que esses resíduos contêm substâncias químicas como o hexametafosfato e o sulfato de alumínio, oriundos da lavagem do minério bruto, e essas substâncias são responsáveis pela contaminação do solo e mananciais hídricos. Logo, torna-se necessário conhecer suas características físicas, químicas e mineralógicas, apenas assim será possível definir onde e no que o RC pode ser utilizado.

Segundo Patrício (2016), o resíduo de caulinato possui uma superfície caulinata única entre os argilominerais. Por isso apresentam características hidrofílicas em uma estrutura cristalina, responsável por favorecer o processo de adsorção, que implica na possível potencialidade das propriedades de permeabilidade do material.

Lima (2006) afirma que o RC é formado por uma argila que tem a caulinata e/ou haloisita como os principais componentes. Correa (2007) acrescenta que o caulinato é uma rocha de granulometria fina, quimicamente inerte e de cor branca, com capacidade de cobertura quando usado como pigmento.

Quanto ao aspecto mineralógico a caulinata é formada por uma folha octaédrica de gibsita (hidróxido de alumínio) e uma folha tetraédrica de silicato, com ausência de água e cátions entre as camadas estruturais (CORREA, 2007).

No aspecto químico as principais composições presentes no caulinato extraído do Seridó paraibano, após ensaio de Fluorescência de Raio-X, são: dióxido de silício, com 61,66% e o trióxido de alumínio, com 33,66% (AZERÊDO, 2012).

Toda essa abordagem sobre o aspecto microscópico do caulinato serviu de base para entender as propriedades do resíduo e sua influência nas propriedades desses concretos, temática abordado no próximo tópico.

3.10 Utilização do RC em concretos permeáveis

A indústria de beneficiamento do caulinato trata os seus rejeitos como um material que deve ser descartável sem finalidade econômica (ROCHA *et al.*, 2008). Andrade (2019) e Menezes *et al.* (2007) acrescentam que esses rejeitos são incorporados na natureza a céu aberto e em leitos e várzeas de riachos e rios, causando danos à fauna, à flora e à saúde da população. Dessa realidade que é justificada a necessidade de reciclagem do material.

A utilização do RC é um ato sustentável e sua aplicação pode ocorrer de diferentes maneiras, já que o RC é produzido tanto na fração fina como na fração grossa. O RC fino (borra) é oriundo da etapa de purificação do caulinato através de processos de separação a

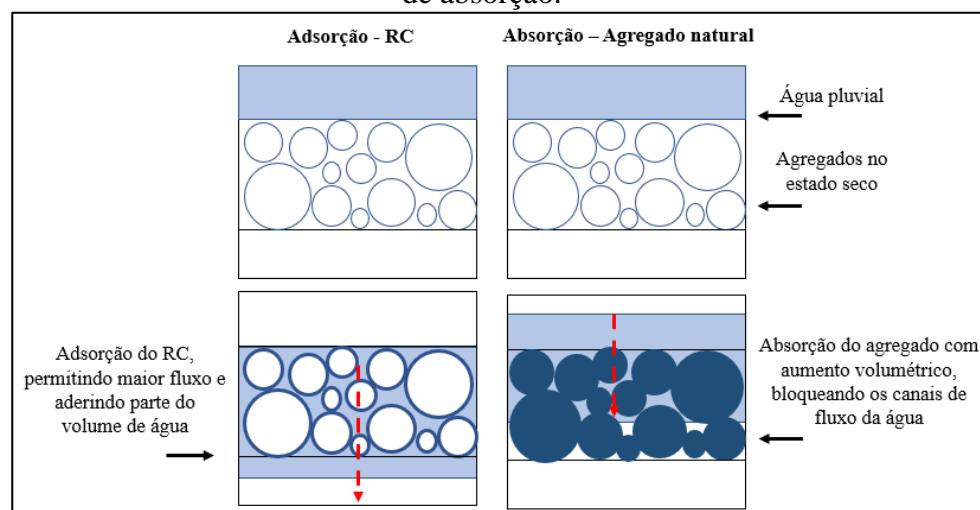
úmido do caulim, já o RC grosso (birra) é constituído basicamente por quartzo. (ANJOS e NEVES, 2011; MENEZES *et al*, 2007; NÓBREGA, 2007).

No ramo da ciência dos materiais, diferentes pesquisas já estudaram sobre a incorporação do resíduo de caulim em misturas de argamassa, concreto e blocos de vedação. Rezende *et al.* (2008) estudaram sobre a introdução do resíduo de caulim fino em concreto auto adensável e Azerêdo (2012) e Nóbrega (2007) analisaram o comportamento de misturas de argamassas com percentuais de RC. Anjos e Neves (2011), Figueiredo (2015) e Rezende *et al.* (2008) analisaram blocos solo-cal e de vedação com incorporação do RC.

Em concretos permeáveis a introdução de agregados de granulometria aberta, e que possuam ótimas propriedades de adsorção são propícios a investigação. Segundo Patrício (2016), o RC tem boas propriedades adsorventes, ou seja, é capaz de acumular o fluido na sua superfície sem ocorrer mudanças do seu volume, ocasionado em situações de absorção.

Dessa forma, teoricamente, o RC ao ser introduzido no concreto permeável adsorverá parte do fluido que passa entre os vazios e auxiliará na permeabilidade do material. A Figura 5 apresenta o esquema da atuação do RC nas misturas de concretos permeáveis.

Figura 5 - Imagem esquemática sobre a adsorção do RC em comparação ao fenômeno de absorção.



Fonte: autoria própria (2023).

Esse cenário coloca o resíduo de caulim como um bom candidato para avaliação das suas contribuições quando substituir o agregado convencional em concretos

permeáveis. Isso já foi comprovado na pesquisa de Aquino *et al.* (2019) que incorporou o RC em misturas de concretos permeáveis e observou que a sua utilização é viável até 50% de substituição em relação ao agregado graúdo, mantendo um grau de coeficiente de permeabilidade e resistência à compressão de 10,8 MPa, satisfatório para utilização de pavimentos permeáveis.

Assim, o intuito desta pesquisa foi compreender as propriedades mecânicas e permeáveis de misturas de concretos que contenham RC, mas dessa vez, a fração grossa (birra), substituindo parcialmente o agregado graúdo, com intuito de se produzir um concreto que possa ser utilizado em pavimento permeável.

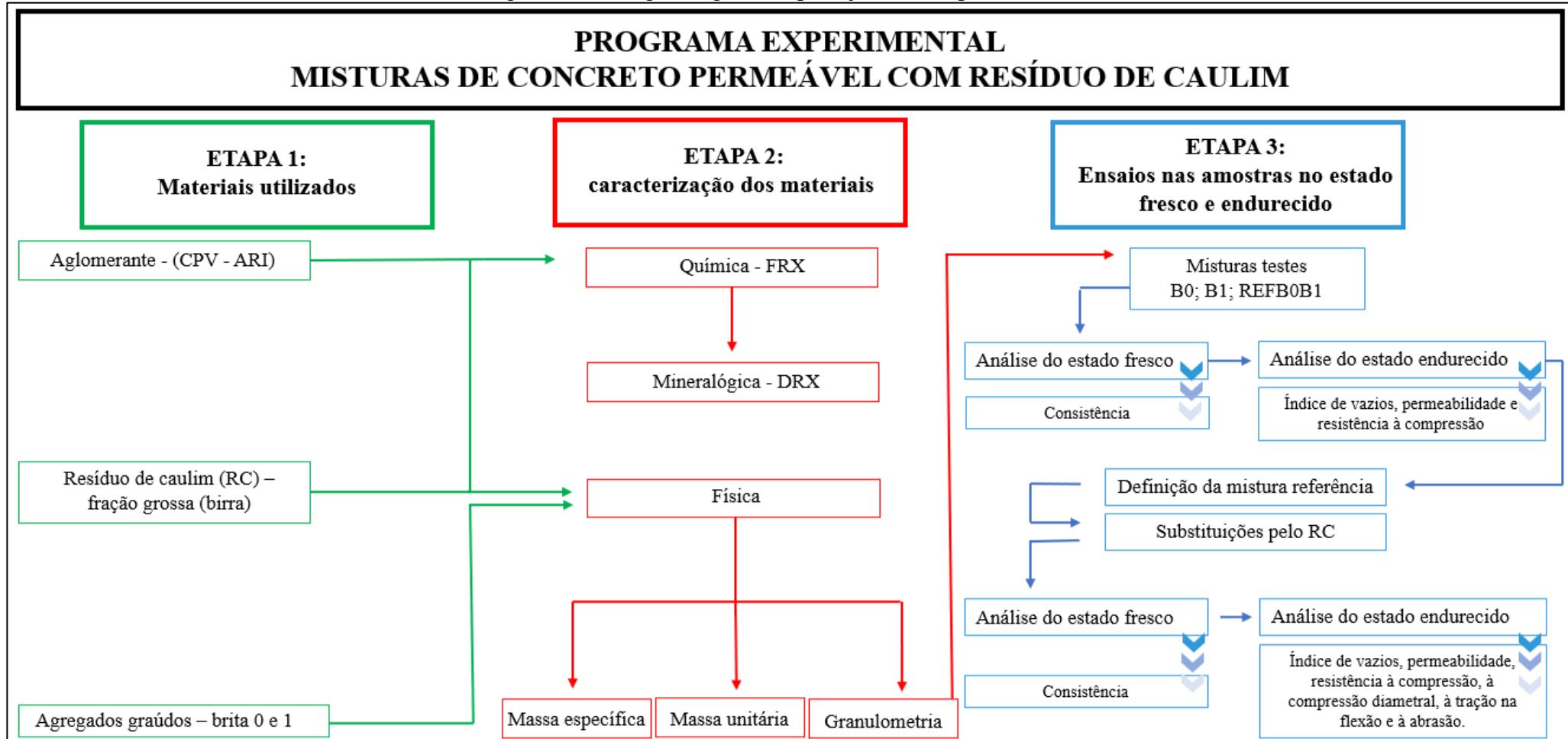
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização do presente estudo foi feito um programa experimental que tinha como objetivo analisar um concreto permeável com substituições do agregado graúdo pelo resíduo de caulim (RC). Esse programa foi elaborado com base no referencial teórico apresentado no Capítulo 3 e no mapeamento bibliométrico detalhado no Apêndice A.

O mapeamento bibliométrico foi desenvolvido com intuito de se obter um panorama geral sobre os estudos, autores, instituições e países que pesquisam sobre concretos permeáveis, assim como os vínculos existentes entre esses. Para isso foi realizada a busca por arquivos na base Scopus, utilizando duas palavras de busca (*Concrete* e *Permeability*), e em seguida foi realizado o tratamento dos dados encontrados nesses arquivos por meio do software VOSviewer.

O programa experimental consistiu de três etapas: materiais utilizados, caracterização dos materiais e ensaios nas misturas de concreto permeável, no estado fresco e endurecido. A Figura 6 apresenta o fluxograma com essas etapas e a seguir estão descritas cada uma delas.

Figura 6 - Fluxograma geral do planejamento experimental.



Fonte: autoria própria (2023).

4.1 Etapa 1: Materiais utilizados

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram: agregados graúdos convencionais, resíduo de caulim (RC) e cimento CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial). O CP V ARI, foi escolhido pois apresenta rápida hidratação inicial e não contém adições pozolânicas, o que permitiu entender o comportamento do resíduo no concreto, esse foi da marca Nacional e obtido no comércio local.

Os agregados graúdos foram adquiridos com duas granulometrias: com diâmetro máximo (Dmáx) igual a 9,5 mm e com Dmáx. igual a 19 mm, ambos conseguidos no comércio de João Pessoa – PB (Figura 7).

Figura 7 - Agregados graúdos: brita 0 e brita 1.



Fonte: autoria própria (2023).

Já o resíduo de caulim (RC) foi coletado conforme a NM 26 (ABNT, 2001), na região do Seridó paraibano, no município de Juazeirinho. O RC foi depositado sem seleção dos grãos, ou seja, a parte grossa conhecida como birra se mistura à parte fina de nome borra.

O intuito da pesquisa foi realizar a substituição do agregado graúdo, sendo necessária a separação dos grãos de RC por meio do peneiramento e assim extrair a fração grossa do RC que foi propícia para a substituição, chamada também de brita de caulim. Essa brita possui granulometria maior que 4,8 mm e estava envolvida por uma camada pulverulenta de RC da fração mais fina.

O Fluxograma da Figura 8 apresenta o processo de extração do RC para pesquisa. Esse processo para larga escala pode ser realizado por meio de parceria existente entre empresas de beneficiamento de resíduos.

Figura 8 - Processo esquemático para obtenção da birra: a) peneiramento da amostra e b) amostra obtida.



Fonte: autoria própria (2023).

4.2 Etapa 2: Caracterização dos materiais

Todos os procedimentos de caracterização foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Os materiais estudados nessa pesquisa foram caracterizados quanto aos aspectos físico, mineralógico e químico de acordo com as especificações apresentadas na Tabela 8, onde estão descritos os ensaios e normas utilizadas.

Tabela 8 - Ensaios de caracterização.

Analise	Ensaio	Norma
Física	Massa específica – Agregados graúdos e RC	NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa específica – Cimento CPV ARI	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Massa Unitária – Agregados graúdos e RC	NBR 16972 (ABNT, 2021)
	Granulometria – Agregados graúdos e RC	NBR 7211 (ABNT, 2022)
Mineralógica	Difratometria de Raios-X (DRX)	-
Química	Fluorescência de Raios-X (FRX)	-
	Perda ao Fogo	NM 18 (ABNT, 2004)

Fonte: autoria própria (2023).

4.2.1 Análise física

Na análise física foram verificadas as massas específicas, massas unitárias e granulometria dos agregados graúdos (brita 0 e brita 1) e do resíduo de caulim, além da massa específica do CP V ARI.

O ensaio da massa específica dos agregados graúdos e do resíduo de caulim foi procedido pela norma NBR 16916 (ABNT, 2021). Já o ensaio de massa unitária foi conduzido pela metodologia da NBR 16972 (ABNT, 2021).

A partir do procedimento da NBR 16916 (ABNT, 2021) foram obtidos os valores da massa específica seca; massa específica do agregado na condição saturado superfície seca; massa específica aparente e absorção para o resíduo de caulim, brita 0 e brita 1, que estão apresentados na Tabela 9.

Já as massas unitárias do resíduo de caulim e da brita 0 e 1 foram obtidas pelo procedimento da NBR 16972 (ABNT, 2021) e os resultados estão expostos na Tabela 9, assim como a massa específica do CP V ARI, que foi fornecida pelo fabricante.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de massa específica dos agregados, RC e cimento e da massa unitária dos agregados e RC.

Ensaios/Materiais	Resíduo de Caulim	Brita 0	Brita 1	CPV ARI
Massa específica	3,35 g/cm ³	2,60 g/cm ³	2,63 g/cm ³	3,00 g/cm ³
Absorção média	3,35 %	3,35 %	3,42 %	-
Massa unitária	1,38 g/ cm ³	1,33 g/ cm ³	1,22 g/ cm ³	-

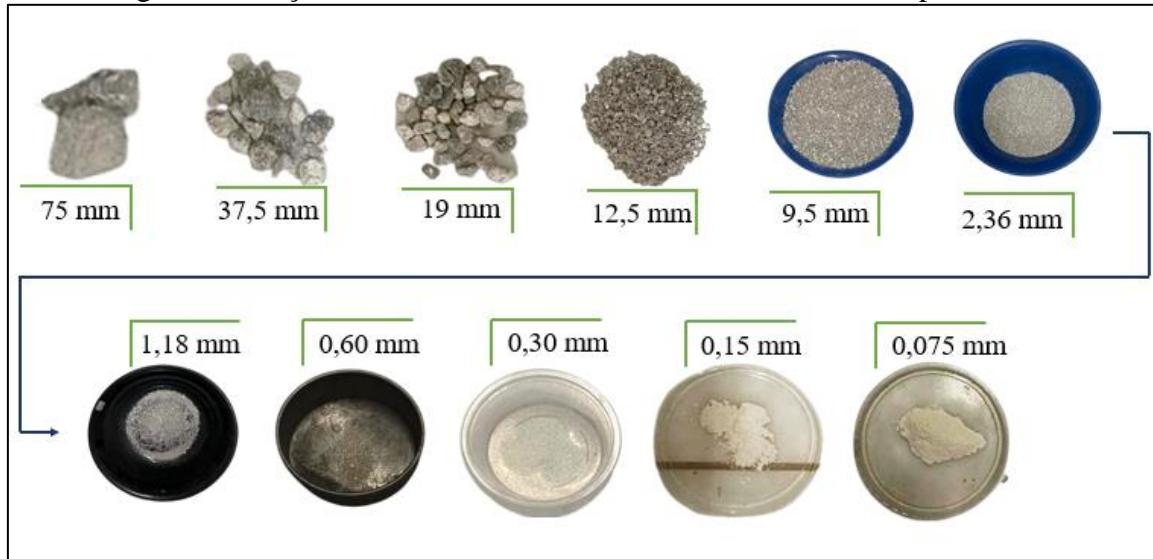
Fonte: autoria própria (2023).

O resultado da massa específica para a amostra do resíduo de caulim foi compatível com os resultados encontrados por Aquino *et al.* (2019). Já para a brita 1 e brita 0 foram próximos aos valores encontrados por Tavares e Kazmierczak (2016) e Pereira e Barbosa (2015). No que se refere à massa unitária conclui-se que os valores encontrados para os agregados e o RC foram semelhantes aos encontrados por Batezini *et al.* (2021) e Aquino *et al.* (2019).

Ao comparar os resultados entre si existe uma aproximação entre a massa unitária do resíduo de caulim (1,38 g/cm³) e da brita 0 (1,33 g/cm³), que pode ser justificada pela semelhança de forma e granulometria entre os materiais. Além disso, é possível concluir que o resíduo de caulim possui maior massa por unidade de volume que a brita 1 e 0.

O ensaio de granulometria seguiu a metodologia da norma NBR 7211 (ABNT, 2022). A Figura 9 apresenta as frações retidas para o resíduo de caulim. Ademais, o mesmo procedimento foi realizado para os agregados graúdos convencionais (brita 0 e brita 1).

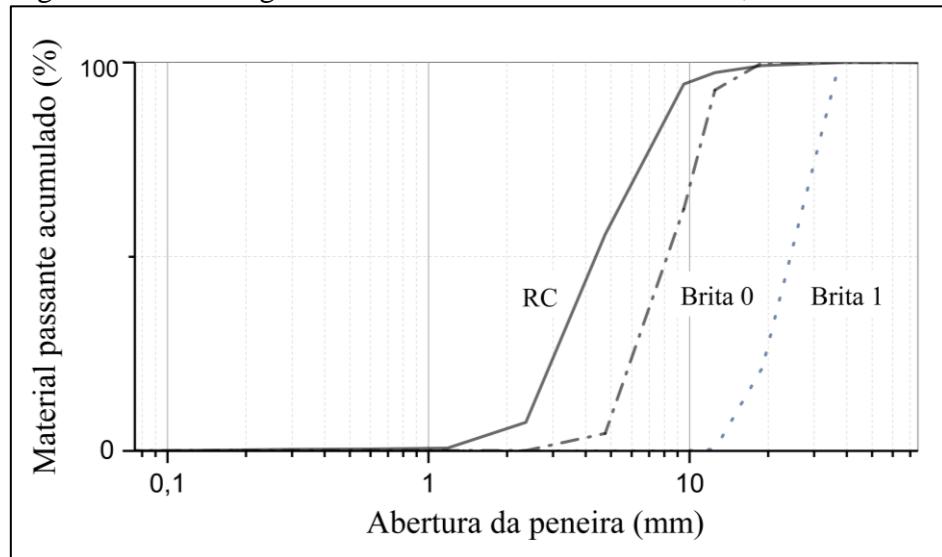
Figura 9 - Frações de resíduo de caulim retidas nas malhas das peneiras.



Fonte: autoria própria (2023).

Após peneiramento no vibrador da marca ProoUTest foi possível montar as curvas granulométricas de cada material que estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Curvas granulométricas do resíduo de caulim, brita 0 e brita 1.



Fonte: autoria própria (2023).

De acordo com as curvas apresentadas na Figura 10 é possível observar que o diâmetro máximo da brita 1 foi de 19 mm, enquanto para a brita 0 foi de 9,5 mm, mesmo valor do diâmetro máximo para o resíduo de caulim.

Os resultados do coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc) são apresentados na Tabela 10, sendo a brita 0 e o resíduo de caulim com resultados parecidos entre si.

Tabela 10 - Coeficientes de uniformidade e de curvatura nas amostras.

Amostra	Cu	Cc
Resíduo de caulim	2,0	0,93
Brita 0	2,08	1,02
Brita 1	1,47	1,14

Fonte: autoria própria (2023).

Após entendimento do comportamento das curvas granulométricas é notório que as características físicas encontradas nas britas estão em consonância com as pesquisas de Candian Filho *et al.* (2021) e as do RC com Aquino *et al.* (2019).

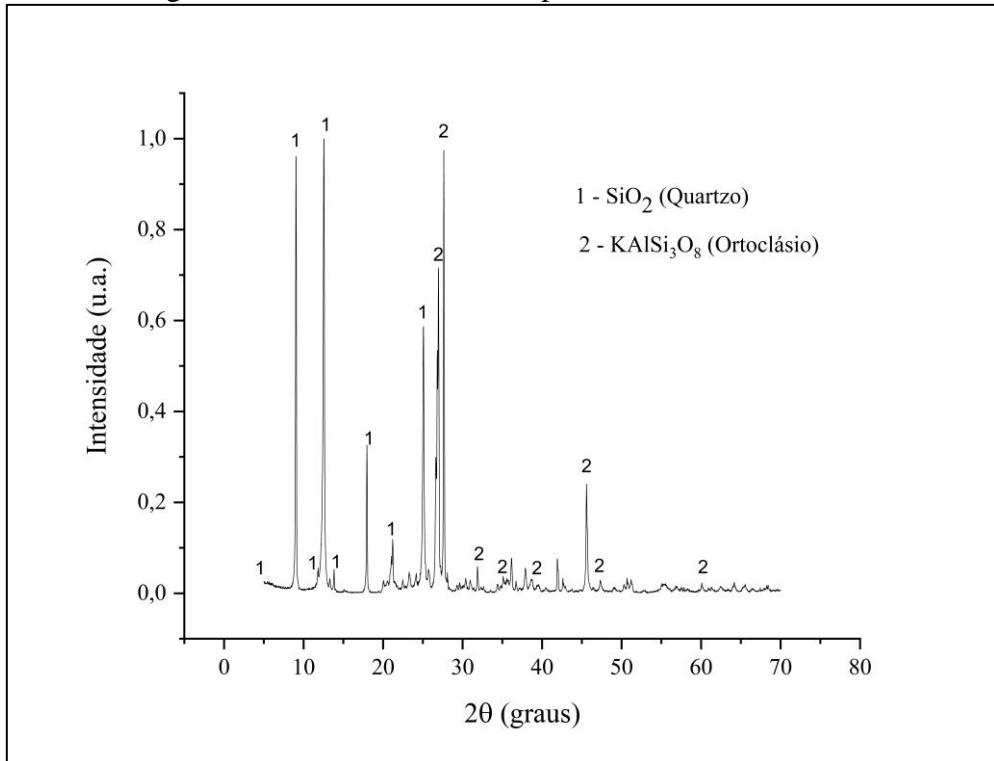
Percebe-se uma aproximação entre os resultados da brita 0 e do RC. Dessa forma, as características granulométricas do RC são equivalentes às características granulométricas da brita 0, tornando justificável a substituição pelo resíduo em relação a parcela de agregado graúdo correspondente a brita 0.

