

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

JÚLIA CLASEN PALMA PASSOS

ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO
CONCRETO PERMEÁVEL COM DOSAGENS DE PEDRISCO E BRITA 1

Joinville

2023

JÚLIA CLASEN PALMA PASSOS

ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO
CONCRETO PERMEÁVEL COM DOSAGENS DE PEDRISCO E BRITA 1

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Valéria Bennack

Joinville

2023

JÚLIA CLASEN PALMA PASSOS

ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO
CONCRETO PERMEÁVEL COM DOSAGENS DE PEDRISCO E BRITA 1

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dra. Valéria Bennack
Orientadora/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dra. Helena Paula Nierwinski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dra. Anelize Borges Monteiro
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Joinville, 2023

Dedico este trabalho à Deus e à minha família,
que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pois Ele quem me sustentou durante todo o ciclo da faculdade e me sustenta em todo tempo, mostrando sua infinita bondade, fidelidade, cuidado e amor.

Agradeço aos meus pais, Gilmar e Nadir, pelo suporte em todos os períodos da faculdade, me auxiliando sempre que necessário, me entendendo e dando conselhos de como enfrentar os desafios que se colocavam à minha frente. Obrigada por todo incentivo, compreensão e amor, sem vocês, isso não seria possível!

Agradeço ao meu irmão e minha cunhada, Gilmar Junior e Aline, pelo auxílio, apoio, força e carinho me dado nesta fase.

Agradeço à minha orientadora Valéria Bennack, por todo conhecimento compartilhado, por toda paciência durante a realização deste trabalho, por toda dedicação e disponibilidade para me acompanhar nesse processo.

Agradeço aos amigos que fiz durante esta jornada, principalmente Leticia Baldessar, Ygor Oliveira e Pedro Bevilaqua, cada um contribuiu de forma única na minha vida, agradeço os bons e maus momentos compartilhados, pois tornaram a caminhada mais leve!

Agradeço a Ana Clara, Eduardo e Leticia pelo auxílio me dado em laboratório na realização dos ensaios para que esse trabalho pudesse acontecer.

Àqueles que não foram citados, mas fizeram parte da caminhada, meu coração é grato por vocês, sintam-se igualmente agradecidos!

À Jesus, e todos vocês, muito obrigada!

“Porque dEle, e por meio dEle, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente. Amém!”

Romanos 11:36

RESUMO

O impacto do desenvolvimento urbano acelerado afeta no processo hidrológico, havendo uma ligação direta entre a área construída e a impermeabilização do solo. Na década de 1970 o interesse pela gestão de águas pluviais aumentou, levando a um interesse renovado no concreto permeável. Como uma das principais vantagens do concreto permeável é a capacidade de drenar a água de forma eficiente, reduzindo o escoamento superficial e prevenindo enchentes, o seu uso vem sendo cada mais estudado e explorado. O concreto permeável, também conhecido como concreto poroso ou drenante, possui uma estrutura porosa que permite que a água escoe através dos vazios comunicantes entre os agregados, com pouca ou nenhuma presença de agregado miúdo, diferentemente do concreto convencional, que é denso e impermeável. Este estudo analisa a permeabilidade e propriedades mecânicas do concreto permeável com variação de granulometria do agregado graúdo, composto por pedrisco e brita 1 e ausência de material fino, visando obter-se um concreto com boa permeabilidade e boa resistência. Os resultados são obtidos através da confecção de corpos-de-prova cilíndricos com substituição parcial de pedrisco nas proporções de 15% e 30% em massa por brita 1. Para as propriedades físicas, estudaram-se a absorção de água, índice de vazios e permeabilidade. Para as propriedades mecânicas os corpos-de-prova foram rompidos à tensão de compressão. Os resultados comprovam que a utilização apenas de agregados graúdos na dosagem do concreto gera um aumento do índice de vazios, proporcionando uma alta permeabilidade do concreto, que em contrapartida, acarreta num decréscimo da resistência mecânica, porém não impossibilita seu uso em áreas externas. Assim, entre as dosagens estudadas, recomenda-se o T15, que obteve valores intermediários aos resultados de T0 e T30, porém com menor desvio padrão, resultando em valores mais precisos e confiáveis.

Palavras-chave: Concreto permeável. Permeabilidade. Resistência mecânica. Índice de vazios.

ABSTRACT

The impact of accelerated urban development affects the hydrological process, with a direct link between the built-up area and soil sealing. In the 1970s interest in stormwater management increased, leading to renewed interest in pervious concrete. As one of the main advantages of permeable concrete is the ability to drain water efficiently, reducing runoff and preventing flooding, its use has been increasingly studied and explored. Permeable concrete, also known as porous or draining concrete, has a porous structure that allows water to flow through the communicating voids between the aggregates, with little or no presence of fine aggregate, unlike conventional concrete, which is dense and impermeable. This study analyzes the permeability and mechanical properties of pervious concrete with varying granulometry of the coarse aggregate, composed of pebbles and gravel 1 and the absence of fine material, in order to obtain a concrete with good permeability and good resistance. The results are obtained through the manufacture of cylindrical specimens with partial replacement of gravel in the proportions of 15% and 30% in mass per gravel 1. For the physical properties, the water absorption, voids index and permeability. For the mechanical properties, the specimens were broken under compressive stress. The results prove that the use of only coarse aggregates in the dosage of concrete generates an increase in the voids index, providing a high permeability of the concrete, which, on the other hand, leads to a decrease in the mechanical resistance, but does not preclude its use in external areas. Thus, among the studied dosages, T15 is recommended, which obtained intermediate values to the results of T0 and T30, but with a smaller standard deviation, resulting in more accurate and reliable values.

Keywords: Pervious concrete. Permeability. Mechanical resistance. Porosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de infiltração com uso de concreto permeável.	24
Figura 2 - Execução do traço de concreto.....	31
Figura 3 - Molde e corpos-de-prova.	32
Figura 4 - Corpos-de-prova desmoldados.....	33
Figura 5 - Cura úmida dos CP's.	33
Figura 6 - Agitador mecânico.	35
Figura 7 - Materiais utilizados para realização do ensaio de permeabilidade.....	37
Figura 8 - Aparato para realização do ensaio de permeabilidade.	38
Figura 9 - Relação de viscosidades da água.....	39
Figura 10 - Etapas da determinação de propriedades físicas.	41
Figura 11 - Variação dos valores de K.	50
Figura 12 - Resultados obtidos por Ramos (2018).....	50
Figura 13 - Comparação com as dosagens de Ramos (2018).....	53
Figura 14 - Exemplares dos corpos-de-prova rompidos.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagens do concreto permeável.....	27
Tabela 2 - Definição do traço e quantidade de materiais.	28
Tabela 3 - Definição do traço e quantidade de materiais (Traço 15).....	29
Tabela 4 - Definição do traço e quantidade de materiais (Traço 30).....	29
Tabela 5 - Composição granulométrica do pedrisco.	44
Tabela 6 - Composição granulométrica da brita 1.....	44
Tabela 7 - Massa específica do concreto em estado fresco.....	45
Tabela 8 - Valores obtidos em ensaio de índices físicos.....	45
Tabela 9 - Resultados das propriedades físicas.....	46
Tabela 10 - Resultados do ensaio de permeabilidade.	48
Tabela 11 - Coeficiente de permeabilidade final.	49
Tabela 12 - Dados encontrados com ensaio de resistência à compressão.	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.....	43
Gráfico 2 - Absorção de Água.	46
Gráfico 3 - Índice de Vazios.	47
Gráfico 4 - Coeficientes de Permeabilidade.	49
Gráfico 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	52

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Massa Específica do concreto permeável.....	34
Equação 2 - Resistência à compressão.....	36
Equação 3 - Lei de Darcy.....	38
Equação 4 - Absorção de Água.....	41
Equação 5 - Índice de Vazios.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% - Porcentagem

°C – Graus Celsius

a/c - Fator água / cimento

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI - American Concrete Institute