4.2.2 Análise mineralógica

O ensaio de Difração de Raio X (DRX) foi realizado para amostras de resíduo de caulim e para o cimento Portland V ARI. O ensaio de DRX utilizou o difratômetro da marca Siemens, modelo D5000 sob as seguintes condições de ensaio: radiação CuK, tensão de 40 KV, corrente de 30mA, com intervalo de medição para 2θ : 5 a 55° e passo 0,02°/seg.

Foi realizada a coleta do material passante da peneira #200 cuja abertura é de 0,075 mm, o destorramento não ocorreu pois o material já estava na forma de finos, e com essa amostra foi feita a análise mineralógica. A identificação dos picos foi extraída do uso do software X’Pert High Core Plus e os resultados para o RC podem ser vistos na Figura 11.

Figura 11 - Resultado do DRX para o resíduo de caulim.

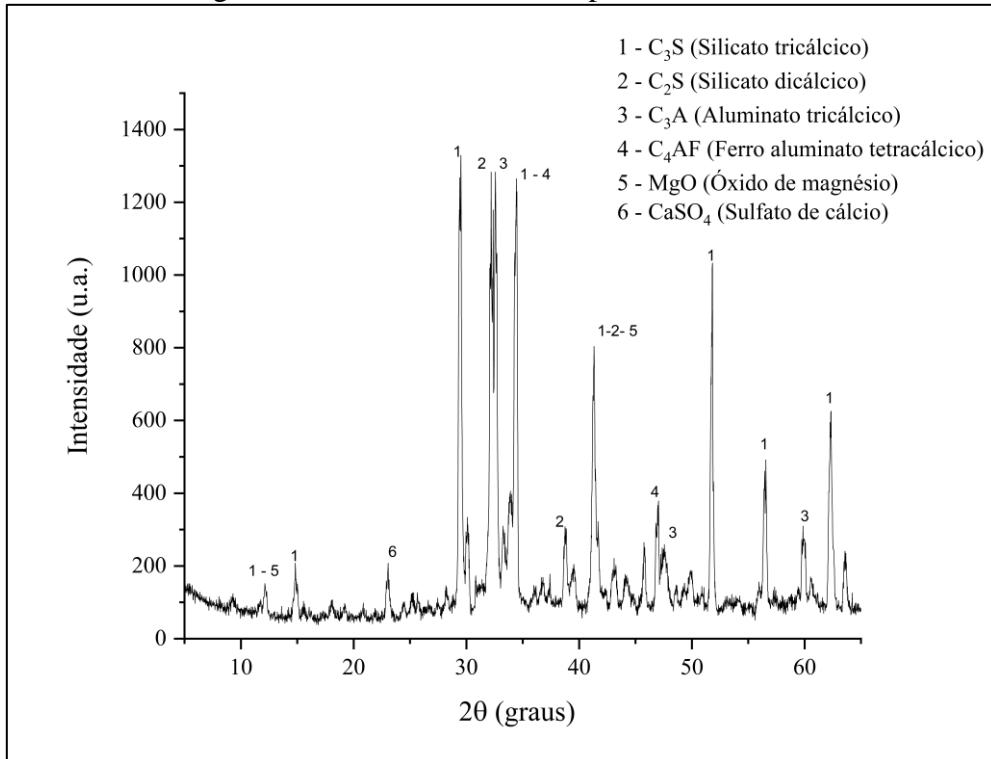


Fonte: autoria própria (2023).

De acordo com o difratograma observa-se a presença de quartzo (SiO_2) e o ortoclásio (KAlSi_3O_8). Os picos de quartzo foram constatados na pesquisa de Azerêdo (2012), cuja coleta do material foi feita na mesma região.

Para o CP V ARI foi utilizado os mesmos procedimentos que o RC, mas não precisou realizar o fracionamento da amostra visto que a mesma já estava com granulometria própria de ensaio, assim o resultado do DRX para o cimento pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Resultado do DRX para o CP V ARI.



Fonte: autoria própria (2023).

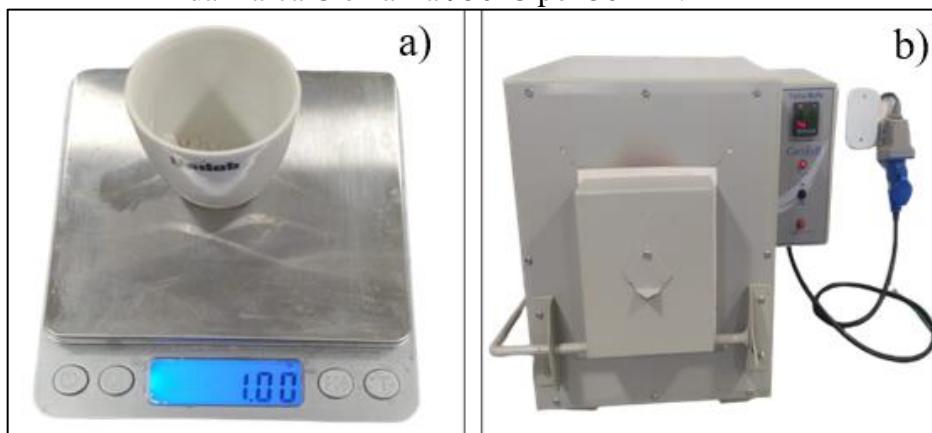
A análise padrão de DRX do CPV ARI identificou picos com maior intensidade referentes ao silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF).

4.2.3 Análise química

A análise da composição química do resíduo de caulim foi feita no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa/UFCG) por meio do ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX), realizado com o equipamento da marca Shimadzu (modelo 720), a partir de uma amostra de resíduo de caulim passante na peneira #200.

Em seguida, foi realizado o ensaio de perda ao fogo do material regida pela NM 18 (ABNT, 2004) para que fosse possível descontar os óxidos presentes nas composições. Esse procedimento também foi aplicado para o CP V ARI e a sequência de imagens da Figura 13 apresenta as etapas desse processo. Os resultados das composições químicas com correções estão apresentados na Tabela 11.

Figura 13 - Ensaio de perda ao fogo: a) pesagem do material; b) queima em forno mufla da marca CienlaB a 950°C por 50 min.



Fonte: autoria própria (2023).

Tabela 11 - Resultado da composição química do RC e CPV ARI.

Material/Composição química	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	MgO	Outros	Perda ao fogo
RC	-	48,84%	38,54%	3,19%	2,08%	-	7,35%	4,97%
CP V ARI	51,77%	18,97%	6,25%	-	5,16%	3,38%	14,47%	8,64%

Fonte: autoria própria (2023).

Após os procedimentos descritos foi obtida perda ao fogo para o RC de 4,97% e de 8,64% para o CP V ARI da massa encontrada no FRX. Pela Tabela 11 pode ser constatado que o resíduo de caulin é constituído principalmente por dióxido de silício (SiO_2) e trióxido de alumina (Al_2O_3), esses são responsáveis por mais de 80% da composição do RC. Ademais, esses resultados estão em consonância aos obtidos por Patrício (2016) e Azerêdo (2012).

Pela Tabela 11 percebe-se também que o CP V ARI é constituído principalmente por óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO_2), responsáveis por 70,74% da composição do cimento, esses foram compatíveis aos obtidos por Alexandre e Luz (2020).

A NBR 16697 (ABNT, 2018) apresenta limites para perda ao fogo, SO_3 e MgO do CP V ARI, foi percebido que o resultado referente a perda ao fogo se mostrou superior a esse limite (Tabela 12).

Tabela 12 - Comparativo entre os valores encontrados nos ensaios e os estabelecidos pela NBR 16697 (2018) para o FRX do CP V ARI.

Resultado da amostra	Limite correspondente a NBR 16697 (ABNT, 2018)		
	Perda ao fogo	SO₃	MgO
8,64%	5,16%	3,38%	≤ 6,5%

Fonte: autoria própria (2023).

4.3 Etapa 3: ensaios nas amostras nos estados fresco e endurecido

As misturas de concreto permeável com e sem substituição pelo resíduo de caulim foram avaliadas nos estados fresco e endurecido conforme as normas vigentes apresentadas na Tabela 13. Após os ensaios de permeabilidade e resistências foi realizada uma análise de variância utilizando o programa Minitab 19 para verificar a significância das misturas nos resultados.

Tabela 13 - Análise das misturas no estado fresco e endurecido.

Análise	Ensaio	Norma
Estado fresco	Trabalhabilidade de VeBe	DNIT 064 (ABNT, 2004)
	Trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone	NBR NM 67 (ABNT, 1998)
	Índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005)
	Permeabilidade	522R (ACI, 2010)
	Resistência à compressão uniaxial	NBR 5739 (ABNT, 2018)
	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2010)
Estado endurecido	Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Resistência à abrasão	DIN 53516 (2004)

Fonte: autoria própria (2023).

Para a realização deste estudo, foi realizado primeiros testes para definir a mistura de concreto a ser utilizada para análise. Isso e as descrições dos procedimentos experimentais estão apresentados nos próximos itens.

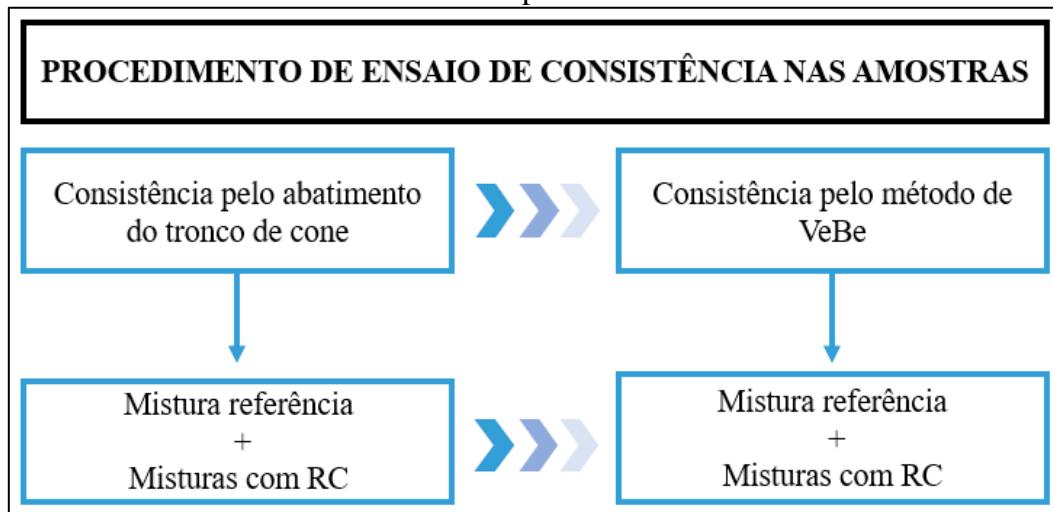
4.3.2 Ensaios no estado fresco

Para a preparação das amostras se utilizou uma betoneira onde se prosseguiu com o seguinte procedimento de mistura sugerido por Alves (2016), Vidal (2011) e Batezini (2013):

- a) Adição de todo agregado graúdo e RC;
- b) Misturar por 1 minuto para homogeneização;
- c) Adição do cimento mais 50% da água;
- d) Mistura por 1 minuto;
- e) Adição dos 50% de água restante, com controle visual;
- f) Mistura por 1 minuto;
- g) Conferência visual do concreto permeável.

No estado fresco as amostras de concreto permeável passaram por dois ensaios de trabalhabilidade pelo fato de não existir um procedimento normativo estabelecido para concretos permeáveis. Na Figura 14 é apresentado uma representação esquemática desses ensaios.

Figura 14 - Fluxograma esquemático dos ensaios de trabalhabilidade nas misturas de concreto permeável.

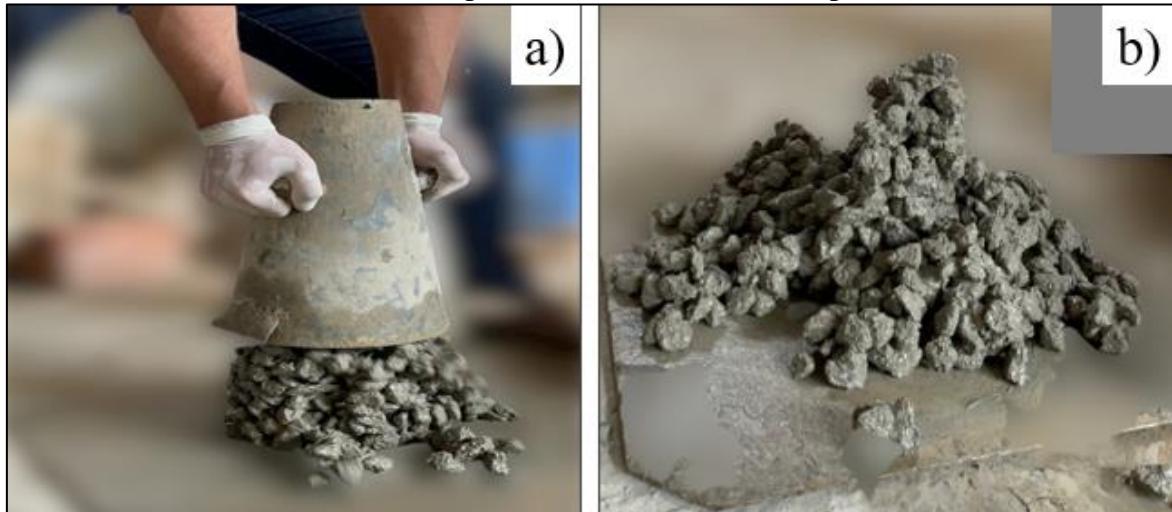


Fonte: autoria própria (2023).

Inicialmente foi realizada a trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone proposto por Faria *et al.* (2019) e regido pela NM 67 (ABNT, 1998), entretanto o concreto

em estudo tinha baixo fator água/cimento (0,30) e ausência de agregado miúdo o que acarretava em um desmoronamento do tronco antes de serem obtidas as medidas (Figura 15).

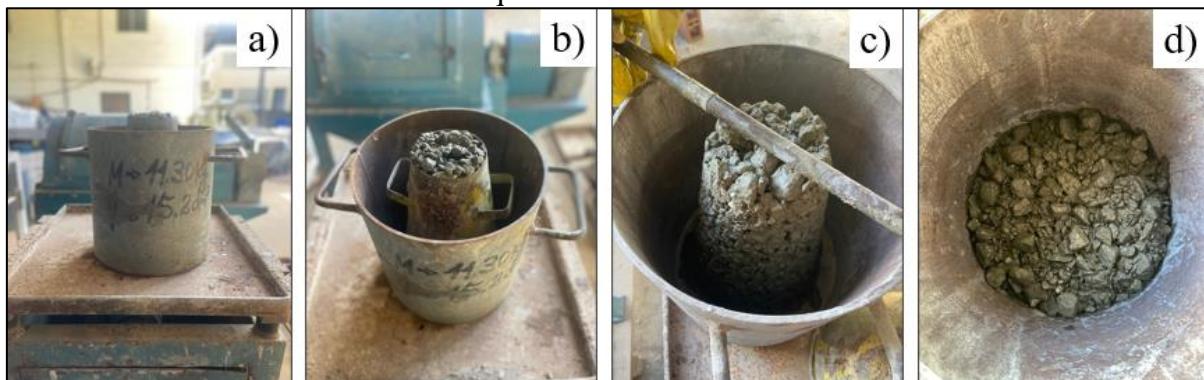
Figura 15 - a) Ensaio de trabalhabilidade realizado pelo abatimento do tronco de cone;
b) desmoronamento do concreto permeável da mistura teste após retirada do cone.



Fonte: autoria própria (2023).

Visto isso, optou-se por realizar o ensaio de trabalhabilidade de VeBe - DNIT 064 (ABNT, 2004) - esse é aplicado em concretos utilizados em pavimentos, com aparência seca e segregada. O ensaio consiste em medir o tempo do adensamento de uma amostra obtida por meio do abatimento do tronco de cone. A Figura 16 expõe o passo a passo metodológico do ensaio de VeBe.

Figura 16 - Ensaio de trabalhabilidade por VeBe: a) e b) cilindro e cone de Abrams com material para ensaio em mesa vibratória, c) retirada do cone de Abrams e d) nivelamento do material após vibração da mesa de trabalhabilidade da marca Pavitest com frequência de 1000 Hz.

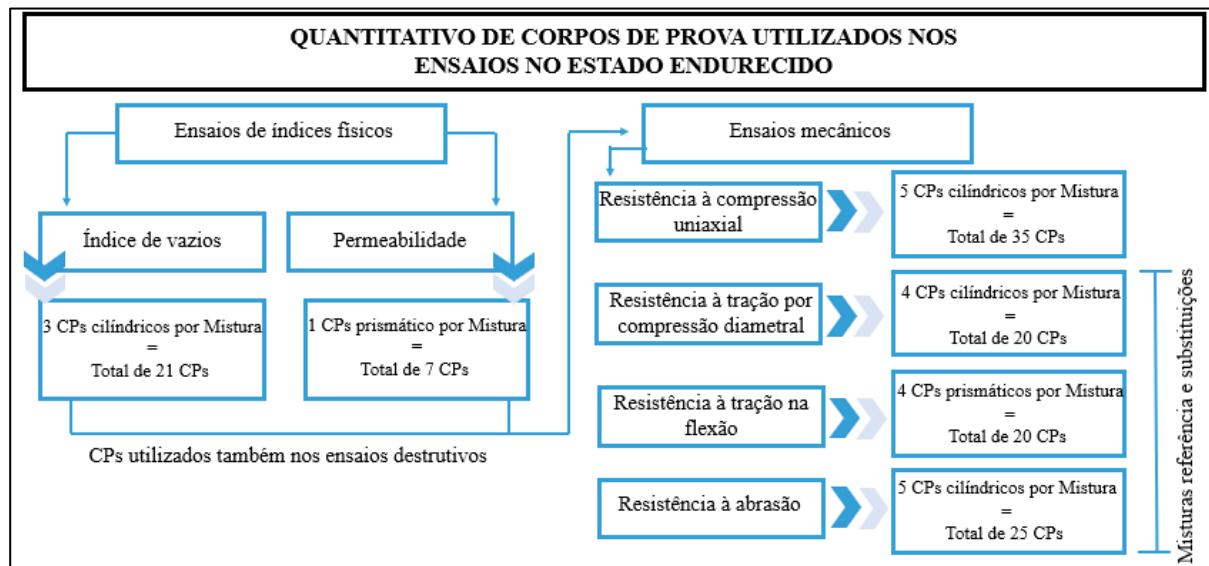


Fonte: autoria própria (2023).

4.3.2 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido, os ensaios foram divididos em duas categorias: ensaios de índices físicos e mecânicos. A Figura 17 apresenta como foi procedida essa divisão, assim como a sucessão dos ensaios e a quantidade dos corpos de prova.

Figura 17 - Fluxograma esquemático dos ensaios no estado endurecido: ensaios de índices físicos e mecânicos*.

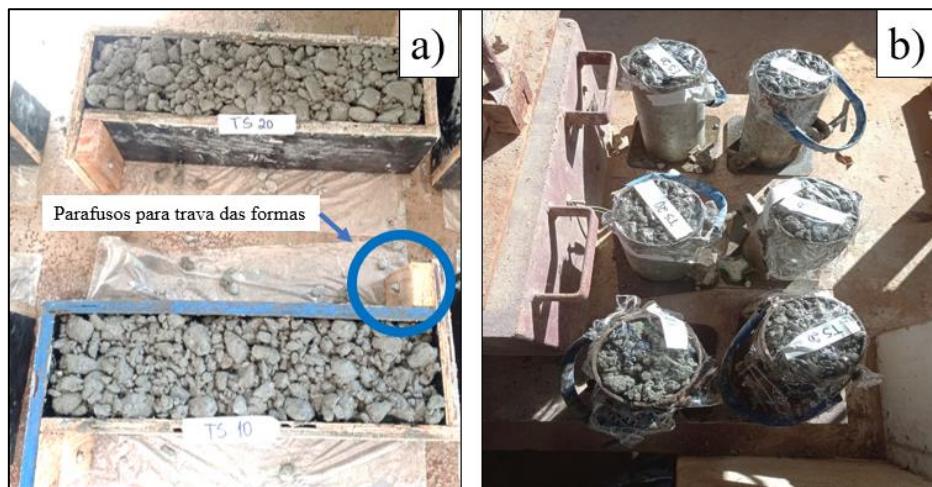


* Total de corpos de prova (CPs) cilíndricos igual a 80 e CPs prismáticos igual a 20.

Fonte: autoria própria (2023).

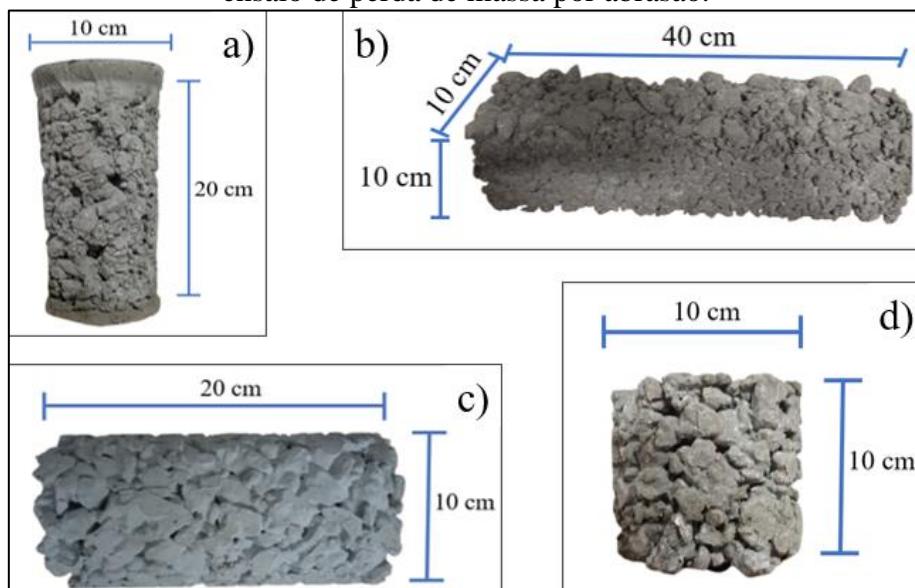
As misturas foram moldadas conforme a NBR 5738 (2021) em moldes cilíndricos do tipo 10x20cm e também em formatos prismáticos de 10x10x40cm. Após 24 horas da moldagem os corpos de prova (CPs) foram desmoldados e em seguida submetidos à cura úmida (colocados em tanques com água) até a idade de 28 dias. A Figura 18 apresenta os moldes utilizados, já a Figura 19 os CPs após cura úmida por 28 dias.

Figura 18 - a) Formas utilizadas para moldagem dos CPs utilizados nos ensaios de permeabilidade e tração na flexão e b) Molde cilíndrico para moldagem dos CPs utilizados nos ensaios de índice de vazios, compressão uniaxial, compressão por tração diametral.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 19 - Dimensões dos corpos de prova: a) CP para o ensaio de resistência à compressão uniaxial com capeamento nas duas superfícies para que a rugosidade do material não interferisse nos resultados de resistência; b) CP para o ensaio de tração na flexão; c) CP cilíndrico para o ensaio de tração por compressão diametral e d) CP para o ensaio de perda de massa por abrasão.



Fonte: autoria própria (2023).

Após o período de cura úmida procedeu-se os ensaios de índices físicos e mecânicos, descritos a seguir.

O ensaio de índice de vazios foi conduzido pela NBR 9778 (ABNT, 2005), sendo realizado em três amostras de cada mistura, para obtenção da média dos resultados. Essas amostras foram pesadas nas seguintes condições: saturadas por 24 horas; saturadas com

superfície seca ao vento e secas em estufa a 100 +/- 5 °C. A balança utilizada foi da marca BEL com 0,01g de precisão, já a estufa foi da marca DeLeo – Equipamentos laboratoriais.

Quanto ao ensaio de coeficiente de permeabilidade, foi realizado em amostras no seu estado seco ao vento e no estado saturado por 24 horas. O intuito de realizar o estudo na amostra saturada foi compreender o funcionamento do concreto permeável depois de grandes incidências pluviométricas. A análise da permeabilidade foi conduzida pela NBR 16416 (2015), por meio do cálculo do coeficiente de permeabilidade com carga constante, ou seja, sem mudança na altura da coluna d'água.

O coeficiente de permeabilidade foi calculado conforme a Equação 1, onde C é uma constante, m é a massa do fluido infiltrante (Kg), d é o diâmetro interno do cilindro (mm) e t é o tempo de percolação (s) (FARIA *et al.*, 2018). Essa equação calcula a velocidade que a água passa nos vazios do concreto permeável.

$$K = \frac{C \cdot m}{d^2 \cdot t} \quad (1)$$

A sequência de imagens da Figura 24 demonstra os procedimentos de ensaio do coeficiente de permeabilidade, que utilizou um tubo de PVC com diâmetro de 75 mm, totalmente vedado na base com silicone e marcado na altura de 5 cm, para controle da coluna d'água. Para o ensaio foram utilizados dois litros de água.

Figura 20 - Ensaio do coeficiente de permeabilidade: a) Marca para controle da altura da coluna d'água; b) Escoamento da água e c) Silicone aplicado na interface concreto/tubo de PVC para não ocorrer vazamento e perda de massa de fluído.



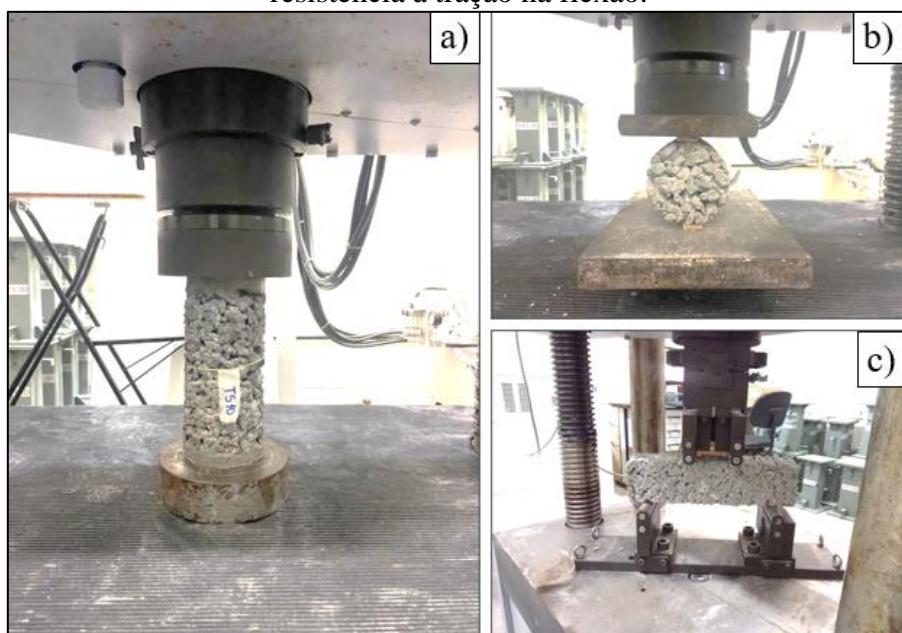
Fonte: autoria própria (2023).

Após realização dos ensaios físicos procedeu a realização dos ensaios mecânicos. A prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão uniaxial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão foi da marca UH – F1000KNI e o programa utilizado para montagem do método do ensaio foi o TRAPEZIUM2 – Shimadzu. Esse

realizava leituras programadas a cada 0,05 segundos de ensaio, e ao fim retornava os valores da força máxima de ruptura, resistência máxima e deslocamento máximo.

Para prosseguir com os ensaios foi necessário o tratamento dos corpos de prova cilíndricos (CPs) fazendo uma regularização em suas faces transversais para o ensaio de compressão. Cada face passou por um processo de capeamento feito com pasta de cimento. Já no ensaio de compressão diametral, foram colocados em suas superfícies longitudinal pequenas bases, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2010). Para o ensaio de tração na flexão foi estabelecido apoios que marcavam o terço médio do corpo de prova, seguindo a NBR 12142 (ABNT, 2010). Na Figura 21 estão ilustrados esses procedimentos de ensaio.

Figura 21 - Ensaios de resistência mecânica: a) ensaio de resistência à compressão uniaxial; b) ensaio de resistência à compressão por tração diametral e c) ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: autoria própria (2023).

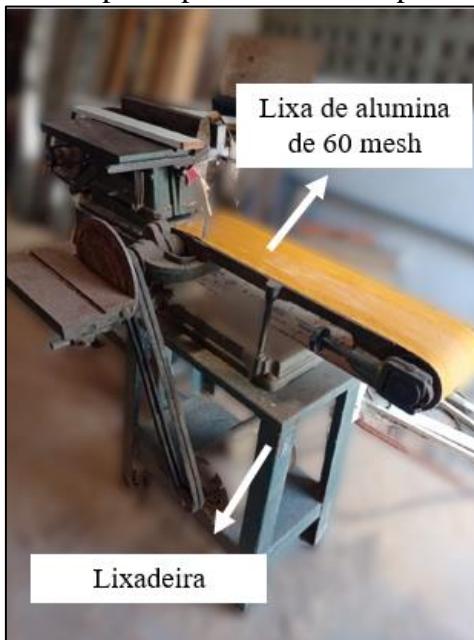
O ensaio de resistência à abrasão foi adaptado da norma alemã DIN 53516 (2004), visto que no laboratório da pesquisa não existia os aparelhos necessários para a realização da avaliação desta propriedade.

O objetivo do ensaio foi medir a perda de massa do material após expor material à abrasão. Para isso, foi necessário ensaiar várias amostras, nesta pesquisa foram ensaiados 5 corpos de prova para cada traço estudado.

O ensaio consiste em fixar o corpo de prova no porta-amostra da máquina, e em seguida fazer com que o cilindro envolto por uma lixa de alumina de 60 mesh de granulometria gire a uma velocidade constante de 40 rpm, até que essa percorra a distância de 40 m em volta do corpo de prova.

Dessa forma, baseado na DIN 53516 (2004) foi utilizada uma lixadeira da marca Pavitest que tinha rotação próxima a 40 rpm e utilizada a fita de lixa de alumina de grão 60. A Figura 22 mostra o maquinário adaptado.

Figura 22 - Equipamento adaptado para o ensaio de perda de massa por abrasão.

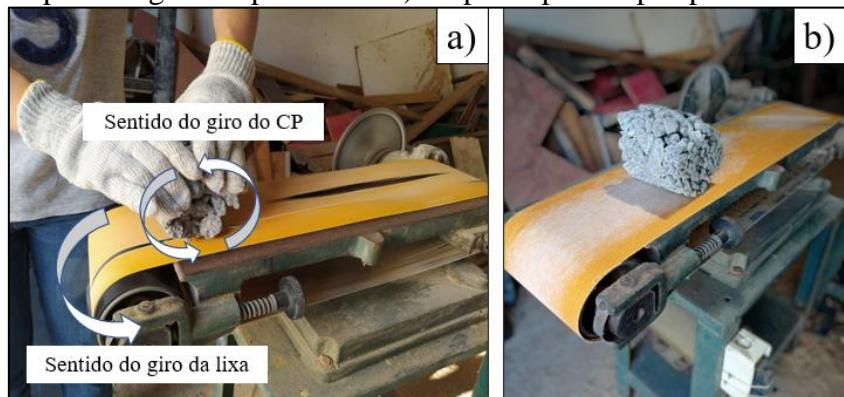


Fonte: autoria própria (2023).

É determinado pela DIN 53516 (2004) que o corpo de prova tenha 150 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento, entretanto, como a execução aconteceu de forma manual, optou-se por fazer CPs com as dimensões iguais a 10cm de diâmetro e 5cm de altura (Figura 23).

Além disso, o ensaio prescreve que o CP deve ser submetido a abrasão numa distância equivalente a 40 m, para cumprir determinada distância foi realizado o cálculo do número de voltas que o CP deveria fazer sobre a lixa em giro. A Figura 23 demonstra o procedimento do ensaio de perda de massa por abrasão.

Figura 23 - Adaptação do ensaio de perda de massa por abrasão: a) nauseio do corpo de prova para desgaste superficial e b) corpo de prova após perda de massa.



Fonte: autoria própria (2023).

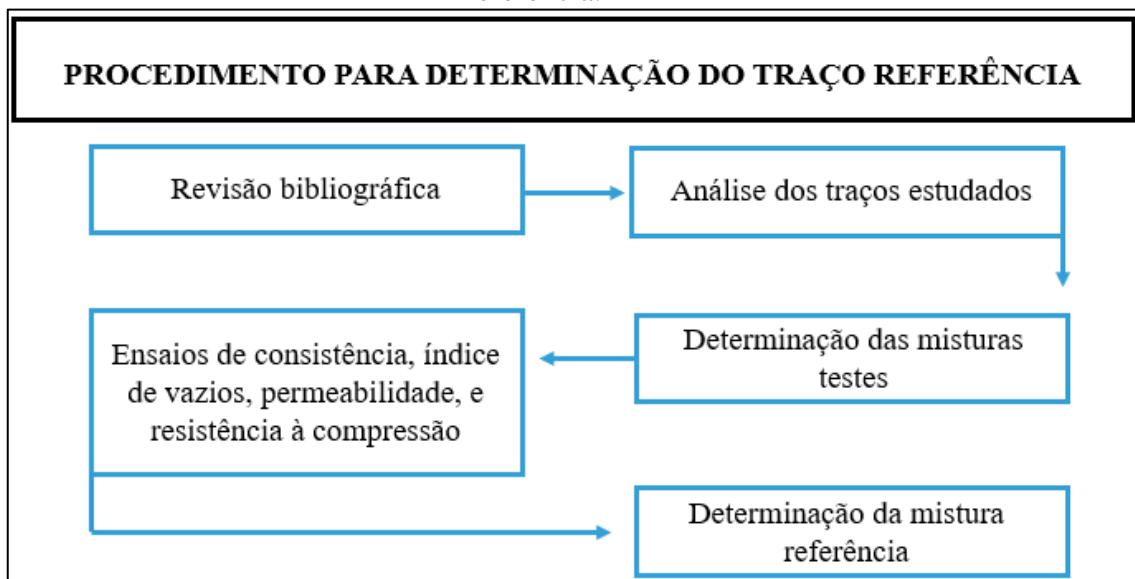
Inicialmente os corpos de prova foram pesados para ser obtido os valores de massa antes do desgaste abrasivo. Em sequência, os corpos de provas foram rotacionados manualmente sobre uma fita de lixa que estava em sentido de giro (Figura 23 a), o número de rotações dos corpos de prova foi calculado a partir do comprimento da sua circunferência. Durante o procedimento teve-se a precaução de manter uniforme a distância entre o corpo de prova e a lixa, para o desgaste à abrasão ser uniforme durante todo ensaio. Após ensaio os corpos de prova eram pesados para ser obtida a massa após o desgaste. Para a determinação da perda de massa das amostras foram executadas as seguintes medições:

- Pesagem do corpo de prova antes do desgaste;
- Desgaste abrasivo;
- Pesagem do corpo de prova depois do desgaste.

4.3.3 Determinação da mistura referência

Para determinar a mistura referência foram realizadas as análises experimentais de três misturas testes, submetidas aos ensaios no estado fresco (trabalhabilidade) e no estado endurecido (índice de vazios, permeabilidade e resistência à compressão). A Figura 24 demonstra um esquema de como se procedeu essa metodologia.

Figura 24 - Fluxograma da metodologia utilizada para determinação da mistura referência.



Fonte: autoria própria (2023).

As misturas testes foram definidas a partir da revisão bibliográfica considerando traços mais utilizados em concretos permeáveis (Tabela 2 – Capítulo 2). A partir dos traços encontrados, definiu-se a proporção 1:4:0,3 (aglomerante CPV – ARI: agregado graúdo: relação água/cimento). O agregado graúdo presente nos trabalhos da Tabela 2 possuía diferentes granulometrias, portanto as misturas testes variaram a dimensão desses agregados com o componente de agregado graúdo variando conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Porcentagens de agregados graúdos nos traços pilotos.

Misturas testes	Brita 0 (%)	Brita 1 (%)
B1	0%	100%
B0	100%	0%
RefB0B1	50%	50%

Fonte: autoria própria (2023).

Na Figura 25 estão apresentadas as imagens referentes às três misturas testes.

Figura 25 – Misturas testes no estado fresco: a) B1 (brita 1); b) B0 (brita 0) e c) RefB0B1 (brita 0 e brita 1).



Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados desses ensaios estão expostos na Tabela 16 e em seguida estão apresentadas as respectivas discussões.

Tabela 15- Resultados dos ensaios nas misturas testes.

Ensaios/ Misturas	B0	B1	RefB0B1
Trabalhabilidade -VeBe (s)	55,41	40,21	38,20
Índice de vazios (%)	15	16	15
Coeficiente de permeabilidade (mm/h)	$1,022 \times 10^5$	$3,833 \times 10^4$	$5,662 \times 10^4$
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	7,59	8,09	10,43

Fonte: autoria própria (2023).

O ensaio de trabalhabilidade também foi realizado pelo abatimento do tronco do cone, regido pela NBR NM 67 (ABNT,1998), porém os resultados foram inconclusivos, isso devido ao desmoronamento que existiu nas amostras no momento do ensaio, dessa forma só obteve resultados a partir do ensaio de trabalhabilidade pelo método de VeBe.

O melhor desempenho pode ser dado a mistura RefB0B1, pois ela adensou em menor tempo de ensaio (38,2 s), ou seja, possui melhor trabalhabilidade ao ser comparada com as outras amostras em teste, isso pode ser justificado pela composição granulométrica do agregado, que utilizou brita 0 e brita 1.

Os índices de vazios encontrados para as misturas testes B0, B1 e RefB0B1 foram compatíveis com o estudo de Pereira e Barbosa (2015). É possível identificar que o índice de vazios não obteve grande diferença entre as amostras, sendo de 15% para misturas B1 e RefB0B1 e de 16% para a mistura B0.

É intuitivo que o maior índice de vazios fosse referente a mistura B1, pois apresenta agregado graúdo com maior dimensão máxima (PILS *et al.*, 2019). Entretanto, o maior índice ocorreu para a mistura B0, isso pode ter sido em função de uma energia de compactação, usando haste de adensamento, menor no momento da moldagem em relação as outras misturas, que gerou mais vazios.

Pela Tabela 16 foi possível constatar que a mistura B1 permitiu a formação de mais canais e daí pode se justificar o maior coeficiente de permeabilidade quando comparado com as outras misturas. Diferente do que ocorreu nas misturas B0 e RefB0B1, que continham agregados com duas granulometrias, isso acarretou em um maior envolvimento entre os grãos, causando maior compacidade e resultando em uma menor permeabilidade (MONTEIRO, 2010).

É necessário ressaltar que se esperava maior compacidade e menor permeabilidade para a mistura RefB0B1, mas isso não ocorreu e pode ser justificado pela diferença de energia de compactação durante a moldagem dos CPs. Além disso, todas misturas testes apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade superiores ao determinado por Bean *et al.* (2007) e Tennis *et al.* (2004).

Conforme os resultados encontrados de resistência, a mistura teste que obteve melhor resposta foi a RefB0B1. Essa apresentou um aumento na resistência máxima de 27,2% em relação a B1 e de 22,4% em relação a B0. A resistência obtida pela RefB0B1 foi de 10,43 MPa valor que segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) pode ser aplicado em concretos permeáveis utilizados em calçadas e vias urbanas.

O principal fator responsável por esses resultados foi o empacotamento existente nas amostras, visto que a mistura RefB0B1 continha agregados graúdos com duas granulometrias (bruta 1 e bruta 0), sendo melhor o envolvimento entre os componentes. Além disso, o coeficiente de permeabilidade da mistura RefB0B1 foi maior que o limite mínimo sugerido por diferentes autores mencionados na Tabela 5 e pelas normas ACI 522R (2010) e NBR 16416 (2015). Logo, a RefB0B1 foi escolhida como a mistura referência da pesquisa, com a proporção de 1:2:2:0,3 (CP V ARI: bruta 0: bruta 1: a/c).

Após determinação da mistura referência, foi realizado nessa amostra os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e perda de massa por abrasão. A partir disso, foi possível realizar o estudo sobre as misturas com substituições parciais do agregado graúdo (bruta 0) pelo RC em 10, 20, 30 e 40%, em massa. Essas passaram por ensaios no estado fresco e endurecido e seus resultados foram

analisados estatisticamente, o procedimento metodológico da análise estatística está apresentado no próximo item.

Os nomes das amostras e suas respectivas composições de agregados, que serão utilizados ao decorrer desse trabalho, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Nomes e composições das misturas.

Amostra/componentes	brita 0 (%)	brita 1 (%)	resíduo de caulim (%)
B1	0	100	0
B0	100	0	0
RefB0B1	50	50	0
RC10	40	50	10
RC20	30	50	20
RC30	20	50	30
RC40	10	50	40

Fonte: autoria própria (2023).

4.3.4 Análise estatística

Os resultados de coeficiente de permeabilidade e resistências, obtidos a partir dos ensaios no estado endurecido das misturas de concreto permeável foram submetidos ao tratamento estatístico por análise de variância (ANOVA). Esse método consiste em comparar três ou mais tratamentos e verificar se as variáveis respostas, medidas para diferentes níveis, se diferem entre si do ponto de vista estatístico. Além disso, é possível comparar diferentes grupos por meio da análise de variáveis contínuas (AZERÊDO, 2012).

A ANOVA desta pesquisa foi realizada com auxílio do software Minitab 19 (Apêndice B) e os resultados de média e desvio padrão foram obtidos pelo programa Excel. A análise estatística consistiu em comparar a variância das médias em um grupo de resultados e o principal fator analisado foi o Valor-p, para esse fator foi realizada as seguintes verificações:

- 1- Valor-p > 0,05: não é estatisticamente significativo, pois o nível de significância será maior que 5%, obtendo uma confiabilidade do resultado menor que 95%. Dessa forma não é possível afirmar que existe uma relação entre a variável e a resposta;

2- Valor- $p \leq 0,05$: é estatisticamente significativo, pois o nível de significância será menor ou igual a 5%, obtendo uma confiabilidade do resultado maior ou igual a 95%. Dessa forma é possível afirmar que existe uma relação entre a variável e a resposta.

Nesta pesquisa foi realizada a análise linear, verificando a relação das porcentagens de RC (Fator 1: 10%, 20%, 30% e 40%) com os resultados de coeficiente de permeabilidade, resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e perda de massa por abrasão.

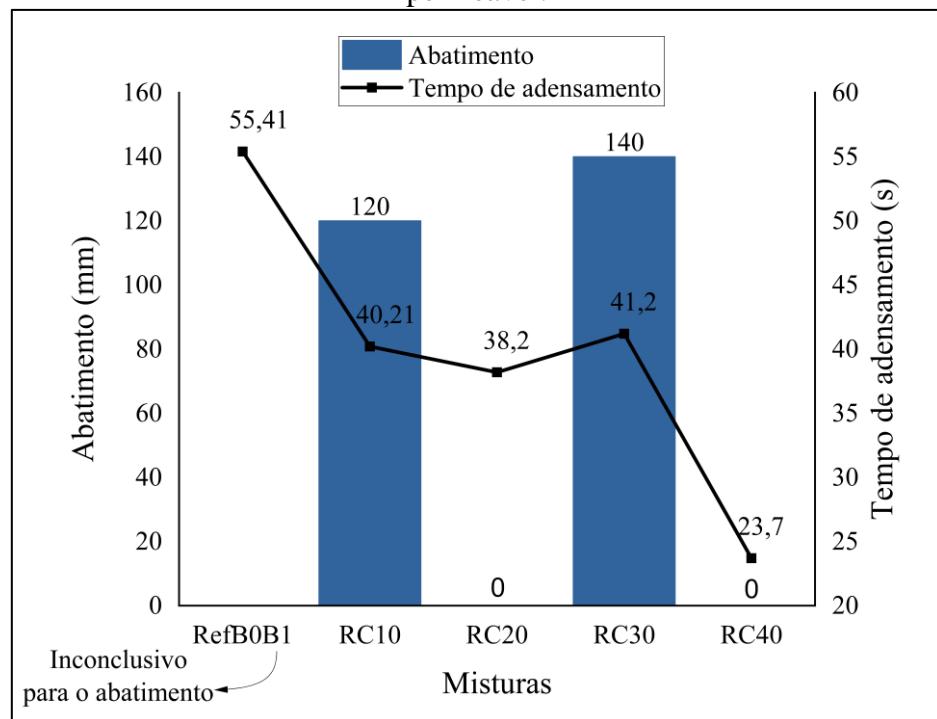
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo irá apresentar os resultados e discussões sobre as análises realizadas em misturas de concreto permeável contendo resíduo de caulim. Os resultados foram obtidos a partir dos ensaios descritos no Capítulo 4 (Programa Experimental). A análise do estado fresco foi feita pelos ensaios de trabalhabilidade, já para o estado endurecido foi extraído os resultados dos ensaios de índice de vazios, permeabilidade e resistências. Além disso, serão apresentadas as análises da variância dos resultados de permeabilidade e resistências.

5.1 Trabalhabilidade

A Figura 26 apresenta o gráfico com os resultados obtidos dos ensaios de trabalhabilidade das misturas referência e com RC.

Figura 26 - Resultados do ensaio de trabalhabilidade realizado nas misturas de concreto permeável.



Fonte: autoria própria (2023).

A análise foi realizada através de dois métodos: no eixo Y à esquerda estão os resultados pelo método do abatimento do tronco de cone (NBR NM 67 (ABNT, 1998)), apresentados por meio de barras, e no eixo Y à direita encontram-se os resultados do

método de VeBe (DNIT 064 (ABNT, 2004)), exibidos em pontos. Já no eixo X estão apresentadas as misturas analisadas.