ASCE - American Society of Civil Engineers

CP - Corpo de Prova

cm - Centímetro

k – Coeficiente de Permeabilidade

kg - Quilograma

MPa - Megapascal

m³ - Metro cúbico

mm - milímetro

N - Newton

NRMCA - National Ready Mixed Concrete Association

NBR – Norma Brasileira

PVC – Policloreto de vinil

s - Segundos

t - Tempo

T0 – Traço 0 - referência

T15 – Traço 15 – Com substituição parcial de 15% de pedrisco por brita 1

T30 – Traço 30 – Com substituição parcial de 30% de pedrisco por brita 1

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	CONCRETO.....	18
2.2	CONCRETO PERMEÁVEL.....	19
2.2.1	Características Gerais	19
2.2.2	Aplicações do concreto permeável	23
3	METODOLOGIA	26
3.1	CIMENTO PORTLAND	26
3.2	AGREGADOS GRAÚDOS	26
3.3	ÁGUA.....	27
3.4	DOSAGEM DO CONCRETO	27
4	METODOLOGIA	30
4.1	EXECUÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	30
4.2	MASSA ESPECÍFICA	34
4.3	GRANULOMETRIA.....	34
4.4	ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES	35
4.5	ENSAIO DE PERMEABILIDADE	36
4.6	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1	GRANULOMETRIA.....	43
5.2	MASSA ESPECÍFICA	45
5.3	ÍNDICES FÍSICOS	45
5.4	ENSAIO DE PERMEABILIDADE	48
5.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	51
6	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento da população urbana, aliado às necessidades de ampliação da infraestrutura, conduzem as cidades a enfrentarem problemas com drenagem superficial do solo e excesso de resíduos, sendo um desses problemas as inundações urbanas, causadas pela gestão deficiente dos escoamentos pluviais (DE SOUZA *et al.*, 2022). Este crescimento urbano levou à ocupação de grande parte da superfície das cidades com materiais impermeáveis, como concreto de cimento Portland e concreto asfáltico (HOLTZ, 2011).

Ainda de acordo com o Holtz, essa alteração reduz significativamente a área de contato da água com o solo, dificultando ou impedindo a infiltração e aumentando os volumes de escoamento superficial das águas pluviais, sobrecarregando as galerias de modo que não atendam às novas demandas, tornando-se um desafio cada vez maior para as redes de drenagem pluviais.

Como consequência disso, as cidades sofrem com os alagamentos em dias de chuvas intensas, impossibilitando o tráfego e gerando grandes congestionamentos, além da transmissão de doenças de veiculação hídrica, um passivo ambiental que estimula a adoção de medidas para a solução de tais problemas (LAMB, 2014). Dentre os dispositivos que procuram devolver ao solo as condições originais de escoamento está a utilização de concreto permeável, uma opção viável e sustentável à população.

Os concretos permeáveis contribuem para a drenagem subsuperficial, servindo como reservatórios e permitindo a infiltração de água no subleito, sem provocar alagamentos. Tais estruturas vêm sendo fortemente empregadas em vias de tráfegos leves, em passeios urbanos, estacionamento de automóveis e na confecção de elementos de micro drenagem. Quando utilizado em áreas externas, este tipo de concreto permite a captação da água da chuva, de modo que ela infiltre diretamente no solo, permitindo passagem em grandes quantidades (LAMB, 2014).

A permeabilidade é uma propriedade do material que representa a capacidade do mesmo em transportar fluidos pelos vazios interconectados, garantindo uma boa percolação. Polastre e Santos (2006) afirmam que este tipo de concreto deve possuir alto índice de vazios interligados, com pouca ou nenhuma porção de areia em sua composição, de forma que a água percole e se reintegre ao ambiente.

Os benefícios ambientais vão além de abastecimento aos lençóis freáticos e prevenção de inundações, esse sistema funciona também como um filtro, que retém

as impurezas presentes na água, assim como a terra, durante o processo natural. Os revestimentos e as estruturas de pavimentos que possuam a capacidade de drenar a água e encaminhá-la, por infiltração, às camadas inferiores de solo, possuem relevância na amenização das inundações (SALES, 2008).

É importante salientar, ainda, que o processo natural de infiltração permite que a água e o oxigênio cheguem às raízes de árvores, de tal modo, que seria impossível em pavimentos convencionais.