Na Figura 26 pode ser observado que o ensaio do abatimento foi inconclusivo para a amostra referência, pois ao realizar o procedimento experimental ocorria um desmoronamento do tronco de cone. Isso ocorreu por não existir boa coesão entre os componentes presentes na mistura, essa falta de coesão derivou da ausência de agregado miúdo nas amostras de concreto permeável, ocasionando a falta de entrosamento entre os grãos (CHANDRAPPA *et al.*, 2016) e (TENNIS *et al.*, 2004)

Percebe-se que quando ocorreu a substituição do agregado graúdo pelo resíduo de caulim houve a formação do tronco de cone e assim obtenção dos resultados para o método do abatimento, dessa forma o RC levou a uma maior coesão nas misturas, como verificado na pesquisa de Aquino *et al.* (2019). Isso pode ser justificado pelo formato dos grãos de RC que ao substituir o agregado natural proporcionou uma mistura com componentes que possuíam maior entrosamento entre a pasta de cimento hidratada, agregados graúdos e RC.

Entretanto, não existiu uma linearidade entre os resultados, pois o RC possuía formato dos grãos variando desde de formas angulares até grãos mais arredondados, que se mostraram com proporções diferentes para cada mistura. Desse contexto, pode ser afirmado que a mistura que obteve melhor trabalhabilidade possuía maior presença de grãos arredondados, diferente das misturas que tinham menores trabalhabilidade, com maior parcela de grãos angulares de RC.

Para as misturas com 20 e 40% de RC (RC20 e RC40) o tronco de cone se formou e se manteve estável com abatimento de 0 mm, decorrente da baixa trabalhabilidade, esses resultados estão em consonância com os obtidos por Bauer *et al.* (2020), Sandoval *et al.* (2019) e pelas normas NBR 16416 (ABNT, 2016) e ACI 522R (2010), esses afirmaram que o abatimento do tronco de cone para concretos permeáveis deve estar entre 0 e 20 mm.

Para a amostra RC10 o abatimento foi 120 mm e para RC30 foi de 140 mm, esses resultados se mostraram fora dos limites estabelecidos pela NBR 16416 (ABNT, 2016) e pela ACI 522R (2010). Desses resultados constata-se que a amostra RC30 apresentou maior abatimento e consequentemente melhor trabalhabilidade.

As discussões comparativas entre os resultados foram realizadas apenas em relação ao ensaio de trabalhabilidade pelo método de VeBe, visto que, esse obteve todos os resultados conclusivos. A Tabela 17 apresenta a média dos resultados; ganho de tempo

de adensamento (GT) em relação à referência; desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos resultados de cada amostra estudada.

Tabela 17 – Análise de trabalhabilidade para o método de VeBe para diferentes misturas.

Misturas	Média	GT* %	DP**	CV*** %
RefB0B1	55,41	-	2,11	4
RC10	40,21	27,43	2,85	7
RC20	38,20	31,06	2,40	6
RC30	41,20	25,65	2,34	6
RC40	23,70	57,30	3,63	15

*GT = Ganho de trabalhabilidade; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

Na Tabela 17 é possível constatar que todos os ganhos no tempo de adensamento foram positivos, pois houve um aumento na trabalhabilidade da mistura. Esse fato foi evidenciado e discutido também no método do abatimento do tronco de cone (NBR NM 67 (ABNT, 1998)).

As misturas RC10, RC20 e RC30 apresentaram um ganho de tempo de adensamento respectivamente iguais a: 27,43; 31,06 e 25,65%. A mistura que teve maior acréscimo foi RC40 com 57,30%, fato também evidenciado na pesquisa de Santos *et al.* (2017), que afirmou que a introdução de 15% de RCD contribuiu para o melhoramento da trabalhabilidade de misturas de concretos.

Segundo Ribeiro (2014), para concretos permeáveis é importante fazer uma análise visual para compreender os fatores de trabalhabilidade e trabalhabilidade. Desse contexto pode-se afirmar que a presença do resíduo de caulim melhorou a trabalhabilidade, visto que foi possível realizar os ensaios conforme os dois métodos de análise fato que não ocorreu para algumas amostras sem resíduo.

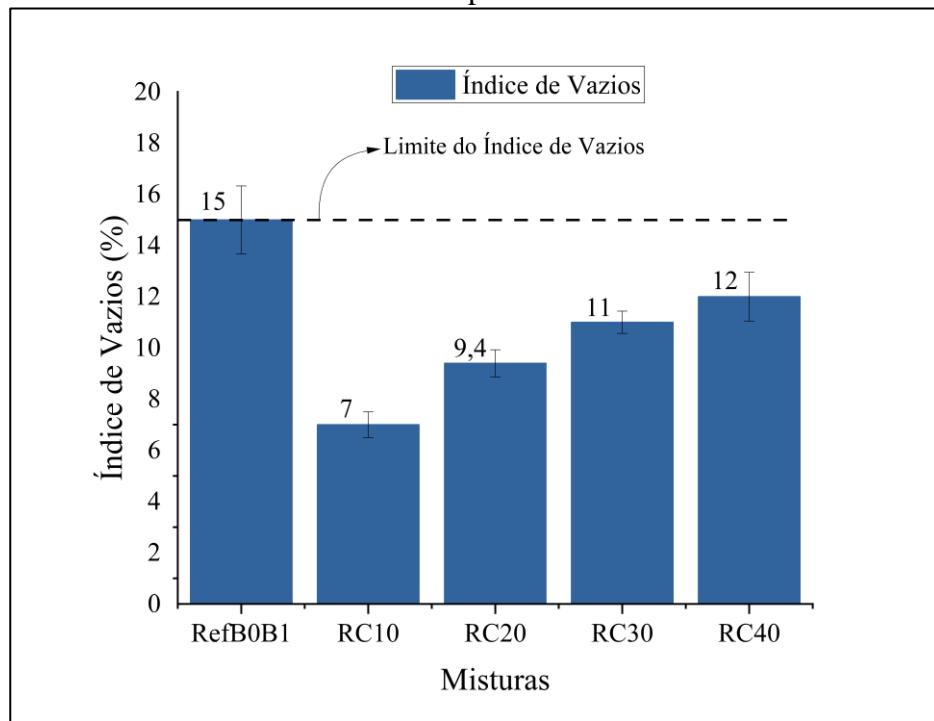
A seguir serão apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados nas amostras no estado endurecido.

5.2 Índice de vazios

A Figura 27 apresenta em gráfico a média dos resultados dos índices de vazios para a mistura referência e para as misturas com RC. No eixo X estão apresentadas as

amostras analisadas: RefB0B1, RC10, RC20, RC30 e RC40. Já o eixo Y traz como resposta os valores dos índices de vazios em porcentagem. Além disso, a linha tracejada preta se refere ao limite mínimo de índice de vazios segundo ACI 522 (2010).

Figura 27 - Resultados do ensaio de índices de vazios realizado nas misturas de concreto permeável.



Fonte: autoria própria (2023).

É notório que ocorreu uma diminuição do índice de vazios com a substituição do agregado graúdo (bruta 0) pelo RC. Aquino *et al.* (2019) que também introduziram o RC em amostras de concreto permeável verificou comportamento contrário, isso pode ter ocorrido devido as diferentes composições, pois Aquino *et al.* (2019) utilizaram a fração fina do RC, diferente desta pesquisa que usou a fração grossa do RC.

Ribeiro (2014) e Mikami *et al.* (2018) verificaram que a introdução de resíduos, que possuem finos, em concretos permeáveis ocasiona o refinamento dos poros e consequente diminuição do índice de vazios. A presença de material pulverulento em torno da birra pode ter acarretado esse refinamento, diminuindo o volume de vazios. Essa justificativa foi usada por Torres *et al.* (2018), Cósik *et al.* (2015) e Putman e Neptune (2011).

A média do resultado do índice de vazios para a mistura referência (RefB0B1) foi igual ao valor limite para esse índice (15%), segundo a ACI 522R (2010). Já na mistura com 10% de RC (RC10) foi onde ocorreu menor valor do índice de vazios (7%). As

amostras com 20, 30 e 40% de RC apresentaram, respectivamente, as seguintes porcentagens de índice de vazios: 9,4; 11 e 12%. Esse comportamento crescente pode ser justificado pela quantidade de finos presente em proporções diferentes para cada mistura.

A Tabela 18 apresenta a média do índice de vazios; acréscimo de índice de vazios em relação à referência (AV); desvio padrão (DP) e coeficiente de variação do índice de vazios (CV) para as misturas em estudo.

Tabela 18 - Análise do índice de vazios para diferentes misturas.

Misturas	Média (%)	AV* %	DP**	CV*** %
RefB0B1	15	-	1,32	9
RC10	7	- 53,33	0,50	7
RC20	9,4	- 37,33	0,53	6
RC30	11	- 26,67	0,44	4
RC40	12	- 20,00	0,95	8

*AV = Acréscimo de índice de vazios; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

A menor variação foi em relação a RC40 com diminuição de 20% do índice de vazios, já a maior variação foi em relação a RC10 com diminuição de 53,33%. Para as amostras com 20 e 30% de RC o decréscimo do índice de vazios foi de 37,33 e 26,67%, respectivamente.

Percebe-se que os acréscimos dos índices de vazios das misturas com substituições de RC em relação à referência foram todos negativos, visto que todos os valores desses índices foram menores que o da mistura referência. Isso também foi constatado na pesquisa de Mikami *et al.* (2018) apresentando que a introdução de resíduo cerâmico contribuiu para a diminuição do índice de vazios das amostras, devido o refinamento dos poros.

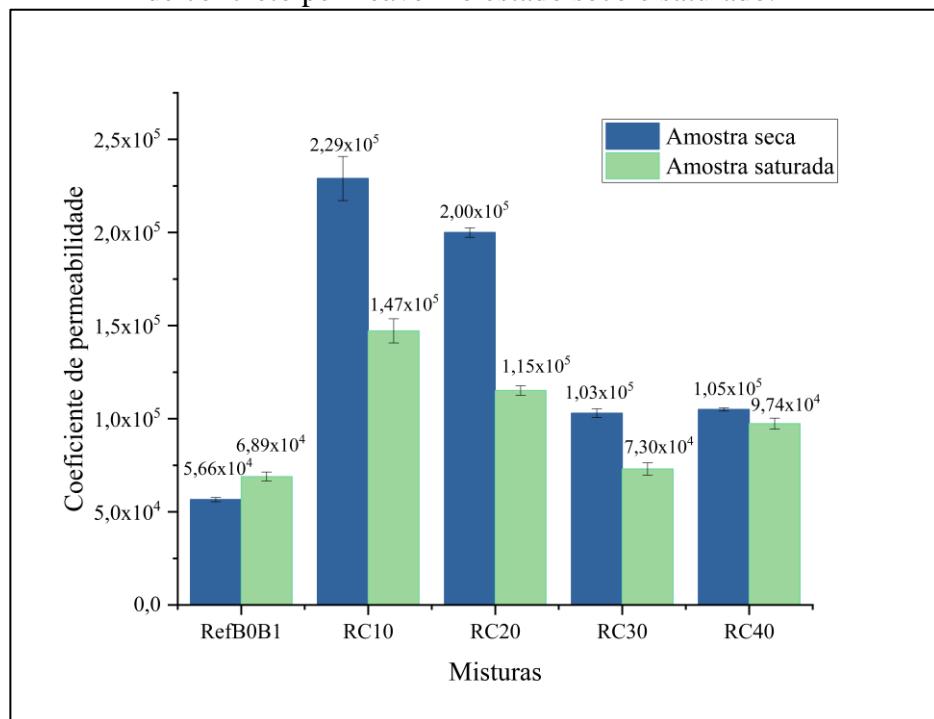
5.3 Coeficiente de permeabilidade

O índice de vazios menor que o limite estabelecido pelas normas ACI 522 (2010) e NBR 16416 (2016), não comprometeu a permeabilidade do material, que foi comprovado por meio dos resultados dos ensaios de permeabilidade apresentados a seguir. A justificativa para isso pode ser dada por Schwetz *et al.* (2015) que afirmam que além do elevado índice de vazios para se ter uma alta permeabilidade deve existir uma

conexão entre os vazios de tal forma que se formem canais no interior do concreto permeável.

Os resultados do coeficiente de permeabilidade para cada mistura estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Resultados do ensaio coeficiente de permeabilidade realizado nas misturas de concreto permeável no estado seco e saturado.



Fonte: autoria própria (2023).

O gráfico apresenta no eixo Y os valores em ordem crescente do coeficiente de permeabilidade para as amostras ensaiadas no estado seco e saturado. No eixo X estão apresentadas as misturas analisadas (RefB0B1, RC10, RC20, RC30 e RC40). Além disso, as barras em azul apresentam os resultados da análise na amostra seca, já as barras em verde fazem referência aos resultados da análise nas amostras saturadas.

Na Figura 28 percebe-se que todas as misturas apresentaram coeficiente de permeabilidade médio acima de $2,5 \times 10^3$ mm/h, menor valor estabelecido pelas normas ACI 522R (2010) e NBR 16416 (ABNT, 2016) e pelas pesquisas de Bean *et al.* (2007) e Tennis *et al.* (2014), apresentadas na Tabela 5.

É perceptível que, para as misturas com RC, as amostras secas tiveram uma média do coeficiente de permeabilidade superior ao das amostras saturadas. Isso pode ser justificado pela presença de água nos vazios das amostras saturadas, que de certa forma impedi o escoamento e ocasionou um menor coeficiente de permeabilidade (SCHWETZ

et al., 2015). Entretanto, esse evento não ocorreu para a amostra RefB0B1 que provavelmente não tinham entre seus vazios água aprisionada.

Além disso, é notório que dentre as misturas a que apresentou menor variação do coeficiente de permeabilidade do estado seco para o estado saturado foi a RC30 (29,13%). Desse contexto, pode ser afirmado que a amostra com 30% de RC não teve uma mudança significativa da sua funcionalidade drenante quando passa do estado seco para o saturado. Isso é um efeito benéfico na aplicação em campo, visto que não ocorreria uma mudança que ocasionasse alteração significativa no desempenho drenante do RC30, mesmo após ocorrência de chuvas intensas e seguidas.

Da Figura 28 percebe-se também que com a substituição do agregado graúdo (bruta 0) pelo resíduo de caulin, houve um incremento do coeficiente de permeabilidade, ou seja, o resíduo de caulin contribuiu para maior permeabilidade das placas em teste. Esse fato foi apresentado na pesquisa de Aquino *et al.* (2019) e pode ser justificado por Patrício (2019), que comprovou em sua pesquisa que o resíduo de caulin possui potencial de adsorção, explicado no Capítulo 3 deste trabalho.

A média dos resultados para os coeficientes de permeabilidade nos estados seco e saturado, o incremento do coeficiente de permeabilidade (IP), assim como os desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Análise do coeficiente de permeabilidade para diferentes misturas.

Misturas/ Valores	Média (mm/h)		IP* %		DP (mm/h)		CV%	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
RefB0B1	$5,66 \times 10^4$	$6,89 \times 10^4$	-	-	$1,11 \times 10^3$	$1,11 \times 10^3$	2	2
RC10	$2,29 \times 10^5$	$1,47 \times 10^5$	310,44	310,44	$1,18 \times 10^4$	$1,18 \times 10^4$	5	5
RC20	$2,00 \times 10^5$	$1,15 \times 10^5$	251,32	251,32	$2,53 \times 10^3$	$2,53 \times 10^3$	1	1
RC30	$1,03 \times 10^5$	$7,30 \times 10^4$	79,97	79,97	$2,32 \times 10^3$	$2,32 \times 10^3$	2	2
RC40	$1,05 \times 10^5$	$9,74 \times 10^5$	84,43	84,43	$8,46 \times 10^2$	$8,46 \times 10^2$	1	1

*IP = Incremento de permeabilidade; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

Pela Tabela 19 percebe-se que houve o maior incremento do coeficiente de permeabilidade para as amostras estudadas no estado seco, sendo maior o da amostra RC10 com crescimento de 310,44% em relação à referência. Os demais incrementos de coeficiente de permeabilidade foram respectivamente iguais a: 251,32% para RC20, 79,97% para RC30 e 84,43% para RC40.

Para as amostras no estado saturado o maior incremento também ocorreu na mistura RC10, entretanto, com um crescimento de 109,63%, valor menor que aquele encontrado na amostra seca. Os demais coeficientes de permeabilidade para o estado saturado foram respectivamente iguais a: 68,31 % para RC20, 7,15% para RC30 e 40,13% para RC40.

Desses resultados percebe-se que não ocorreu um crescimento linear em função do aumento de RC nas misturas com relação ao aumento do coeficiente de permeabilidade. Isso pode ser justificado segundo Martins Filho *et al.* (2020) pelo fato das proporções entre agregados e RC formarem canais que se conectam de formas diferentes proporcionando ou não um maior escoamento do fluido.

Em relação ao desvio padrão houve uma variação entre $8,46 \times 10^2$ e $1,18 \times 10^4$ mm/h para as amostras secas e de 37,32 e $6,47 \times 10^3$ mm/h para as amostras saturadas. Já em relação ao coeficiente de variação ocorreu uma mudança entre 1 e 5% para as amostras secas e de 0 a 4% para aquelas saturadas. Entretanto, para saber se as proporções escolhidas foram relevantes para os resultados do coeficiente de permeabilidade encontrados foi realizada uma análise de variância apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados da variância para o coeficiente de permeabilidade de diferentes misturas.

Análise linear - Coeficiente de permeabilidade no estado seco					
Fonte	GL*	SQ**	QM***	Valor-F	Valor-P
Mistura	4	65841375547	16460343887	530,71	0,000
Erro	10	310158430	31015843	-	-
Total	14	66151533976	-	-	-
Análise linear - Coeficiente de permeabilidade no estado saturado					
Fonte	GL*	SQ**	QM***	Valor-F	Valor-P
Mistura	4	22608230125	5652057531	34,79	0,000
Erro	10	1624825515	162482552		
Total	14	24233055640			

*Graus de liberdade; **Soma de quadrados; ***Quadrado médio

Fonte: autoria própria (2023).

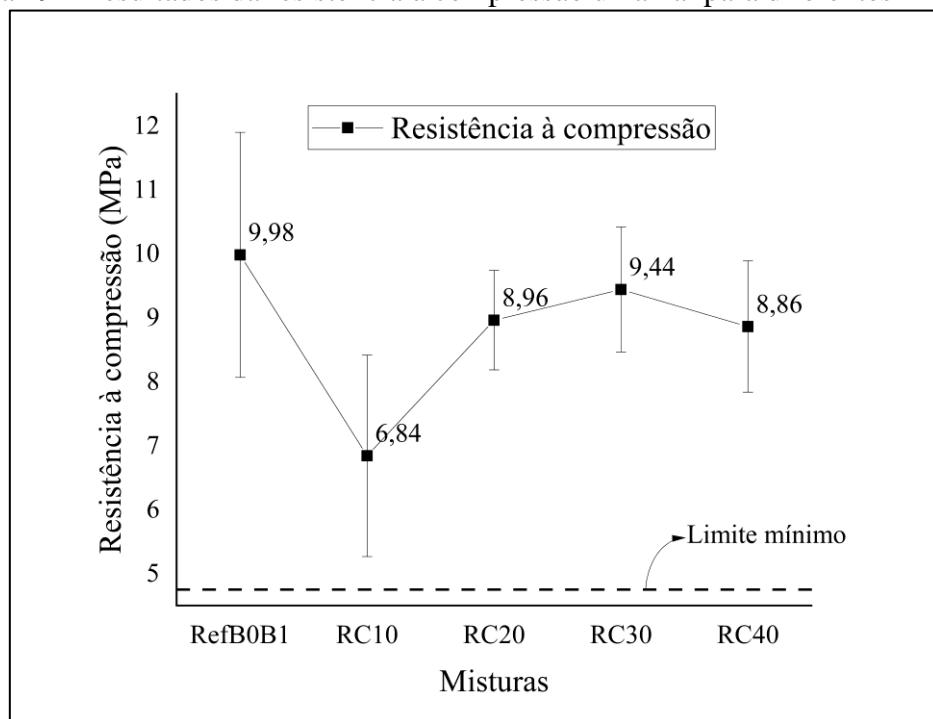
Em relação a análise de variância (ANOVA) tanto para a amostra no estado seco quanto para ela no estado saturado foi possível identificar um Valor-P igual a 0, isso

revela que as diferenças de porcentagens de RC utilizadas são significativas e devem ser levadas em consideração na análise dos coeficientes de permeabilidade das amostras.

5.4 Resistência à compressão uniaxial

O gráfico da Figura 29 apresenta os resultados da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.

Figura 29 - Resultados da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.



Fonte: autoria própria (2023).

Pela Figura 29 percebe-se que a maior resistência à compressão uniaxial ocorreu na amostra RefB0B1, com 0% de RC (9,98 MPa). Para as amostras RC10, RC20, RC30 e RC40 esses valores foram respectivamente iguais a 6,84 MPa; 8,96 MPa; 9,44 MPa e 8,86 MPa. Dessas respostas, pode-se afirmar que todos os resultados ficaram acima do mínimo estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que foi de 2,5 MPa, obtida pelas informações estabelecidas no Quadro 2 do Capítulo 3. Além disso, as resistências encontradas foram superiores as estabelecidas pela ACI 522R-10 (2010), de 2,8 MPa, e por Polastre *et al.* (2006) e Pils *et al.* (2019).

Desses resultados comprehende-se que ao ser realizada a substituição parcial do agregado graúdo pelo RC houve um decréscimo de resistência, esse comportamento foi

não-linear e é justificado pela configuração dos vazios que pode ter ocorrido diferentemente para cada mistura (FARIA *et al.*, 2019). Outra justificativa para o decréscimo da resistência pode estar relacionada com o formato dos grãos de RC que para a mistura RC 10 pode ter apresentado maior parcela em forma lamelar, isso ocasiona a formação de uma zona de transição mais frágil e provoca o decréscimo da resistência mecânica. Diferente do que ocorreu para as misturas RC20, RC30 e RC40.

Além disso, Sandoval *et al.* (2019) e Tavares e Kazmierzak (2016) realizaram, respectivamente, estudos em amostras contendo resíduos da escória de alto forno, com granulometrias que variavam de 6 até 70mm, e agregado reciclado na proporção de até 100%, onde as amostras apresentaram também um decréscimo, respectivamente iguais a 40 e 50%, na resistência à compressão quando comparada à mistura sem resíduos.

Entretanto, percebe-se que a resistência à compressão da mistura RC30 teve um decréscimo acentuado, sem elevada discrepância, ao ser comparada com a mistura referência. Na Tabela 21 são apresentados os decréscimos de resistência (DR), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada amostra analisada.

Tabela 21 – Análise da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.

Misturas	Média (MPa)	DR* %	DP** (MPa)	CV*** %
REFB0B1	9,98	-	1,91	19
RC10	6,84	31,44	1,57	23
RC20	8,96	10,21	0,78	9
RC30	9,44	5,45	0,98	10
RC40	8,86	11,17	1,03	12

*DR = Decréscimo de resistência; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

O maior decréscimo foi de 31,44% para a amostra RC10 e o menor decréscimo foi de 5,45%, na amostra RC30. As amostras RC20 e RC40 obtiveram um decréscimo de resistência a compressão igual a 10,21 e 11,17%, respectivamente.

Quanto ao desvio padrão a amostra RC20 foi a que obteve menor valor (0,78 MPa), enquanto a amostra referência obteve maior desvio (1,91 MPa). Para as amostras RC10, RC30 e RC40 os valores dos desvios padrão foram respectivamente iguais a 1,57; 0,98 e 1,03 MPa.

Para o coeficiente de variação o maior valor correspondeu a amostra RC10 (23%), enquanto o menor valor foi referente a amostra RC20 (9%). As demais misturas

que são: RefB0B1, RC30, RC40 obtiveram um coeficiente de variação respectivamente iguais a 19, 10 e 12%. Para verificar a significância desses resultados foi realizada a análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da variância para a resistência à compressão de diferentes misturas.

Análise linear					
Fonte	GL*	SQ**	QM***	Valor-F	Valor-P
Mistura	4	33,82	8,456	5,37	0,004
Erro	20	31,50	1,575	-	-
Total	24	65,32	-	-	-

*Graus de liberdade; **Soma de quadrados; ***Quadrado médio

Fonte: autoria própria (2023).

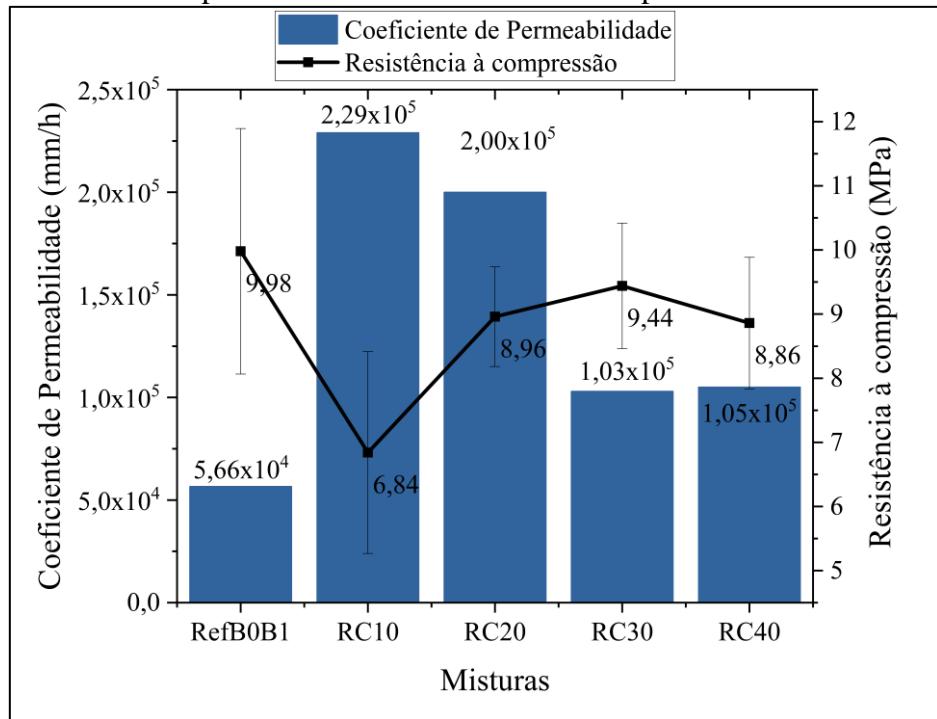
Pela Tabela 22 verifica-se que o Valor-p foi igual a 0,0015, esse valor foi menor que 0,05 (5%), logo a confiabilidade desse resultado é maior que 95%. Assim, pode ser afirmado que o fator substituição de RC pelo agregado graúdo influencia na resistência à compressão das misturas analisadas.

Após esses resultados de resistência foi possível analisar a relação existente entre resistência à compressão uniaxial e o coeficiente de permeabilidade da mistura, apresentada no item seguinte.

5.4.1 Relação entre resistência à compressão uniaxial e coeficiente de permeabilidade

O gráfico da Figura 34 apresentada a relação entre o coeficiente de permeabilidade e a resistência à compressão uniaxial para cada mistura.

Figura 30 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à compressão nas misturas de concretos permeáveis.



Fonte: autoria própria (2023).

Pelo gráfico da Figura 30 o eixo Y à esquerda apresenta em ordem crescente os valores médios dos coeficientes de permeabilidade, já discutidos no tópico 5.3 deste capítulo. Enquanto o eixo Y à direita apresentada os valores médios da resistência à compressão uniaxial, com seus respectivos desvios padrão e no eixo X estão apresentadas as misturas analisadas.

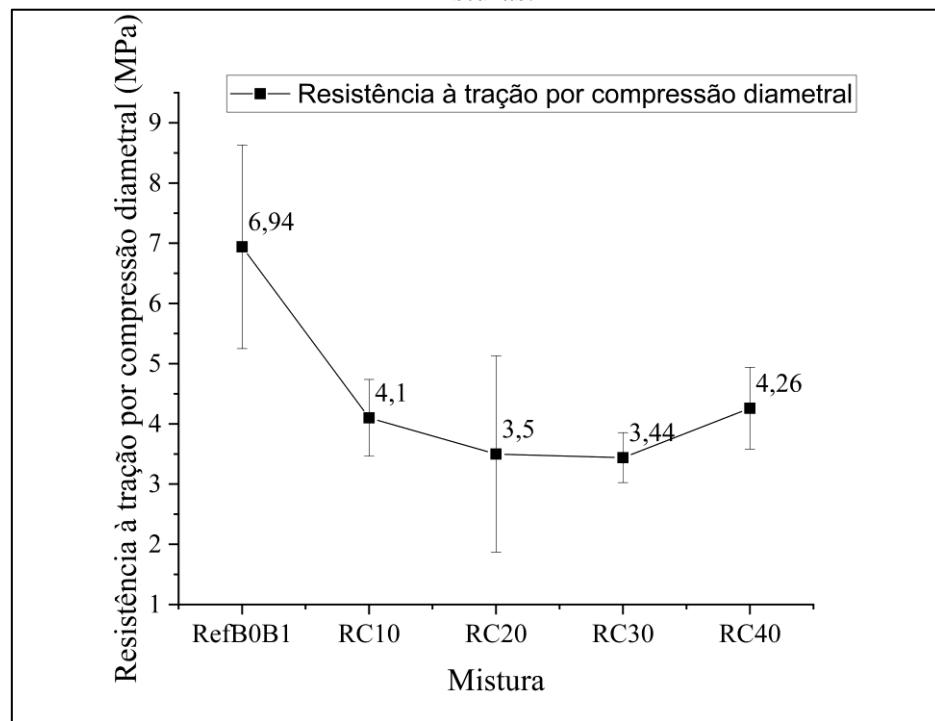
Da leitura da Figura 30 pode ser entendido que quanto menor o coeficiente de permeabilidade maior foi a resistência à compressão uniaxial do concreto permeável. A maior resistência à compressão uniaxial correspondeu a mistura referência, essa obteve o menor coeficiente de permeabilidade (RefB0B1).

Já a amostra RC10 foi a que obteve maior coeficiente de permeabilidade, no entanto sua resistência média atingiu o menor valor, que foi de 6,84 MPa, mesmo assim essa resistência foi maior que o mínimo exigido pela ACI 522R (2010). Nas pesquisas de Aquino *et al.* (2019) e Batezini *et al.* (2021) as menores resistências à compressão uniaxial também foram referentes as amostras que obtiveram maiores coeficientes de permeabilidade.

5.5 Resistência à tração por compressão diametal

O gráfico da Figura 31 apresenta os resultados da resistência à tração por compressão diametal para diferentes misturas.

Figura 31 - Resultados da resistência à tração por compressão diametal para diferentes misturas.



Fonte: autoria própria (2023).

Pela Figura 31 percebe-se que a maior resistência à tração por compressão diametal procedeu da amostra RefB0B1 (6,94 MPa), já para as amostras RC10, RC20, RC30 e RC40 as resistências à tração por compressão diametal foram respectivamente iguais a 4,10 MPa; 3,50 MPa; 3,44 MPa e 4,26 MPa.

Pinheiro *et al.* (2004) destacam a relação entre resistência à compressão uniaxial e resistência à tração por compressão diametal para concretos convencionais (Equação 2), fazendo uma aplicação com concretos permeáveis têm-se:

$$f_{ct,d} = 0,33 f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Onde:

$f_{ct,d}$: Resistência à tração por compressão diametal;

f_{ck} : Resistência à compressão uniaxial.

Dessa forma, é possível estipular qual seria a resistência média da tração por compressão diametral das amostras em estudo e assim confrontar com os resultados encontrados após os ensaios. Esses valores estão apresentados na Tabela 23 e serão discutidos em seguida.

Tabela 23 – Comparaçāo entre literatura e ensaio dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Mistura	Pinheiro <i>et al.</i> (2004) (MPa)	Ensaio (MPa)
RefB0B1	1,53	6,94
RC10	1,19	4,10
RC20	1,42	3,51
RC30	1,47	3,44
RC40	1,41	4,26

Pela Tabela 23 percebe-se que todas as misturas estudadas obtiveram um valor de resistência à tração por compressão diametral maior que a estipulada por Pinheiro *et al.* (2004).

Dessas respostas, pode-se afirmar que todos os resultados de ensaio ficaram acima dos valores encontrados por Batezini *et al.* (2021), Martins Filho et al. (2020) e Pils *et al.* (2014), ou seja, maiores que 0,25 MPa; 1,49 MPa e 0,54 MPa. Além disso, é necessário salientar que todos os resultados foram maiores que o estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Desses resultados, comprehende-se que ao ser realizada a substituição parcial do agregado graúdo pelo RC houve um decréscimo de resistência, esse comportamento foi não-linear e é justificado pela configuração dos vazios que pode ter ocorrido de maneiras distintas para cada mistura, como exemplo na interface agregado/pasta de cimento hidratada (FARIA *et al.*, 2019).

Ao ser comparada a resistência à tração por compressão diametral das misturas com RC com a mistura referência foi possível analisar os decréscimos de resistência (DR), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada amostra analisada (Tabela 24).

Tabela 24 – Análise da resistência à compressão diametral para diferentes misturas.

Misturas	Média	DR* %	DP**	CV*** %
RefB0B1	6,94	-	1,69	24
RC10	4,10	40,91	0,64	16
RC20	3,51	49,48	1,63	46
RC30	3,44	50,40	0,42	12
RC40	4,26	38,52	0,68	16

*DR = Decréscimo de resistência; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

A partir da Tabela 24 é notório que para todas as misturas ocorreu o decréscimo do valor de resistência, o maior foi de 50,40% e ocorreu para a mistura RC30. Já o menor decréscimo foi para a amostra RC40, que correspondeu ao valor de 38,52%. Para as misturas RC10 e RC20 os decréscimos de resistência foram respectivamente iguais a 40,91 e 49,48%.

Na Tabela 24 também são expostos os desvios padrão das amostras, sendo o maior igual a 1,69, referente à mistura referência, e o menor valor de 0,42, referente a mistura com 30% de RC.

Além disso, pôde ser observado que o coeficiente de variação para as amostras em análises foi de 24% em relação a RC10; 46% para RC20, 12% para RC30 e 16% para RC40.

Com o intuito de entender a relevância dos resultados foi realizada a análise da variância (ANOVA) que está apresentada na Tabela 25.

Tabela 25 – Análise da resistência à tração por compressão diametral para diferentes misturas.

Análise linear					
Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Mistura	4	33,14	8,286	6,33	0,003
Erro	15	19,64	1,309	-	-
Total	19	52,78	-	-	-

*Graus de liberdade; **Soma de quadrados; ***Quadrado médio

Fonte: autoria própria (2023).

Pela Tabela 25 verifica-se que o Valor-p foi igual a 0,003, esse foi menor que 0,05 (5%), logo a confiabilidade desse resultado é maior que 95%. Assim, pode ser

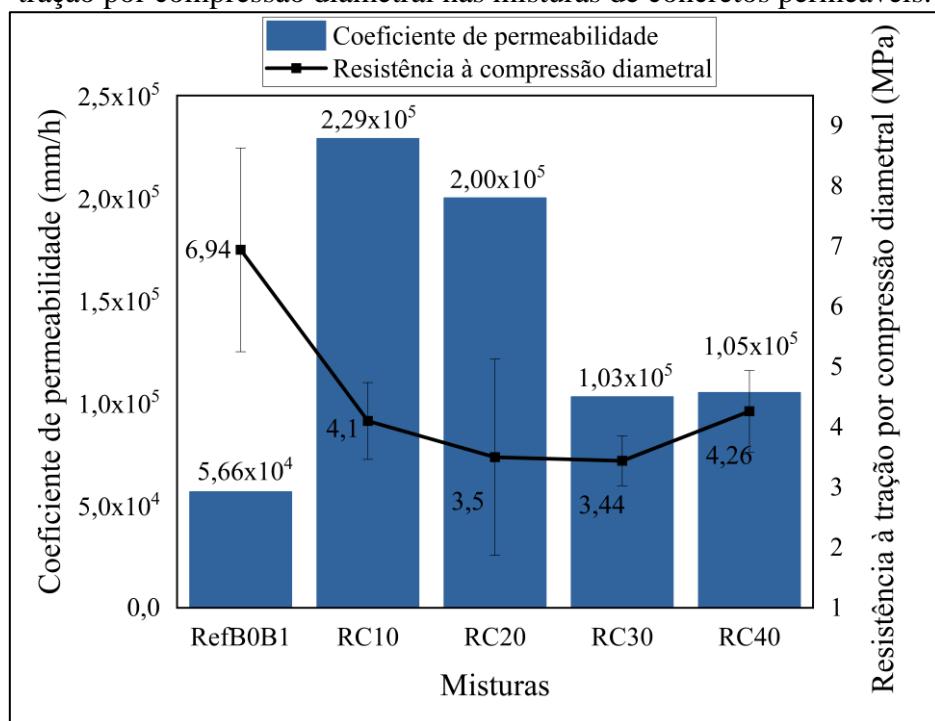
afirmado que o fator substituição de RC pelo agregado graúdo influencia na resistência à tração por compressão diametral.

Após esses resultados foi possível analisar a relação existente entre resistência à tração por compressão diametral e o coeficiente de permeabilidade da mistura, apresentada no item seguinte.

5.5.2 Relação entre resistência à tração por compressão diametral e coeficiente de permeabilidade

Na Figura 32 é apresentada a relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e a resistência à tração por compressão diametral para cada mistura.

Figura 32 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à tração por compressão diametral nas misturas de concretos permeáveis.



Fonte: autoria própria (2023).

Na Figura 32, o eixo Y à esquerda corresponde aos valores do coeficiente de permeabilidade no estado seco, apresentados por meio de barras, já discutidos no item 5.3. Já o eixo Y à direita está relacionado com o valor da resistência à compressão diametral de cada amostra ensaiada e o eixo X informa quais amostras foram estudadas.

Percebe-se que houve um decréscimo da resistência à compressão diametral à medida que aumentou o coeficiente de permeabilidade da amostra, entretanto essa relação

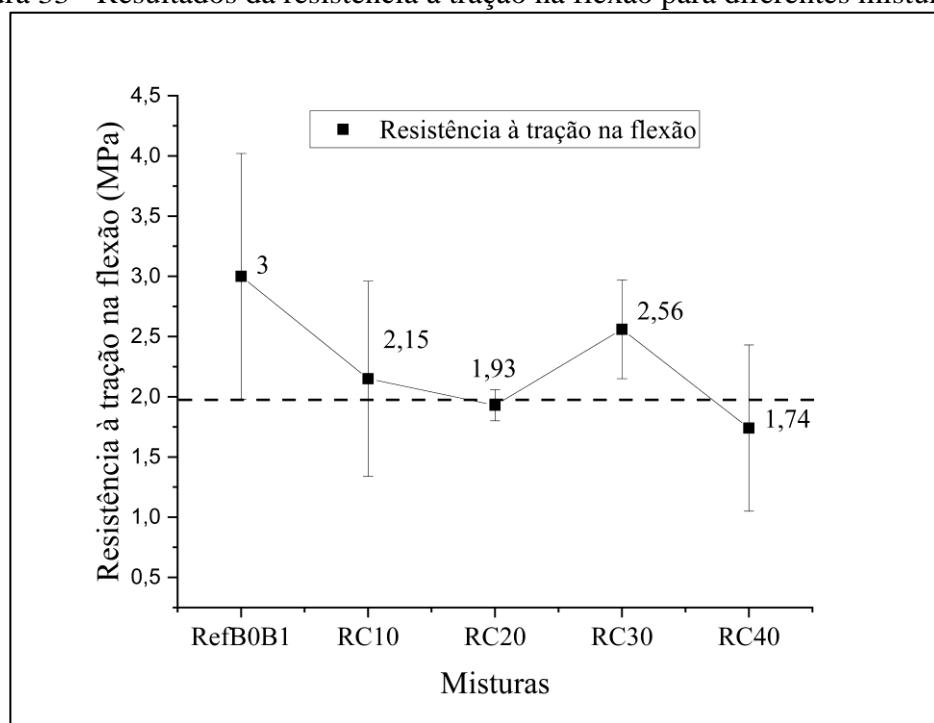
não seguiu uma linearidade. Isso pode ser justificado pelas diferentes configurações dos vazios para cada mistura.

O maior valor de resistência à compressão diametral foi de 6,94 MPa e ocorreu para a amostra RefB0B1, que apresenta menor coeficiente de permeabilidade. Já a menor resistência foi referente a mistura RC30 com 3,44 MPa, por vez, essa amostra apresentou um coeficiente de permeabilidade intermediário quando comparado aos valores encontrados para as outras amostras. Esse fato também foi registrado na pesquisa de Jindal e Ransinchung (2022) onde o incremento de permeabilidade derivou uma diminuição nos valores da resistência.

5.6 Resistência à tração na flexão

O gráfico da Figura 33 apresenta os resultados da resistência à tração na flexão para diferentes misturas.

Figura 33 - Resultados da resistência à tração na flexão para diferentes misturas.



Fonte: autoria própria (2023).

Na Figura 33 percebe-se que a maior resistência à tração na flexão procedeu da amostra RefB0B1 (3 MPa), já para as amostras RC10, RC20, RC30 e RC40 as resistências à tração na flexão foram respectivamente iguais a 2,15 MPa; 1,92 MPa; 2,56 MPa e 1,74

MPa. Desses resultados, apenas as misturas com 20 e 40% ficaram abaixo dos valores estabelecido pela ACI 522R (2010).

Pinheiro *et al.* (2004) destacam a relação entre resistência à compressão uniaxial e resistência à tração na flexão para concretos convencionais (Equação 3) podendo ser feita uma aplicação com concretos permeáveis.

$$f_{ct,f} = 0,428 f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

Onde:

$f_{ct,f}$: Resistência à tração na flexão;

f_{ck} : Resistência à compressão uniaxial.

Dessa forma, por meio dos resultados da resistência à compressão uniaxial foi possível estipular qual seria a resistência média da tração na flexão e assim confrontar com os resultados encontrados após os ensaios. Esses valores estão apresentados na Tabela 26 e serão discutidos posteriormente.

Tabela 26 - Comparaçao entre literatura e ensaio dos resultados de resistência à tração na flexão.

Mistura	Pinheiro <i>et al.</i> , (2004) (MPa)	Ensaio (MPa)
RefB0B1	1,98	3,00
RC10	1,54	1,55
RC20	1,85	1,93
RC30	1,91	2,56
RC40	1,93	1,74

Fonte: autoria própria (2023).

Da Tabela 26 percebe-se que todas as misturas estudadas obtiveram um valor de resistência à tração na flexão maior que a estipulada por Pinheiro *et al.* (2004).

Dessas respostas, pode-se afirmar que todos os resultados ficaram acima dos valores encontrados por Batezini *et al.* (2021), Schackow *et al.* (2020), Pils *et al.* (2014), Sandoval *et al.* (2019) e Tennis *et al.* (2004) cujo os valores foram apresentados no Capítulo 3.

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) os valores da resistência à tração na flexão regem a utilização do concreto permeável e indica para que tipo de tráfego esse pode ser aplicado, a norma ainda afirma que os limites devem estar entre 1,0 MPa e 2,0 MPa. Logo, todos os valores alcançados foram superiores ao determinado pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Assim como os resultados anteriores ao ser realizada a substituição do agregado graúdo pelo RC houve um decréscimo de resistência, esse comportamento foi não-linear, se assemelha com os resultados de resistência à compressão uniaxial e pode ser justificado pela configuração dos vazios que pode ter ocorrido de maneiras distintas para cada mistura (FARIA *et al.*, 2019). Outra justificativa para o decréscimo da resistência pode estar relacionada com o formato dos grãos de RC que para a mistura RC 10 pode ter apresentado maior parcela em forma lamelar, isso ocasiona a formação de uma zona de transição mais frágil e provoca o decréscimo da resistência mecânica. Diferente do que ocorreu para as misturas RC20, RC30 e RC40.

Ao comparar a resistência à tração na flexão das misturas com RC e a mistura referência foi possível analisar os decréscimos de resistência (DR), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada amostra analisada (Tabela 27).

Tabela 27 - Análise da resistência à tração na flexão para diferentes misturas.

Misturas	Média (MPa)	DR* %	DP** (MPa)	CV*** %
RefB0B1	3,00	-	1,02	34
RC10	1,55	28,33	0,81	38
RC20	1,93	35,83	0,13	7
RC30	2,56	14,75	0,41	16
RC40	1,74	41,92	0,69	40

*DR = Decréscimo de resistência; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

Pela Tabela 27 percebe-se que o maior decréscimo correspondeu a mistura RC40 com 41,92%, já o menor decréscimo foi de 14,75% referente a mistura RC30. Os demais valores foram iguais a: 28,33% para RC10 e 35,83% para RC20. Pils *et al.* (2019) verificaram em seus estudos que o maior decréscimo foi de 49,39%, valor superior ao encontrado nesta pesquisa, e ocorreu para amostras que possuíam 50,6% de substituição de fibras de polipropileno.

No tocante ao desvio padrão, o maior valor foi referente a RefB0B1 com 1,02 MPa, já o menor desvio ocorreu para a RC20 com valor de 0,13 MPa. Os demais valores foram iguais a: 0,81 MPa para a RC10; 0,41 MPa para a RC30 e de 0,69 MPa para a RC40.

Os coeficientes de variação ficaram entre 7 e 40%, sendo o menor valor referente a mistura RC20 e o maior valor correspondente a RC40. Os demais valores foram de 34% para a amostra referência, 38% para a RC10 e 16% para a RC30.

Percebe-se que o coeficiente de variação apareceu em elevada porcentagem para essa análise. Logo, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) sobre os resultados para entender se o fator substituição é significativo nas respostas de resistência à tração na flexão (Tabela 28)

Tabela 28 - Resultados da variância para a resistência à tração na flexão para diferentes misturas.

Análise linear					
Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Mistura	4	4,130	1,0325	6,82	0,002
Erro	15	2,271	0,1514	-	-
Total	19	6,402	-	-	-

*Graus de liberdade; **Soma de quadrados; ***Quadrado médio

Fonte: autoria própria (2023).