O grande desafio urbano atual consiste em equilibrar as demandas de desenvolvimento com as questões de sustentabilidade, sob um ponto de vista econômico, social e ecológico. Para tanto, é necessário o desenvolvimento de soluções no controle do escoamento e aquecimento das cidades e/ou materiais alternativos que favoreçam o processo de infiltração, no intuito de mitigar tais problemas (DE SOUZA *et al*, 2022).

Desta forma, este trabalho tem por objetivo avaliar o desenvolvimento de dosagens para um concreto permeável que possibilite o uso em áreas externas, de modo a auxiliar o escoamento das águas, bem como, mitigar os eventuais problemas de inundação ocasionado nos centros urbanos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a permeabilidade e as propriedades mecânicas do concreto permeável com a variação do tipo de agregado graúdo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os agregados graúdos na dosagem do concreto;
- Definir traços adequados em relação à resistência a compressão e à permeabilidade;
- Verificar a propriedade mecânica de resistência à compressão simples do concreto permeável;
- Verificar o coeficiente de permeabilidade, a absorção e índice de vazios do concreto permeável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCRETO

O concreto é um dos materiais mais utilizados em obras de edificações e de infraestrutura devido a sua grande capacidade de suporte e resistência a grandes esforços. De acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 12655:2022 define o concreto de cimento Portland como produto da mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos e água. Podendo haver incorporação de outros componentes como pigmentos, aditivos químicos, adições minerais, materiais pozzolânicos e entre outros.

As propriedades do concreto são governadas por suas estruturas internas, a exemplo do que ocorre com qualquer outro material, portanto, as características do concreto dependem da natureza dos agregados e da quantidade da relação água/cimento (a/c), conforme SACCANI *et al.* (2000). A qualidade do concreto está intimamente ligada à essa relação água/cimento, pois a quantidade de água influencia na resistência do concreto, sendo observado que excessos de água causam retração no concreto em estado seco, ocasionando fissuras. Geralmente, o fator água/cimento está em torno de 0,4 – 0,7. Dependendo da quantidade de material, com uma relação 0,3 a/c , ficará muito difícil de trabalhar e, 0,8 a/c torna o material muito fraco (DELEPRANI, 2022).

De acordo com Pedroso (2009), e de maneira sucinta, pode-se afirmar que o concreto é uma pedra artificial que se molda à inventividade construtiva do homem. Capaz de desenvolver um material que, depois de endurecido, tem resistência similar à das rochas naturais e, quando no estado fresco, é composto plástico: possibilita sua modelagem em formas e tamanhos os mais variados.

Ainda conforme Pedroso (2009), entre as diversas características do concreto, pode-se destacar a sua resistência à água, sofrendo menor deterioração quando comparado a outros materiais, e por este motivo, é muito empregado em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água. A sua plasticidade, que permite que o concreto se molde a diversas formas construtivas também é uma característica positiva dos concretos, além de possuir custos mais baixos e facilidade para encontrar seus elementos constituintes.

Pedroso (2009) ressalta que há três classificações básicas do concreto:

- a) Concreto de densidade normal: massa específica no intervalo de 2000 a 2800 kg/m³ (comumente encontrado em obras em geral);
- b) Concreto leve: densidade abaixo do intervalo estabelecido para o concreto normal, obtida com o uso de agregados com menor massa específica;
- c) Concreto pesado: massa específica acima do intervalo estabelecido para o concreto normal, devido ao uso de agregados de alta densidade (usado em blindagem contra radiação).

Os concretos podem ainda ser classificados em relação a sua resistência à compressão aos 28 dias, conforme:

- Menos de 20 MPa – Concreto de baixa resistência (impróprio para função estrutural, segundo a NBR 6118);
- 20 a 50 MPa – Concreto de resistência normal;
- Mais de 50 MPa – Concreto de alta resistência.

Outra característica do concreto e da argamassa, é que se produzidos com agregados com granulometria contínua, proporcionam uma maior trabalhabilidade e um menor consumo de cimento, com granulometria descontínua proporcionam uma maior resistência e um maior consumo de cimento e com granulometria uniforme apresentam um maior consumo de água (IBRACON, 2007).