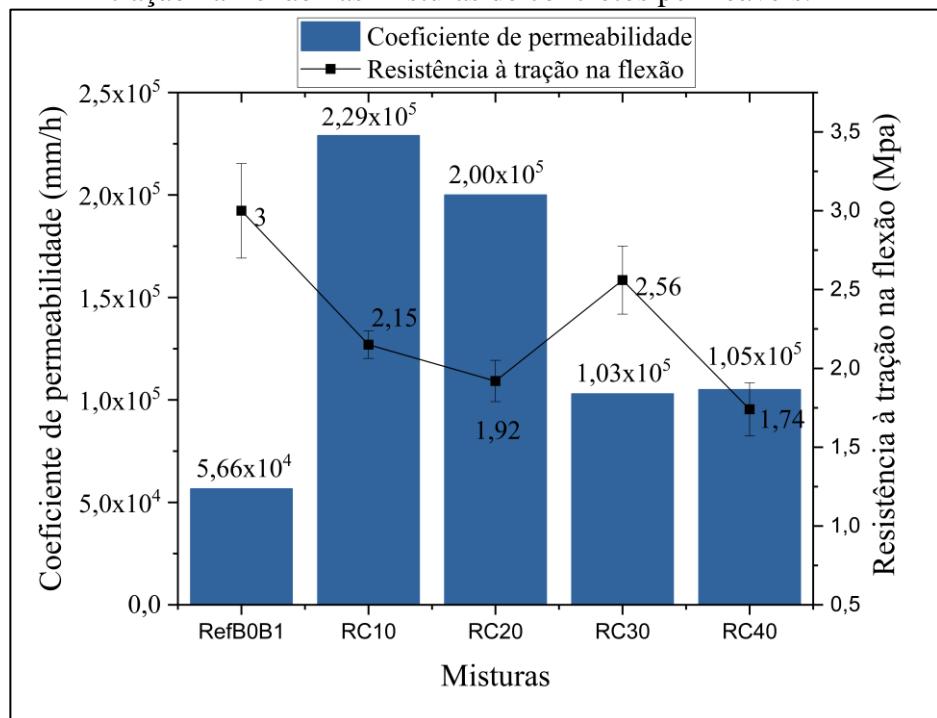
Pela Tabela 28 verifica-se que o Valor-p foi igual a 0,002, esse foi menor que 0,05 (5%), logo a confiabilidade desse resultado é maior que 95%. Assim, pode ser afirmado que o fator substituição de RC pelo agregado graúdo influencia na resistência à tração na flexão das misturas analisadas.

Após esses resultados foi possível analisar a relação existente entre resistência à tração na flexão e o coeficiente de permeabilidade da mistura, apresentada no item seguinte.

5.6.2 Relação entre resistência à tração na flexão e coeficiente de permeabilidade

O gráfico da Figura 34 apresenta a relação entre o coeficiente de permeabilidade e a resistência à tração na flexão para diferentes misturas.

Figura 34 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à tração na flexão nas misturas de concretos permeáveis.



Fonte: autoria própria (2023).

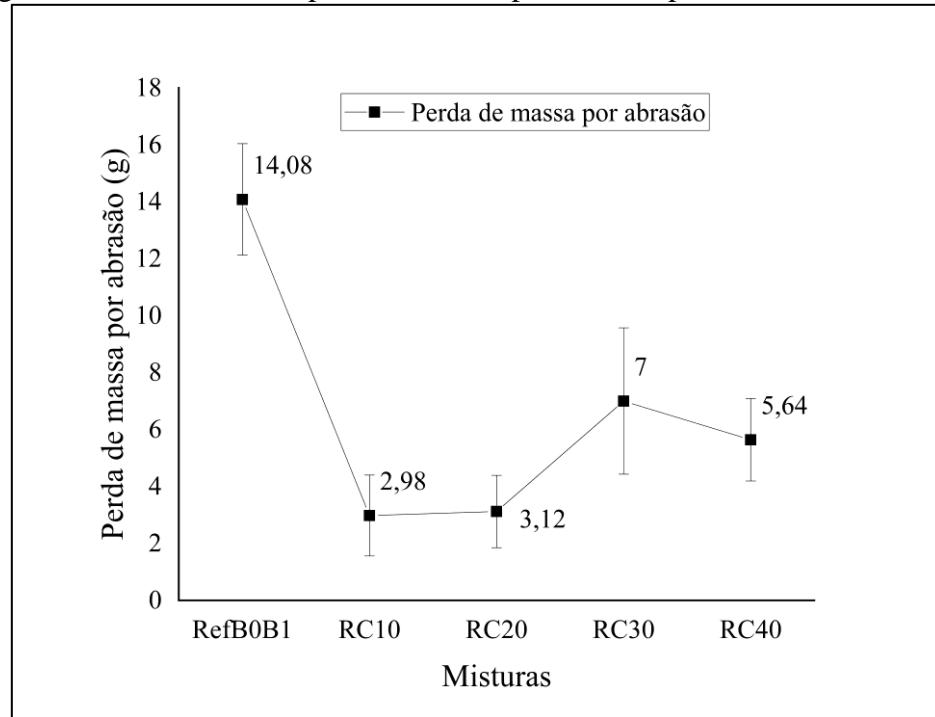
No gráfico da Figura 34 o eixo Y à esquerda corresponde aos valores do coeficiente de permeabilidade no estado seco, apresentados por meio de barras e discutido no item 5.3. Enquanto o eixo Y à direita refere-se aos valores da resistência à tração na flexão. Por vez, o eixo X apresenta as amostras que foram analisadas.

Pela Figura 34 percebe-se que assim como nas análises anteriores os maiores valores de resistência corresponderam as misturas que obtiveram menores coeficientes de permeabilidade. Entretanto, essa relação foi não linear, isso é justificado pela formulação dos vazios que está diretamente relacionada com a granulometria dos componentes e a energia de adensamento das misturas (FARIA *et al.*, 2019)

5.7 Perda de massa por abrasão

O gráfico da Figura 35 apresenta os resultados da perda de massa por abrasão para diferentes misturas.

Figura 35 - Resultados da perda de massa por abrasão para diferentes misturas.



Fonte: autoria própria (2023).

Pela Figura 35 é notório que o desgaste superficial gerou maior perda de massa para a mistura referência (RefB0B1). Já nas misturas com substituições de RC houve uma menor perda de massa, isso pode ser justificado pela maior compacidade entre os agregados e o RC.

Ao analisar as misturas com RC percebe-se que a menor perda de massa foi de 2,98g referente a RC10 e a maior perda ocorreu para a mistura RC30 com 7g. Para as demais misturas os valores foram os seguintes: 3,12g para RC20 e 5,64g para RC40.

Após análise desses resultados foi perceptível que a introdução do resíduo contribuiu para que não houvesse a perda de massa. Isso pode ser justificado por Tavares e Kazmierzack (2016) e Lima *et al.* (2006) que afirmaram que componentes finos ao serem introduzidos no concreto permeável acarreta em maior coesão da mistura de tal forma que contribui para um melhor entrosamento, partindo desse contexto pode-se afirmar que o material fino existente em torno da birra contribuiu para esse fato, fazendo com que não houvesse um desprendimento quando o concreto estivesse submetido a um desgaste abrasivo.

Segundo Silva *et al.* (2018) a introdução de finos (10% de metacaulim) em concretos permeáveis fez com que houvesse uma menor perda de massa pelo desgaste abrasivo, chegando a um ganho de 3,30%. No tocante a critérios normativos a NBR 16416

(ABNT, 2016) e a ACI 522R (2010) não estabelece limites para as perdas por desgaste à abrasão.

Ainda acerca da análise numérica pode ser realizado o comparativo do ganho de massa que as misturas com RC obtiveram em relação ao RefB0B1. A Tabela 29 apresenta os valores da perda de massa por abrasão (PA), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para as misturas estudadas.

Tabela 29 - Análise da perda de massa por abrasão para diferentes misturas.

Misturas	Média (g)	PA* %	DP** (g)	CV*** %
RefB0B1	4,38	-	1,96	45
RC10	2,98	-31,96	1,43	48
RC20	3,12	-28,77	1,28	41
RC30	4,12	-5,94	2,58	63
RC40	3,64	-16,89	1,45	40

*PA = Perda de massa por abrasão; **DP = Desvio padrão; ***CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2023).

Pela Tabela 29 pode ser concluído que todos os valores referentes à perda de massa por abrasão para as misturas com RC foram negativos ao serem comprados com a amostra referência, ou seja, houve menos perda de massa para as misturas com RC.

Em termos percentuais a amostra RC10 teve acréscimo de massa de 31,96%, o maior dentre as misturas. Enquanto a RC30 foi a que obteve menor ganho (5,94%). Os demais valores foram respectivamente iguais a: 31,96% para RC10; 28,77% para RC20 e de 16,89% para RC40.

Em termos de desvio padrão dos resultados encontrados, o maior valor foi referente a mistura RC30 (2,58g). Já o menor desvio padrão ocorreu para a mistura RC20 (1,28g). Os demais desvios também foram altos sendo respectivamente iguais a: 1,96g para RefB0B1; 1,43g para RC10 e 1,45g para RC40.

Assim como os desvios padrão, os coeficientes de variação também foram elevados sendo o menor deles igual a 40%, referente a amostra RC40 e o maior igual a 63% da amostra RC30. Os demais valores foram iguais a 45% da RefB0B1; 48% da RC10 e 41% da RC20.

Segundo Delfino (2022) para elevados coeficiente de variação é necessário realizar análise de variância para saber a confiabilidade dos resultados. Logo, foi realizada

uma análise de variância (ANOVA) sobre os resultados para entender se o fator substituição é significativo nas respostas de resistência à abrasão (Tabela 30).

Tabela 30 - Resultados da variância para a perda de massa por abrasão para diferentes misturas.

Análise linear					
Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Mistura	4	7,418	1,855	0,57	0,687
Erro	20	65,064	3,253	-	-
Total	24	72,482	-	-	-

*Graus de liberdade; **Soma de quadrados; ***Quadrado médio

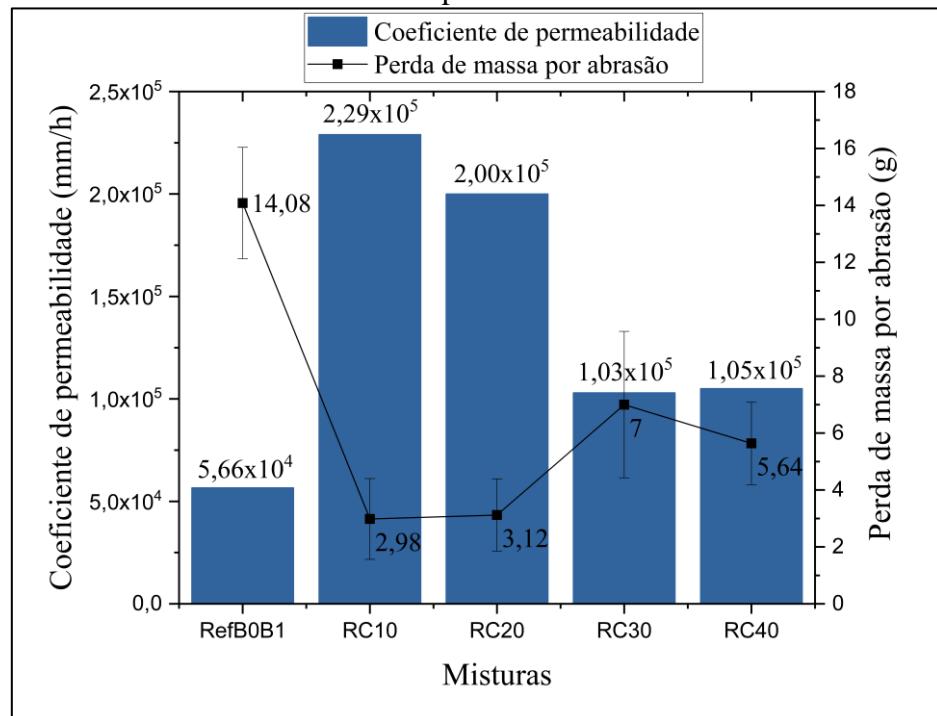
Fonte: autoria própria (2023).

Pela Tabela 30 verifica-se que o Valor-p foi igual a 0,687, esse valor foi maior que 0,05 (5%). Assim, pode ser afirmado que o fator substituição de RC pelo agregado graúdo não influencia na resistência à abrasão das misturas analisadas. Isso pode ser justificado pela adaptação realizada no procedimento experimental que derivou resultados com discrepância entre si.

5.7.2 Relação entre resistência à abrasão e coeficiente de permeabilidade

Na Figura 36 está apresentado o gráfico que relaciona os resultados do coeficiente de permeabilidade no estado seco e a perda de massa por abrasão. Nesse gráfico o eixo Y à esquerda apresenta os valores do coeficiente de permeabilidade (mm/h) e o eixo Y à direita os valores da perda de massa por abrasão (g). Já o eixo X faz referência as misturas estudadas.

Figura 36 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e a perda de massa por abrasão.



Fonte: autoria própria (2023).

Pelo gráfico da Figura 36 pode ser observado que as menores perdas de massa ocorreram para as amostras que apresentaram maiores coeficientes de permeabilidade, a exemplo das misturas RC10 e RC20. Esse fato ocorreu ao contrário do que era esperado, pois a menor compacidade entre os agregados dessas misturas deriva menor entrosamento entre os grãos e assim maior facilidade de desprendimento no momento do desgaste abrasivo.

Após toda análise do estado fresco e endurecido foi constatado diferentes respostas sobre as misturas analisadas. O capítulo seguinte fará uma recapitulação desses resultados, apresentando as conclusões obtidas nesta pesquisa.

6 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado, é possível destacar as seguintes conclusões:

- ✓ A introdução do RC nas misturas contribuiu para uma melhor trabalhabilidade do concreto permeável, sendo a mistura RC40 a que obteve melhor desempenho;
- ✓ No tocante ao índice de vazios, todas as misturas que tinham RC apresentaram menos vazios que a mistura referência, entretanto, as amostras RC30 e RC40 foram as que apresentaram menor decréscimo, com 26,67 e 20,00%, respectivamente, e isso não comprometeu a permeabilidade das misturas;
- ✓ Quanto à permeabilidade, todas as misturas obtiveram coeficientes maiores que a mistura referência, tanto para o estado saturado quanto para o estado seco, sendo a mistura RC10 a que obteve maiores coeficientes de permeabilidade com valor igual a $2,29 \times 10^5$ para o estado saturado e $1,47 \times 10^5$ para o estado seco. Esses valores são maiores que os exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015);
- ✓ Ainda sobre a permeabilidade, pôde-se concluir que os melhores desempenhos drenantes se procederam nas misturas RC10 e RC30, sendo a mistura RC30 a que apresentou menor variação entre os coeficientes encontrados em seu estado seco e saturado;
- ✓ Em relação à resistência à compressão uniaxial todas as misturas obtiveram resultados maiores que o mínimo esperado pela NBR 16416 (ANT, 2015), sendo a mistura RC30 a que teve maior resultado dentre as misturas com RC, atingindo o valor de 9,44 MPa. Quanto à resistência à tração por compressão diametral todas as amostras obtiveram resultados superiores ao limite estabelecido pela NBR 16416 (2015), sendo a amostra RC10 a que obteve melhor desempenho, com um valor igual a 4,10 MPa. Para a resistência à tração na flexão todos os valores também foram maiores que o limite mínimo estabelecido pela NBR 16416 (2015), sendo o maior deles o referente a mistura RC30, com 2,56 MPa;
- ✓ Na resistência à abrasão todas as misturas com RC obtiveram menores perdas de massa que a mistura referência, sendo que a menor perda se procedeu para a amostra RC10;
- ✓ Como o objetivo principal da pesquisa foi a aplicação do concreto permeável em pavimentos permeáveis e esse sofrerá esforços de compressão e flexão, a mistura RC30 torna-se a mais interessante para utilização, pois teve bom desempenho

drenante e menor decréscimo de resistência à compressão uniaxial e à tração na flexão. Assim, a mistura RC30 é a mais eficiente para aplicação em concretos permeáveis para pavimentos permeáveis de vias urbanas.

- ✓ A análise da variância (ANOVA) comprovou a significância da variação das substituições de RC nos resultados de coeficiente de permeabilidade e de resistência, com exceção da perda de massa por abrasão.

Ao fim da avaliação experimental, pôde-se concluir, que o resíduo de caulim (RC) ao ser introduzido em misturas de concreto permeável contribuiu nas suas propriedades drenantes sem comprometer o desempenho mecânico. Desse modo, o RC é viável para ser utilizado em misturas de concretos permeáveis. Além disso, a mistura RC30 apresentou acréscimo do coeficiente de permeabilidade e menor variação de resultados no desempenho mecânico dos ensaios de resistência à compressão uniaxial e tração na flexão, o uso dessa porcentagem ainda garante maior volume de RC reciclado.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Investigação de outras misturas com proporções maiores que 40% de RC;
- ✓ Avaliação de misturas de concreto permeável com RC e pozolanas para investigar possíveis contribuições nas resistências;
- ✓ Investigar a influência das propriedades mineralógicas e químicas do RC nas propriedades físicas e mecânicas de concretos permeáveis;
- ✓ Utilização de diferentes resíduos da indústria na composição de concretos permeáveis para reciclagem desses;
- ✓ Metodologias para dosagem de concretos permeáveis;
- ✓ Elaboração de equações que proporcione uma correlação entre as resistências mecânicas para concretos permeáveis;
- ✓ Aprimoramento da adaptação realizada no ensaio de perda de massa por abrasão;
- ✓ Montagem de protótipos de pavimentos permeáveis com intuito de analisar a funcionalidade in loco para diferentes tipos de solos.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, Elisandro; LUZ, Caroline Angulski da. **Partial replacement of CPV-ARI cement by water treatment plant sludge (WTS)**. Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 1-9, ago. 2020.

ALMEIDA, Kayrone Marvila de; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; CASTRO, Nuria Fernández. **Use of kaolin residue in concrete composition**. In: xxv jornada de iniciação científica e i jornada de iniciação em desenvolvimento tecnológico e inovação, 25., 2016, Campina Grande: 2016. p. 1-5.

ALVES. Priscila B. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. 2016. 90f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2016.

American Concrete Institute (ACI). **ACI 522R: guide for selecting proportions for no slump**. Farmington Hills, 2010.

_____. **ACI 522R-06: pervious concrete**. Farmington Hills, 2006.

American Society For Testing And Materials. ASTM C1747/C1747M: **Standard test method for determinig potential resistance to degradation of pervious concrete by impactand abrasion**. West Conshohocken, 2011.

_____. C944/C944M – 12: **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method**. West Conshohocken: Astm International, 2012. 5 p.

ANDRADE, Laís Bento de. **Análise das propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido utilizando resíduo de caulim**. 2019. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. **Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 2, p. 91–96, 2011.

ARAÚJO, Jociane da Silva. **Estudo de dosagem de concreto permeável para pavimento leve incorporando metacaulinita como substituto parcial do cimento**. 2019. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

ARAÚJO, Jorge Corrêa de; ASSIS, Joaquim Teixeira de; MONINE, Vladimir Ivanovitch; BERTOLINO, Luiz Carlos. **Caracterização da microestrutura de caulinitas pela difração de raios x**. In: MATERIA, 20., 2006, Rio de Janeiro: 2007. p. 1-11.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021. 15 p.

_____. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: 2001. 17 p.

_____ **NM 53:2009:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados graúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____ **NBR 7211:** Agregados para concretos - requisitos. Rio de Janeiro: Não Tem, 2022. 10 p.

_____ **NBR 16915:** Agregado miúdo - determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: 2021. 7 p.

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

_____ **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____ **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____ **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 16 p.

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

_____ **NBR 12142:2010:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____ **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. v. 1.

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

_____ **NBR 5738:** Concreto - Procedimento de moldagem e curo de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2021. 13 p.

AQUINO, Samuel Medeiros de *et al.* **Estudo do uso do resíduo de caulim nas propriedades de concreto permeável (POROSO).** In: SIMPÓSIO DE PESQUISA INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO DO IFPB, 3., 2019, João Pessoa, 2019. p. 1-11.

AZAÑEDO, W.H.M., HELARD, C.H., MUÑOZ, R.G.V., **Diseño de mezcla de concreto poroso con agregados de la cantera La Victoria, cemento pótland tipo i con adición de tiras de plástico, y su aplicación en pavimentos rígidos, en la Ciudad de Cajamarca,** Universidade Nacional de Cajamarca, 2007

AZERÉDO, Aline Figueirêdo Nóbrega de. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais.** 2012. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** 2013. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

BATEZINI, R. *et al.* Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 248-259, 12 jun. 2015.

BATEZINI, Rafael *et al.* **Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement.** Ambiente Construído: Ambiente construído, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 177-194, jun. 2021.

BAUER, A. L. *et al.* **Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended.** Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 464-482, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000300002>.

BENEVENUTO, Andrey. **Concreto permeável: UFF pesquisa soluções para uma urbanização sustentável.** 2018. Disponível em: <https://www.uff.br/?q=noticias/15-08-2018/concreto-permeavel-uff-pesquisa-solucoes-para-uma-urbanizacao-sustentavel>. Acesso em: 02 jan. 2023.

B. Huang, H. Wu, X. Shu, E.G. Burdette, **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete**, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 818–823. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025.

CHANDRAPPA A.K., BILIGIRI K.P., **Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state of the art review**, Constr. Build. Mater. 111 (2016) 262–274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.

CANDIAN FILHO, Edison Luis *et al.* **Concreto permeável com areia descartada de fundição: propriedades mecânicas e hidráulicas.** Revista Matéria, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 1-14, 12 ago. 2021. doi.org/10.1590/S1517 707620220001.1354

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CASTRO, R. J. S. **Efeito da adição de feldspato e/ou resíduo de caulim em formulações à base de argila Ilítica.** 2010. 140f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CORRÊA, Karine Coelho. **Mechanical properties and microstructures of stoneware ceramics submitted to different conditions of sintering.** 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2007.

COSTA, F. B. P. *et al.* **Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests.** Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1-9, 22 mar. 2019.

DELATTE, N.; MILLER, D.; MRKAJIC, A. **Portland cement pervious concrete pavement: field performance investigation on parking lot and roadway pavements.** Cleveland: Rmc Research & Education Foundation, 2007. 76 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 064:** Pavimento rígido - Determinação da trabalhabilidade do concreto pelo consistômetro VeBe - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

DICIO. Significado de Permeável. 2017. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/permeavel/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

DICIO. Significado de Poroso. 2017. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/poroso/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

DUTRA, Carinne; MOREIRA, Damião Santos; SANTOS, Daniel Araújo; AGUIAR, Eduardo Albuquerque. **O efeito do índice de vazios e do coeficiente de permeabilidade nas propriedades mecânicas de concretos permeáveis.** 2021. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, São Judas Universidade, São Paulo, 2021.

ESTEVES, R. L. **Quantificação das superfícies impermeáveis em áreas urbanas por meio de sensoriamento remoto.** 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

FARIA, Andréia da Conceição de. **Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo da resistência.** In: 33º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. 2019. v. 33, p. 1-12.

FERGUSON, B. K. **Porous Pavements: integrative studies in water management and land development.** London: Taylor & Francis., 2005. 577 p.

FERNANDES, Wellington Emílio Hilarino. **Concreto permeável para aplicação em pavimentação intertravada a partir de concreto de pós reativos - CPR.** 2019. 84 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

FOGEIRO, Jéssica Simões. **Cidade-esponja: aplicação do conceito e métodos no bairro Marechal Gomes da Costa, Porto.** Dissertação de M.Sc. em Arquitetura Paisagista. Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2019.