2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

2.2.1 Características Gerais

Uma possibilidade para modificar o grande impacto ambiental que a impermeabilização urbana causa ao meio ambiente, seria o emprego de tecnologias mais limpas, que permitissem maior infiltração de água pluvial, tal como a utilização de concreto permeável (HOLTZ, 2011). O mesmo autor afirma que para os concretos permeáveis com matriz cimentícia, ainda existe uma carência de normalizações e de estudos que avaliem os eventuais benefícios ambientais e econômicos.

De acordo com American Concrete Institute (ACI) 522 (2010) e Vancura *et al.* (2011), a produção do concreto permeável é realizada através de misturas constituídas de cimento Portland, água, agregado graúdo (uniforme) e pouco ou nenhum agregado miúdo. O uso reduzido da areia na mistura está na característica principal do concreto permeável. Enquanto o concreto convencional é adensado para

obter um baixo índice de vazios e alta resistência, o concreto permeável necessita de um volume maior de vazios.

Reyes e Torres (2002) descrevem que a dosagem do concreto poroso deve resultar em um material que apresente granulometria que permita obter uma dimensão significativa dos poros, facilitando a circulação da água dentro do material. Os mesmos autores ainda afirmam que esta granulometria deve ser formada com a redução de agregados médios e finos. A mistura deve apresentar uma porosidade de 15% a 20% através da redução da quantidade de argamassa (cimento e areia).

Para assegurar que o concreto apresente uma elevada porosidade é necessário que os agregados sejam cuidadosamente selecionados em função de sua graduação. A curva granulométrica deve apresentar aberturas, resultando na falta do material para encher o espaço entre os agregados maiores. Conforme o tamanho dos grãos do agregado miúdo em relação ao agregado graúdo, pode-se obter o teor de poros comunicantes e as forças de contato (NEITHALATH *et al*, 2003).

De acordo com estudos elaborados por Onstenk *et al.* (1993) concluiu-se que a dimensão máxima do grão do agregado graúdo deve ser limitada a 10 mm, além de evidenciar que as dimensões dos agregados finos também possuem efeito significativo nas tensões de contato e porosidade do concreto. Gerharz (1999) em contrapartida, indica que o tamanho dos agregados para concreto permeável deve ser entre 4 mm e 8 mm.

O concreto poroso é executado de maneira que a quantidade de cimento seja suficiente apenas para dar liga entre os agregados. Isto é feito para reduzir a pasta adicional de cimento que se forma, no qual esse excesso impossibilita o escoamento de água através dos poros comunicantes existentes (SALES, 2008). Do mesmo modo, a relação a/c é mantida a baixos teores, pois assim, assegura-se uma porosidade residual alta com resistência à compressão dentro dos parâmetros aceitáveis (NELSON, 1994).

Segundo Ramos (2018) a quantia de água adicionada à pasta cimentícia pode ser um fator prejudicial, pois quando em excesso é negativo, sendo consumida uma parte na etapa de mistura e a restante evaporada desde os primeiros dias de cura, gerando vazios no interior do concreto. O correto teor de água para mistura do concreto permeável tem sido descrito como uma mistura com brilho, sem fluir para "fora" do agregado (CONCRETE TECHNOLOGY, 2004). O concreto deve apresentar um brilho de umidade sem ficar liquefeito (BATEZINI, 2013).

A porosidade é característica de materiais que podem armazenar fluidos em seus vazios interiores, chamados de poros (PINTO, 2002). O volume de vazios da mistura também interfere na permeabilidade da mesma. Para que um meio poroso seja permeável é necessário que os vazios desse meio se comuniquem. O tamanho, a forma e a distribuição dos vazios definem a permeabilidade.

A qualidade final de um material à base de concreto, depende principalmente do controle de suas propriedades no estado fresco. No entanto, diferente do concreto convencional, onde o teste de consistência é feito através do abatimento de tronco, o concreto permeável na maioria das vezes é controlado por meio da massa específica. Este procedimento ocorre pois o *Slump Test* do concreto permeável é inferior a 20 mm. Em alguns casos é encontrado abatimento igual a 0 (RIZVI *et al.* 2009; ACI 522, 2010; BATEZINI, 2013).