GALDINO, Luciana Mattos dos Anjos. **Drenagem urbana na área da Praça da Cruz Vermelha: um estudo de caso da aplicação do conceito de cidades esponjas para atenuação de alagamentos.** 2022. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. **Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete.** Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 68, p. 701-708, out. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.001>. Acesso em: 28 jan. 2023.

Gardolinski, J. E., Filho, H. M. P., Whypych, F., (2003) **Comportamento Térmico da Caulinita Hidratada.** Química Nova, Vol, 26 1: 30-35.

G.F.B. Sandoval, I. Galobardes, R.S. Teixeira, B.M. Toralles, **Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes**, Case Stud. Constr. Mater. 7 (2017) 317–328. doi:10.1016/j.cscm.2017.09.001.

GONÇALVES, Micheli S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** Dissertação (Mestrado em engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2011.

HOLTZ, F. C. (2011) **"Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental"**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharias.

H. Li, M. Kayhanian, J.T. Harvey, **Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods**, J. Environ. Manage. 118 (2013) 144–152. doi:10.1016/j.jenvman.2013.01.016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censos demográficos.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/calenario>. Acesso em: 10 jan. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2020.** 2020. Disponível em: <https://saudeamanha.fiocruz.br/censo-2020/#.Y71R4XbMLIU>. Acesso em: 10 jan. 2023.

INTERNACIONAL CONCRETE ABSTRACTS PORTAL. **522R - 10: Report on pervious.** ACI, 2010. 38 p.

JANUSZKIEWICZ, K. & GOLEBIESKI J. (2019). **"Water Sensitive City"** Within City as A Strategy for Activate Polluted Urban Areas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 10, 471.

JINDAL; RANSINCHUNG. **Behavioural Study of Incorporation of Recycled Concrete Aggregates and Mineral Admixtures in Pavement Quality Concrete.** Civil Engineering Infrastructures Journa, Theran, v. 2, n. 55, p. 351-372, jan. 2022.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R.. **Clogging in permeable concrete: A review.** Journal of Environmental Management, Reston, v. 193, p. 221-233, maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>. Acesso em: 22 dez. 2022.

KONAN, K. L.; PEYRATOUT, C.; SMITH, A.; BONNET, J. P.; ROSSIGNOL, S.; OYETOLA, S., **Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solutions.** Journal of Colloid and Interface Science, vol. 339, p. 103-109, 2009.

LAMB, Gisele Santoro. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LEANDRO, A. P. *et al.* **Estudo do resíduo de caulim pegmatítico usado como ingrediente na formulação de cimento portland**. Holos. Natal, p. 224-232. nov. 2017.

LIAN, C. ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation**. Elsevier Journal Construction and Building Materials, 2010.

LI, Leo Gu *et al.* Pervious concrete: effects of porosity on permeability and strength. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 73, n. 2, p. 69-79, jan. 2021. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.19.00194>.

LIN, Chen-Han; YU, Jason. **Research on improving polymer pervious concrete mechanical strength by adding EVA to UP resin binder material**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 359, p. 129416, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129416>.

LÔBO, Dyovana Pereira; SILVA, Thaise Ribeiro da. **Análise do concreto com substituição parcial do agregado miúdo natural pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2021. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Gianésia, Goianésia, 2021.

P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, **Concrete: microstructure, properties, and materials**, 2006. doi:10.1036/0071462899.

MARTINS FILHO, S. T. *et al.* **Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 483-500, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000300003>.

MAUÁ *et al.* **Concreto permeável: qual sua função, vantagens e desvantagens**. 2017. Disponível em: https://cimentomaua.com.br/concreto-permeavel-qual-funcao-vantagens-desvantagens/?fb_comment_id=1698490020217773_3250925621640864. Acesso em: 11 jan. 2023.

Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. M. (2008) **"Concrete, Microstructure, Properties and Materials"** São Paulo: Ibracon.

MENDONÇA, F. **Riscos, vulnerabilidade e abordagem sócio ambiental urbana: uma reflexão a partir da RCM e de Curitiba**. Desenvolvimento e meio ambiente. Cutitiba: UFPR. n. 10, p. 139-148. Oct. 2004.

MENEZES, R. R. *et al.* **Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos**. Revista Matéria (Rio de Janeiro), v. 12, n. 1, p. 226–236, 2007.

MERIGHI, João Virgilio; FORTES, Rita Moura; BANDEIRA, Alex. **Estudo de propriedades do concreto poroso aplicado a pavimentação.** In: IBRACON, 2006, Rio de Janeiro - RJ. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo - SP, 2006.

MONTEIRO, Anna Carolina Neves. **Concreto poroso: dosagem e desempenho.** 2010. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

M. S. LIMA; G. A. NEVES; J. B. Q de CARVALHO. **Utilização do resíduo de caulin para uso em blocos de concreto sem função estrutural.** In: Congresso Brasileiro De Cerâmica, 50., 2006, Blumenau: 2006. p. 1-9.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA), 2010. **Pervious Concrete.** Disponível em: <www.perviouspavement.org>. Acesso em: 11 jan. 2023.

NÓBREGA, A. F. DE. **Potencial de aproveitamento de resíduos de caulin paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba, 2007.

OLIVEIRA, Daniela Dolovitsch de. **Análise do desempenho mecânico em concretos permeáveis com substituição parcial do agregado graúdo por resíduo da construção civil.** 2017. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijui, Ijuí, 2017.

PATRÍCIO, Aline Cadigena Lima. **Potencial de adsorção do resíduo do beneficiamento do caulin.** 2016. 78 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

PEREIRA, Katrine Krislei; BARBOSA, Monica Pinto. **desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de campinas.** In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Campinas, 2015. p. 1-6.

PILS, S. E. *et al.* Pervious concrete: **study of dosage and polypropylene fibers addiction.** Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 1, p. 101-121, jul. 2018.

POLASTRE, B.; SANTOS, L.D. **Concreto Permeável.** São Paulo: Universidade de São Paulo. 2006.

RAMOS, Gustavo Moreira. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de agregado miúdo e resíduo (cinza de madeira).** 2018. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

REZENDE, M. L. *et al.* **Utilização do resíduo de caulin em blocos de vedação.** Revista Escola de Minas, v. 61, n. 3, p. 285–290, 2008.

REZENDE, M. L. S. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade**, Campina Grande-PB, 2013. Tese de doutorado. UFCG.

RIBEIRO, Aline. **Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

ROCHA, A. K. et al. **Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico**. Revista Escola de Minas, v. 61, n. 4, p. 505–512, 2008.

RODRIGUES, Dardania Aparecida Evangelista. **Efeitos da adição de metacaulim na absorção capilar e profundidade de carbonatação de concretos**. 2014. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANDOVAL, G. F. B. et al. **Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1-9, jun. 2019.

SANTOS, L. C. M. L.; MOURA, E. N.; VIEIRA, F. F.; GENUÍNO, V. A.; SALES, E. D. G. **Síntese das principais ocorrências minerais de pegmatitos no seridó (PB-RN)**. In: IV Simpósio de minerais industriais do Nordeste. João Pessoa, PB. 2016. Rio de Janeiro: CETEM, 2016.

SANTOS, Rafael Reinheimer dos. **Estudo da resistência mecânica do concreto permeável com substituição de agregado natural por agregado reciclado**. 2017. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa, 2017.

SCHACKOW, Adilson et al. **Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: reduction of surface flow and possible applications**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 250, p. 118896, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118896>.

SCHWETZ et al. **Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve**. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DA PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 13., Lisboa, 2015.

SENAI-RS, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – **Procedimentos para ensaio de abrasão conforme norma DIN 53.516**. 2014. Disponível em: https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/procedimentos_para_ensaio_de_abrasao_conforme_norma_din_53.516.pdf. Acesso em: 05 jan. 2023.

SILVA, Luzilene Souza et al. **Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado gráuado regional**. RCT-Revista de Ciência e Tecnologia, v. 5, n. 8, 2019. ISSN 2447-7028

SILVA, Rodrigo Garozi et al. **Concreto permeável: principais características e aplicação em pavimentação.** Revista Científica ANAP Brasil, v. 12, n. 26, 2019. ISSN 1984-3240

SOUSA, Claudemir Máximo de; BAHIENSE, Henrique Silveira. **A utilização do concreto permeável na drenagem urbana.** 2013. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Doctum de Educação e Tecnologia, Caratinga, 2013.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 240 p.

TAVARES, L. M. e KAZMIERCZAK, C. S. **Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis,** Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 9, n.1, p. 75-89, 2016.

TECNOSIL. **Concreto permeável: o que é e quais são seus atrativos?** 2022. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/concreto-permeavel-o-que-e-e-quais-seus-grandes-atrativos/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

P.D. Tennis, M.L. Leming, D.J. Akers, **Pervious Concrete Pavements**, 2004. http://myscmappsc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf.

PILS, S. E. et al. Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 101-121, fev. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952019000100009>.

TUCCI, C. E. M. **Parâmetros dos hidrogramas unitário para bacias urbanas brasileiras.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 8, n.2, p. 195-199, 2003.

TUCCI; C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas: saneamento para todos.** 4. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005.

US GEOLOGICAL SURVEY. **Ciclo da água.** Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em: 10 jan. 2023.

VIDAL, Almir dos S. **Caracterização de concreto permeável produzido com resíduos de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano.** Rio de Janeiro, 2014. 132f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

XU CAI et al. **Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base.** Road Materials and Pavement Design, v. 22, n. 10, p. 2181-2196, 2021. doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193.

YI ZHANG *et al.* **Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete.** Construction and Building Materials, v. 266, p. 121074, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121074>.

ZAETANG, Yuwadee *et al.* **Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, v. 111, p. 15-21, 2016.

ZHANG, Yi *et al.* **Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete.** Construction and Building Materials, v. 266, p. 121074, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121074>

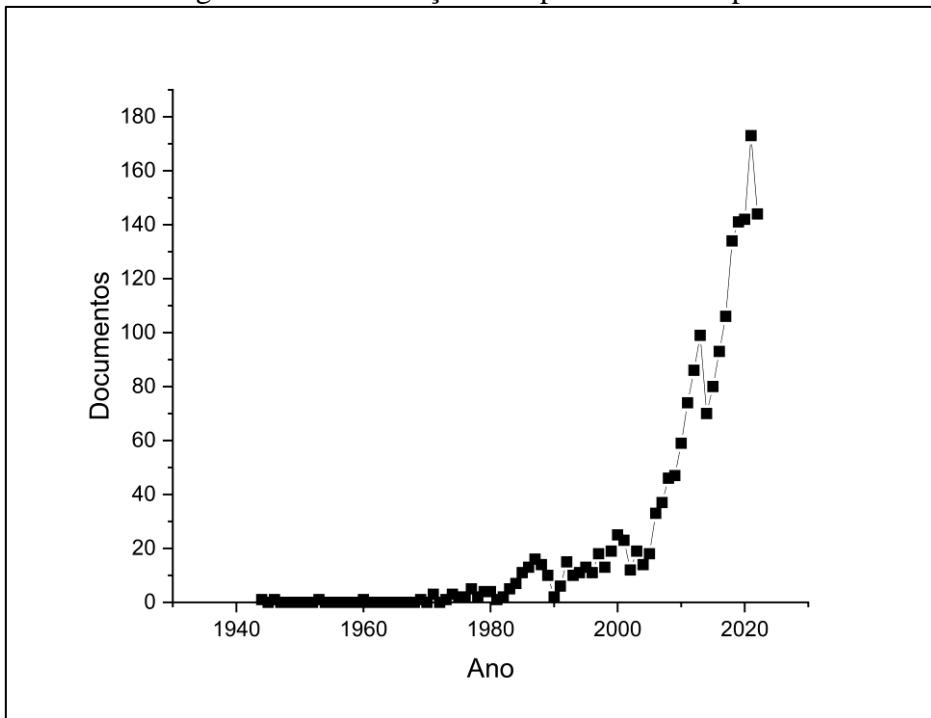
ZHAO, Jinhui *et al.* **Novel Backwashing maintenance method for Permeable concrete pavement: Two-Year field study.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 146, n. 4, p. 04020003, 2020. [Doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001456](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001456).

APÊNDICE A – MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO

1. Amostragem da literatura

Com base em pesquisa bibliográfica realizada na base de dados Scopus foi constatado um total de 1.900 estudos a partir das palavras de busca: *concrete* e *permeability* e a Figura A1 apresenta a evolução do número de documentos publicados sobre essas palavras.

Figura A1 – Publicações em período de tempo.



Fonte: autoria própria (2023).

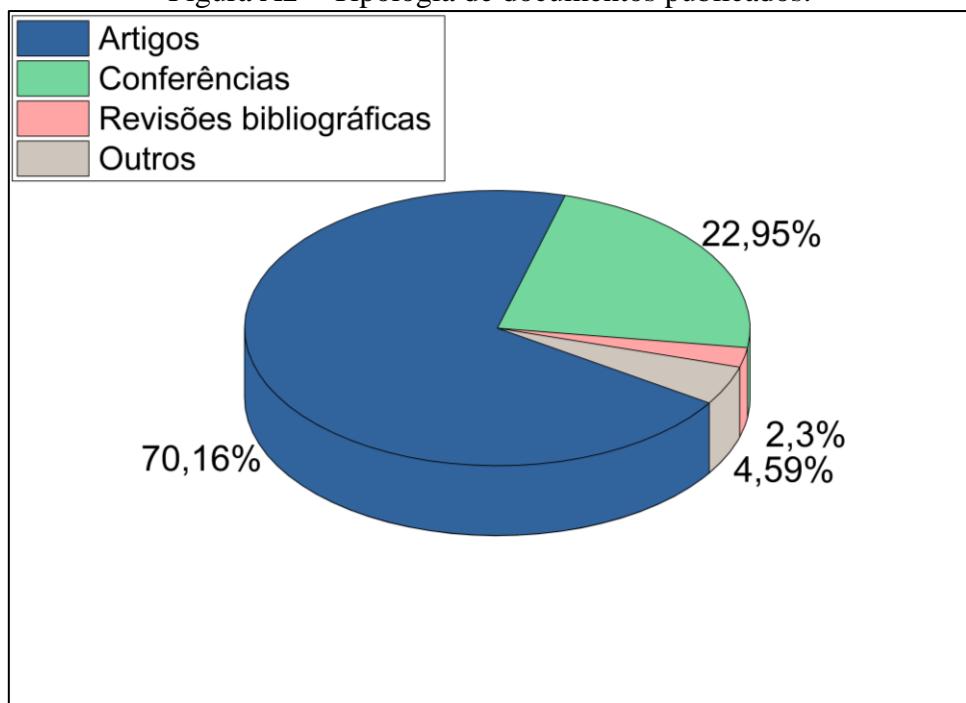
Pela Figura A1 é possível constatar que a primeira publicação é datada em 1944, entretanto, com pequena quantidade de trabalhos e em determinados anos nulos. Mas, partir de 2013 houve crescimento no número de trabalhos publicados e no ano de 2021 pode ser observado o maior registro, com 171 publicações, e a tendência é que esses números aumentem nos próximos anos.

Pela Figura A1 percebe-se que a maior densidade de estudos ocorreu nos últimos 10 anos. Dessa perspectiva procedeu a primeira filtragem de dados correspondente ao período de publicação de 2013 à 2022, no qual foram obtidas 1.187 pesquisas. A partir disso foi realizada uma análise centimétrica sobre as pesquisas existentes, com intuito de realizar mais uma síntese de estudos.

2. Análise Centimétrica

A metodologia centimétrica consiste em apresentar amostragens referentes as palavras-chaves, fontes de publicações, artigos, tipologia, países e instituições que mais publicaram acerca da temática em estudo. Nessa perspectiva, é possível apresentar na Figura A2 um panorama geral da tipologia de documentos presentes nos estudos sobre as palavras de busca *concrete* e *permeability*.

Figura A2 – Tipologia de documentos publicados.



Fonte: autoria própria (2023).

Na Figura A2 constata-se que mais de 70% das pesquisas estão em formato de artigos, seguido de 22,95% de pesquisas apresentadas em conferências, 2,3% em revisões bibliográficas e 4,59% em outros (cartas, livros e capítulos de livros). Por meio dessa análise foi realizada uma segunda filtragem de amostras, na qual buscou analisar apenas os artigos, já que esses, em sua maioria, são derivados de publicações como trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses, resultando em uma amostra de 835 trabalhos.

A partir dessa amostragem foi feita uma análise sobre as palavras chaves usadas por essas pesquisas, para que fosse possível identificar quais trabalhos estavam em consonância com o conteúdo sobre concretos permeáveis.

2.1 Palavras chaves

As palavras de busca representam a ferramenta de captura para pesquisar determinado conteúdo. Nessa revisão sistemática foram encontradas 534 palavras, após exclusão das ocorrências de repetições. As dez palavras-chave com maior frequência na base Scopus estão apresentadas na Tabela A1.

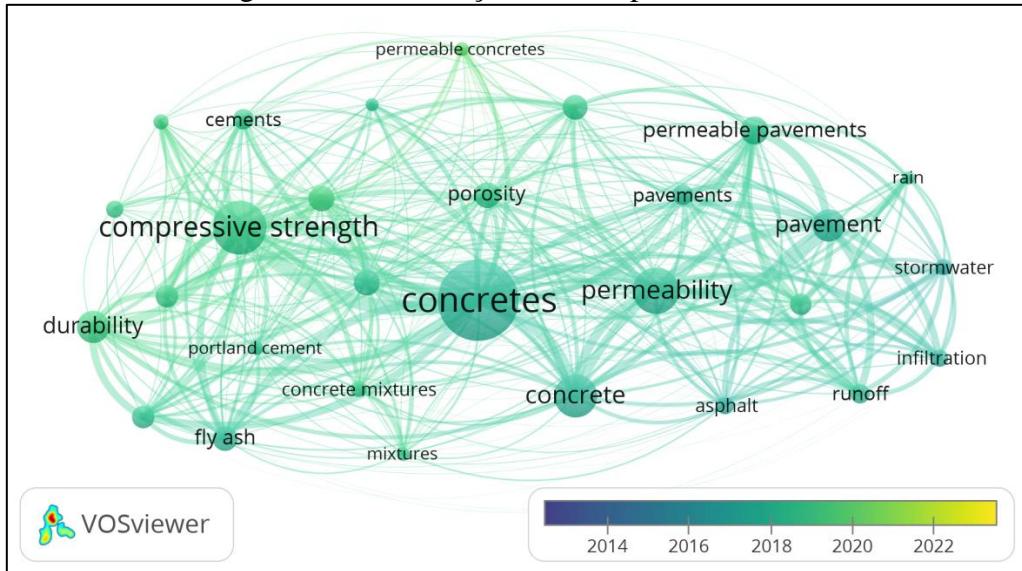
Tabela A1 – Palavras-chave com maior frequência.

Ordem	Palavra-chave Inglês	Número de ocorrências	Acesso total de links
1	Concretes	472	3536
2	Compressive strength	203	2408
3	Permeability	178	2379
4	Durability	123	1423
5	Pavement	122	2023
6	Permeable pavements	109	1552
7	Aggregates	98	1263
8	Concrete aggregates	98	1318
9	Porosity	98	1140
10	Pervious concrete	97	5058

Fonte: VOSviewer (2023).

Após análise da Tabela A1 pôde-se concluir que as palavras: concretos, resistência à compressão e permeabilidade são as que mais se repetem nas buscas da base dados. A partir disso, foi possível estabelecer uma correlação entre as palavras-chave pelo programa VOSViewer (Figura A3), no qual foi estabelecido o número mínimo de ocorrência igual 50, que retornou um número de *Cluster* igual a dois estabelecendo duas divisões das palavras-chave: uma em relação a materiais construtivos e outra em relação a rede de drenagem.

Figura A3 – Correlação entre as palavras-chave.



Fonte: VOSviewer (2023).

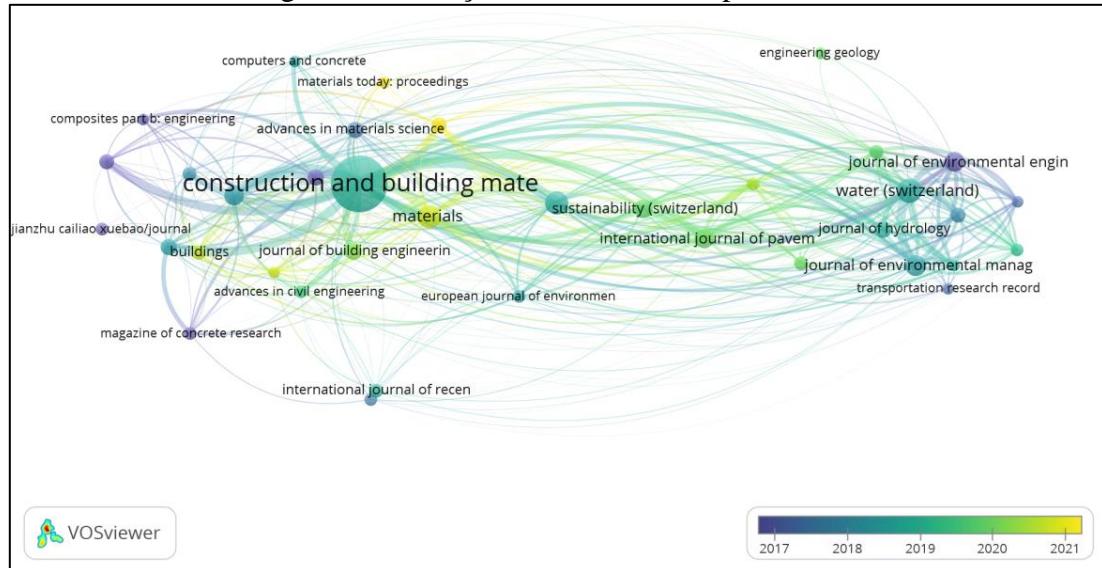
Ainda na Figura 3 percebe-se que a maior concentração de palavras-chave ocorreu entre os anos de 2016 e 2020.

2.2 Fontes dos documentos

Além da análise entre as palavras chaves foi possível fazer uma pesquisa sobre as fontes dos documentos e foram encontradas 330 fontes relacionada ao tema concreto permeável.

Entretanto, foi realizada uma restrição de número mínimo de citações desses documentos igual a 5, reduzindo o número para 38 periódicos com força total de conexão entre um periódico e outro apresentada na Figura A4.

Figura A4 – Força de conexão entre periódicos.



Fonte: VOSviewer (2023).

Pela Figura A4 é possível realizar a análise temporal para encontrar em quais anos ocorreu mais intensidade de publicações e citações sobre concretos permeáveis, que nesse caso correspondeu entre os anos de 2017 e 2019.

Percebe-se que o periódico mais influente em quantidade de citações sobre o tema de concretos permeáveis foi a “*Construction and Building Materials*” com 3.769 citações e 112 documentos, seguido da “*Journal of Cleaner Production*” com 893 citações e 18 documentos e da “*Journal of Environmental Management*” com 549 citações e 15 documentos. A Tabela A2 apresenta os dez principais periódicos com maior número de citações sobre concreto permeável.

Tabela A2 – Periódicos com maior frequência de citações.

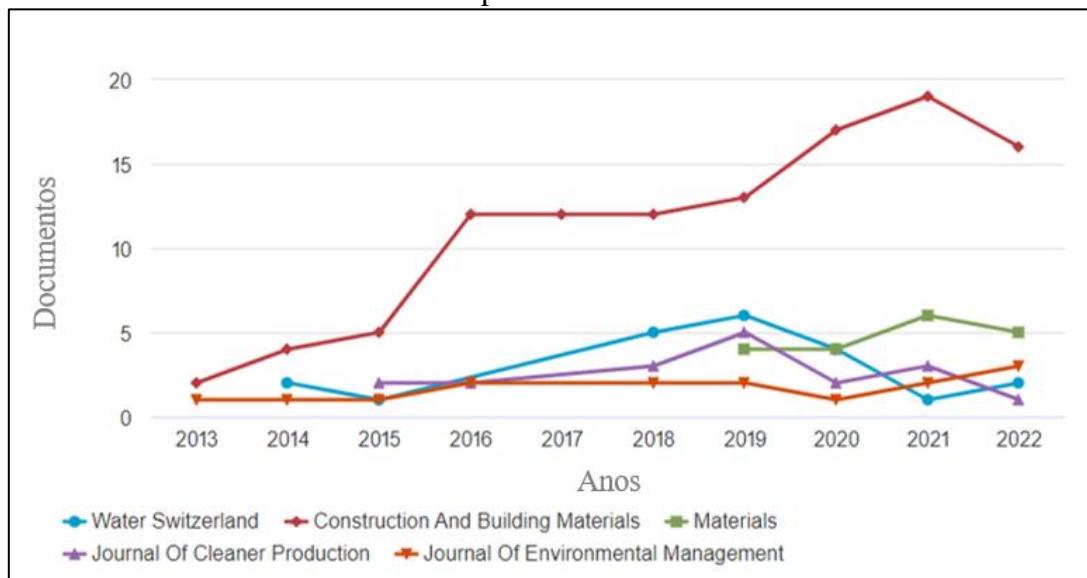
Ordem	Fonte	Documentos	Citações	Total de força de link
1	construction and building materials	112	3769	780.93
2	journal of cleaner production	18	893	197.46
3	journal of environmental management	15	549	225.12
4	journal of environmental engineering (united states)	13	346	175.14

5	materials and structures/materiaux et constructions	9	312	89.00
6	cement and concrete research	8	310	85.00
7	cement and concrete composites	10	256	139.83
8	journal of hydrology	9	253	127.95
9	water (switzerland)	21	253	317.96
10	journal of building engineering	11	208	89.00

Fonte: VOSviewer (2023).

Ademais, pela Figura A5 é possível identificar a quantidade de publicações para os cinco principais periódicos em análise, em um período de 10 anos.

Figura A5 – Frequência de publicações nos últimos 10 anos dos cinco principais periódicos.



Fonte: base Scopus (2023).

Dessa forma é notório que o periódico “*Construction and Building Materials*” obteve crescimento maior entre os anos de 2015 e 2016 e se manteve superior aos demais periódicos até o fim do período analisado, o “*journal of cleaner production*” obteve maior crescimento no ano de 2019 e se manteve na média nos demais anos, já a “*journal of environmental management*” manteve uma projeção constante em todo o período.

2.3 Impacto das instituições de pesquisa

Além dos periódicos foi possível realizar análise quanto as instituições de pesquisa. A Tabela A3 mostra as principais instituições de pesquisa com maiores impactos no estudo do concreto permeável.

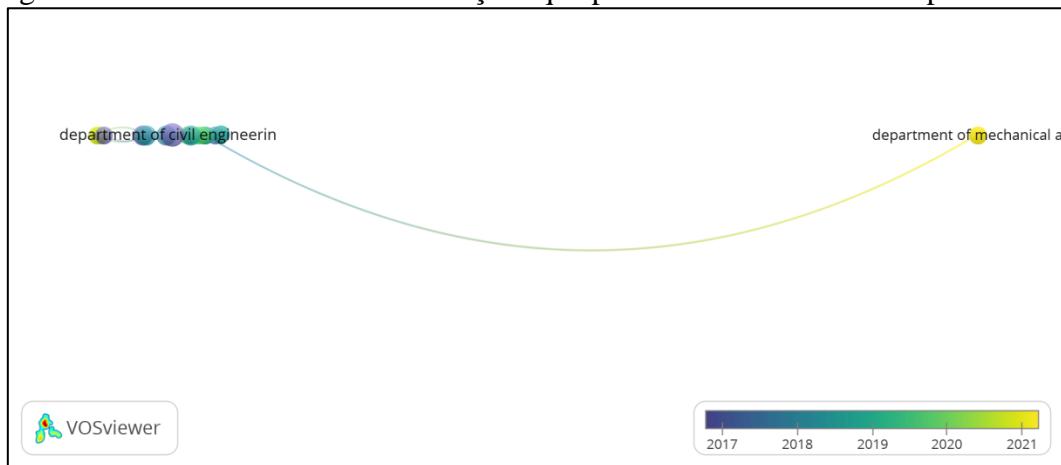
Tabela A3 – Organizações com maior frequência de citações.

Ordem	Organização	Documentos	Citações	Força total de link
1	Department of Civil Engineering, Curtin University - Perth - Australia	5	668	11.00
6	University of South Carolina - United States	4	199	3.00
8	Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee - India	3	168	1.00
4	College of Materials Science and Engineering, Chongqing University - Chongqing - China	4	155	17.97
3	Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya - Malaysia	4	100	17.00
5	College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai university - Nanjing - China	4	12	2.00
2	School of Civil Engineering, Central South University - Changsha - China	4	9	0.00
7	National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou - China	3	8	0.00
9	Department of Mechanical and Industrial Engineering Technology, University of Johannesburg - Johanneburg - South Africa	3	4	106.80
10	School of Biological and Environmental Sciences, Liverpool John Moores University - Liverpool - United Kingdom	3	4	106.80

Fonte: VOSviewer (2023).

As instituições que mais publicam sobre concreto permeável possuem uma conexão que pode ser apresentada na Figura A6.

Figura A6 – Conexão entre as instituições que publicam sobre concretos permeáveis.



Fonte: VOSviewer (2023).

Desse contexto, percebe-se que ocorreu uma correlação mais forte apenas entre as instituições: “*Department of Civil Engineering*” com força de link igual a 11,00 e a “*Department of Mechanical and Industrial Engineering Technology*” com força de link igual a 106,80.

2.4 Autores

Foram constatados 2.264 autores, mas após filtragem pelo número mínimo de publicações igual a 7 ficou resumido a 22 autores. A Tabela A4 apresenta, em número decrescente de citações, os principais autores que realizaram pesquisas na área de concretos permeáveis, já na Figura A7 apresenta a interação entre esses autores.

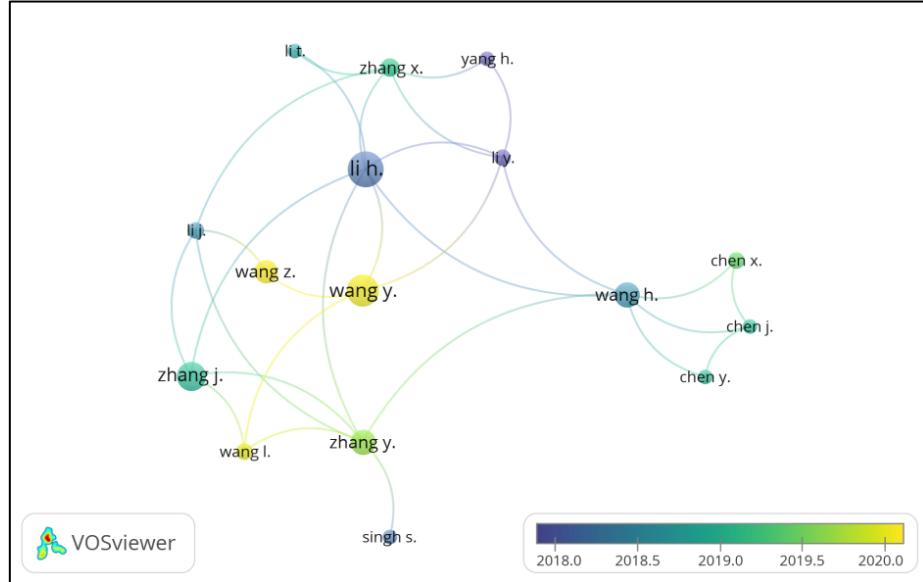
Tabela A4 – Autores com maior frequência de citações.

Ordem	Autor	Número de documentos	Número de citações	Total de Força de Link
1	Shaikh F.U.A.	7	792	0.00
2	Li H.	17	634	9.00
3	Hunt W.F.	10	331	8.00
4	Zhang J.	14	323	7.00
5	Winston R.J.	11	297	8.00

6	Singh S.	7	271	1.00
7	Borst M.	8	262	0.00
8	Zhang X.	9	234	4.00
9	Li Y.	8	200	4.00
10	Zhang Y.	12	182	7.00
11	Yang H.	7	171	1.00
12	Wang H.	12	157	5.00
13	Li T.	7	154	2.00
14	Chen X.	8	115	1.00
15	Chen J.	7	107	2.00
16	Li J.	8	98	6.00
17	Lucke T.	8	96	0.00
18	Wang Y.	15	78	6.00
19	Wang Z.	11	78	4.00
20	Chen Y.	7	74	2.00
21	Wang L.	8	70	4.00
22	Kandasamy S.	8	50	0.00

Fonte: VOSviewer (2023).

Figura A7 – Interação entre os autores.



Fonte: VOSviewer (2023).

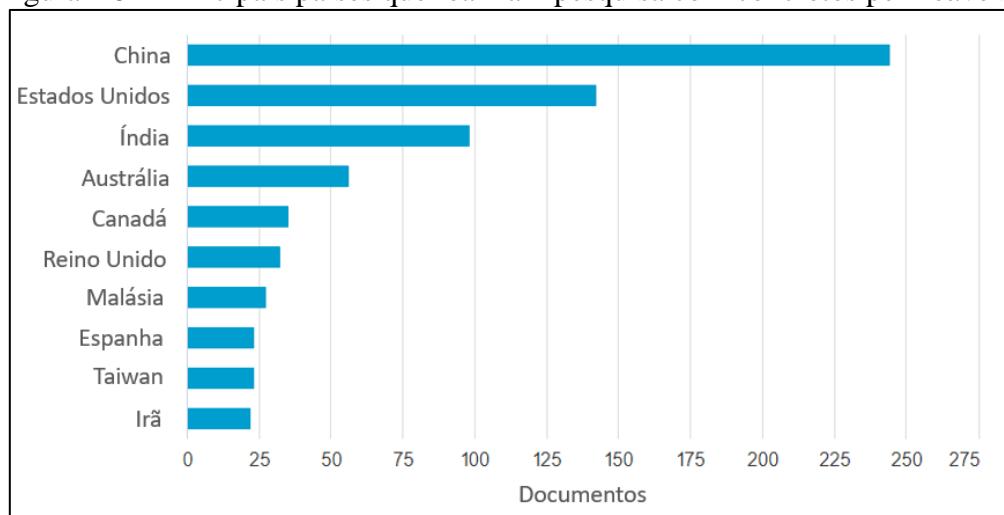
Pela Figura A7 é notado que houve maiores publicações entre os anos de 2018 e 2019, com três autores mais citados, são eles: Shaikh F.U.A. com 792 citações; Li H. com 634 e Hunt W.F. com 331.

Além dos principais autores foi possível, por meio da base Scopus, constatar quais países pesquisam mais sobre concretos permeáveis e o resultado está apresentado no próximo item.

2.5 Países

A Figura A8 destaca os países onde a maioria das pesquisas para concretos permeáveis foram executados.

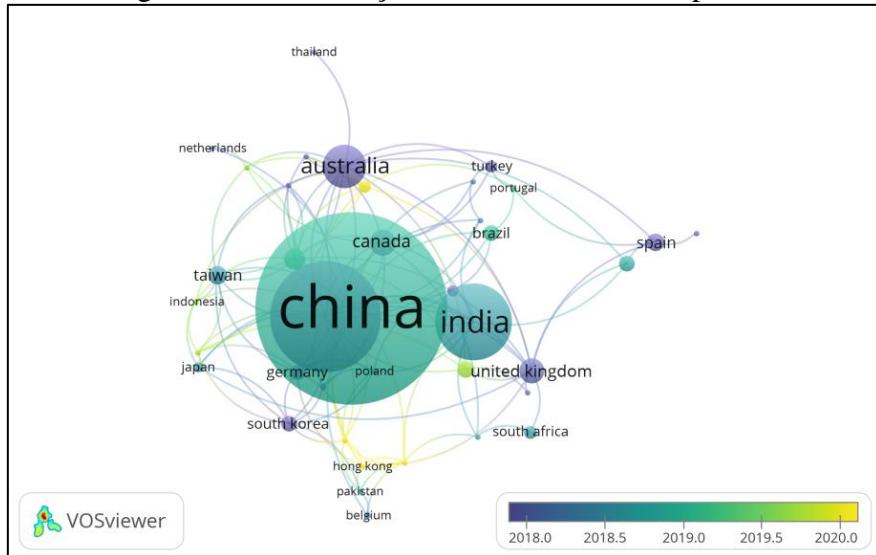
Figura A8 – Principais países que realizam pesquisa com concretos permeáveis.



Fonte: Base Scopus (2023).

Esses resultados mostram que a China é o principal país que realiza pesquisas sobre concretos permeáveis com aproximadamente 250 publicações, seguido dos Estados Unidos com mais de 125 publicações e Índia com pouco menos de 100 documentos. Já o vínculo entre os países é possível ser relacionado por meio da Figura A9 com percepção que houveram maiores publicações entre os anos de 2018 e 2019.

Figura A9 – Vinculação dos estudos entre os países.



Fonte: VOSviewer (2023).

Por fim conclui-se que o mapeamento bibliográfico foi necessário para nortear sobre as fontes de pesquisas para desenvolvimento da fundamentação, metodologia e discussões desta pesquisa.

Além disso, foi possível concluir que pesquisas sobre concretos permeáveis tendem a crescer nos próximos anos devido a necessidade de encontrar componentes que possam ser incorporados nas misturas para potencializar as funções mecânicas e drenantes e desenvolver metodologias de dosagens e normas para aplicação em pavimentos permeáveis.

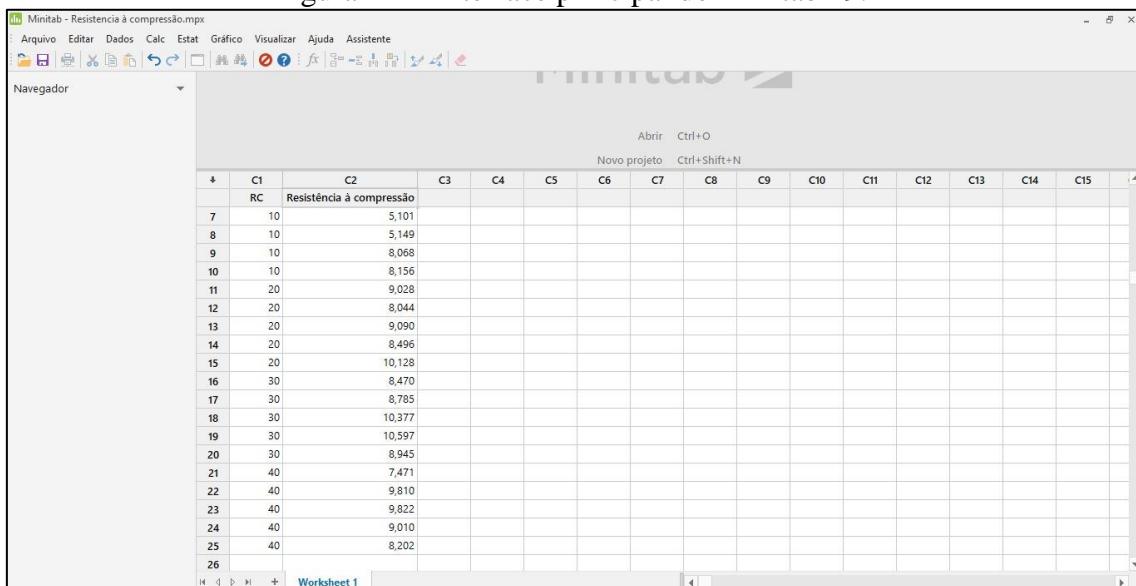
APÊNDICE B – CÁLCULO DA VARIÂNCIA (ANOVA) USANDO O MINITAB

19

Este apêndice apresentará o passo a passo do uso do software Minitab 19 para realização da análise de variância (ANOVA). Será apresentado como exemplo o procedimento para os resultados de resistência à compressão uniaxial.

A Figura 1B apresenta a interface do programa, na qual possui na coluna C1 os valores das porcentagens de substituições e na coluna C2 os valores das resistências à compressão uniaxial para os corpos de prova analisados.

Figura 1B – Interface principal do Minitab 19.



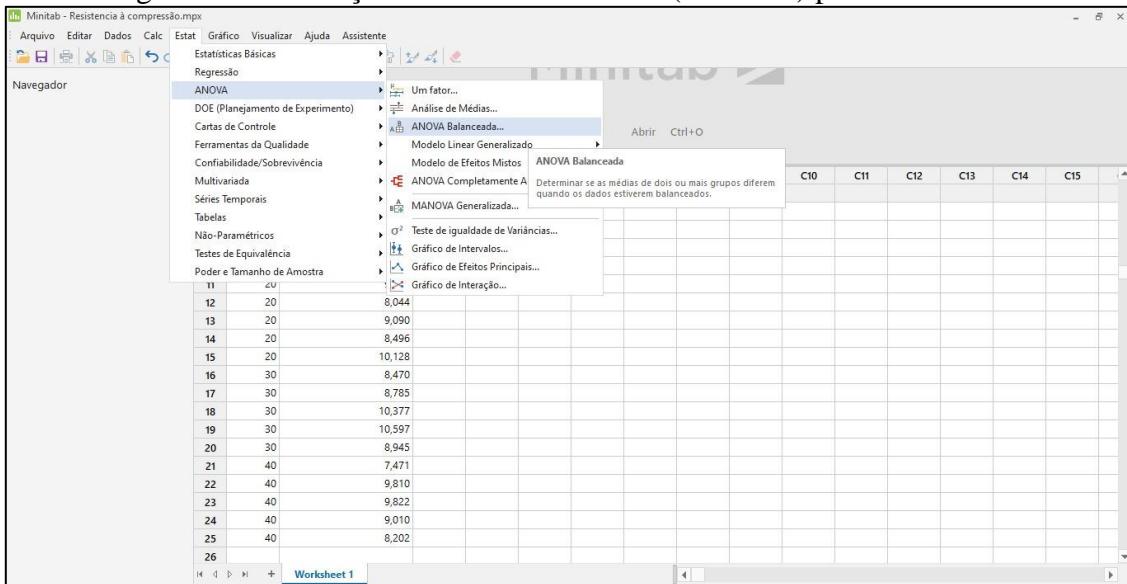
The screenshot shows the Minitab 19 software interface. The title bar reads "Minitab - Resistência à compressão.mpx". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Dados", "Calc", "Estat", "Gráfico", "Visualizar", "Ajuda", and "Assistente". The toolbar contains various icons for data manipulation. The worksheet titled "Resistência à compressão" contains the following data:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
+	RC	Resistência à compressão													
7	10	5,101													
8	10	5,149													
9	10	8,068													
10	10	8,156													
11	20	9,028													
12	20	8,044													
13	20	9,090													
14	20	8,496													
15	20	10,128													
16	30	8,470													
17	30	8,785													
18	30	10,377													
19	30	10,597													
20	30	8,945													
21	40	7,471													
22	40	9,810													
23	40	9,822													
24	40	9,010													
25	40	8,202													
26															

Fonte: autoria própria (2023).

A Figura 2B apresenta o procedimento para obter a análise estatística, na aba estatística, em ANOVA, em ANOVA balanceada, para determinar as médias de diferentes grupos por meio dos dados que estiverem balanceados.

Figura 2B – Obtenção da análise estatística (ANOVA) pelo Minitab 19.



Fonte: autoria própria (2023).

A Figura 3B apresenta a análise de variância balanceada que consta em inserir os valores das respostas dos dados. Assim, foram inseridos os dados da resistência à compressão uniaxial das amostras e do modelo, que consta da variação das porcentagens de substituições de RC.

Figura 3B – Obtenção da análise de variância à compressão pelo Minitab 19.

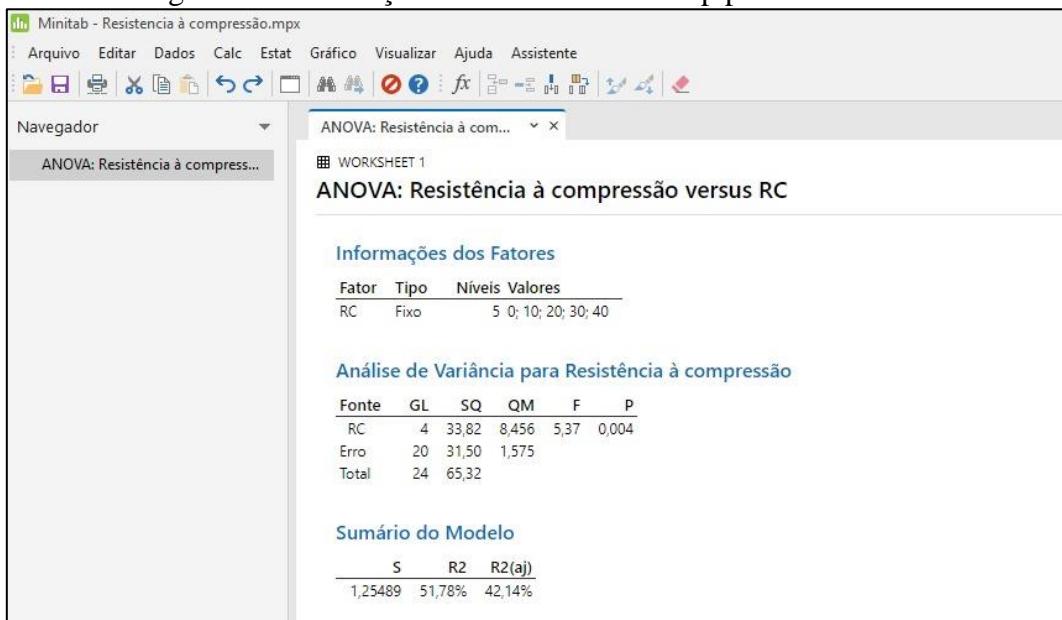


Fonte: autoria própria (2023).

Por fim, é obtido o resultado da ANOVA que consiste das informações dos fatores, sumário do modelo e análise da variância para resistência à compressão com

variação das porcentagens de RC (Figura 4B). Desse último é analisado o Valor-p e feito a verificação se esse é $\leq 5\%$ ou $> 5\%$, apresentado no Capítulo 3 – Programa experimental.

Figura 4B – Obtenção da ANOVA e Valor-p pelo Minitab 19.



Fonte: autoria própria (2023).

A sequência de passo a passo apresentada neste apêndice foi realizada para os resultados de coeficiente de permeabilidade, resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão e perda de massa por abrasão.