Alguns ensaios do concreto convencional não são significativos para o controle de qualidade dos concretos permeáveis. Durante o estado fresco, a mistura apresenta pouca trabalhabilidade, pois a pequena quantidade de agregado miúdo torna-o mais consistente. Desta forma, o ensaio de abatimento pelo tronco de cone é pouco representativo. Essa falta de trabalhabilidade do concreto permeável impacta na sua execução, já que tem início de pega mais rápido que o concreto convencional, tornando o lançamento e nivelamento um obstáculo desafiador (LAMBERTI, 2019).

Essa é uma limitação existente no concreto permeável, em relação ao seu tempo de pega, é bastante reduzido com cerca de apenas 20 minutos (NRMCA, 2011) e tempo útil de trabalho, que inicia a partir do momento em que a água entra em contato com a mistura do concreto, correspondendo de 60 minutos a 90 minutos, caso sejam empregados aditivos (TENNIS *et al.*, 2004). A ACI 522 R (2010) menciona alguns outros fatores que dificultam a execução de pavimentos em concreto permeável, tais como a necessidade de práticas de construção específicas e a inexistência de normas referentes a certos métodos de ensaio dos materiais.

É importante destacar que o bom desempenho do pavimento de concreto permeável está diretamente relacionado à qualidade dos materiais utilizados e às técnicas construtivas empregadas. Por isso se faz necessário atentar cuidadosamente às etapas de mistura, adensamento e cura do material. Um bom projeto para produção, portanto, contribui para que seja garantida a qualidade do sistema (PUTMAN e NEPTUNE, 2011; SHU *et al.*, 2011).

Durante os ensaios executados por Ramos (2018), verificou-se que a utilização do compactador de Proctor ocasionou fissuração e rompimento das britas em pequenos fragmentos, alterando a granulometria do material. Sendo assim, para vibrar este tipo de concreto é recomendado o uso de vibrador mecânico na velocidade mais lenta o possível para evitar a sobre compactação do concreto e alteração de sua característica de permeabilidade (REYES e TORRES, 2002).

De acordo com Crouch *et al.* (2007), uma das questões que interfere na resistência mecânica do concreto permeável é o tamanho da brita empregada em sua composição. Segundo estudo desenvolvido pelos autores, quanto menor a dimensão do agregado, maior a resistência à compressão do material. Indica-se que a resistência à compressão aos vinte e oito dias deve ser de no mínimo 15 MPa, a qual garante resistência ao desgaste por abrasão do tráfego.

Outra abordagem, levantada por Garber (2010), considera que a resistência do concreto permeável varia principalmente com seu grau de compactação durante a obra. O autor afirma que enquanto a resistência mecânica do concreto convencional depende, sobretudo, da proporção de cimento utilizada e da relação água/cimento da mistura, essas proporções também são relevantes no concreto permeável, mas essencialmente porque exercem influência no processo de compactação.

Na pesquisa realizada por Ramos (2018), as dosagens constituídas com inserção de agregado miúdo apresentaram um ganho de resistência com cerca de 165% para o traço com areia média e 150% para o traço com adição de cinza de madeira. Ramos (2018) ainda afirma que esse ganho de resistência era esperado, visto que os vazios no interior do CP, que anteriormente eram ocupados por ar, são ocupados pelo agregado miúdo, gerando maiores ligações e interações entre os grãos, a brita e a mistura cimentícia. No entanto, esse ganho de resistência resultou numa perda de permeabilidade do concreto.

A ACI 522 R (2010) enfatiza que normas relativas à resistência mecânica do concreto convencional não são aplicáveis ao concreto permeável e reitera que ainda não há ensaios deste tipo normatizados para o material. Uma alternativa à falta de normas relativas aos ensaios de resistência mecânica do concreto permeável é considerar a densidade e o índice de vazios do material, isto se explica pela relação entre essas propriedades e a sua resistência mecânica.

Segundo Garber (2010), quanto maior o índice de vazios do concreto permeável, maiores são a capacidade de armazenamento de água e a permeabilidade

do material, mas menor é sua resistência mecânica. Segundo o autor, para obter o maior índice de vazios possível, devem-se utilizar agregados de formato angular e de tamanho uniforme, além de compactar minimamente a mistura.

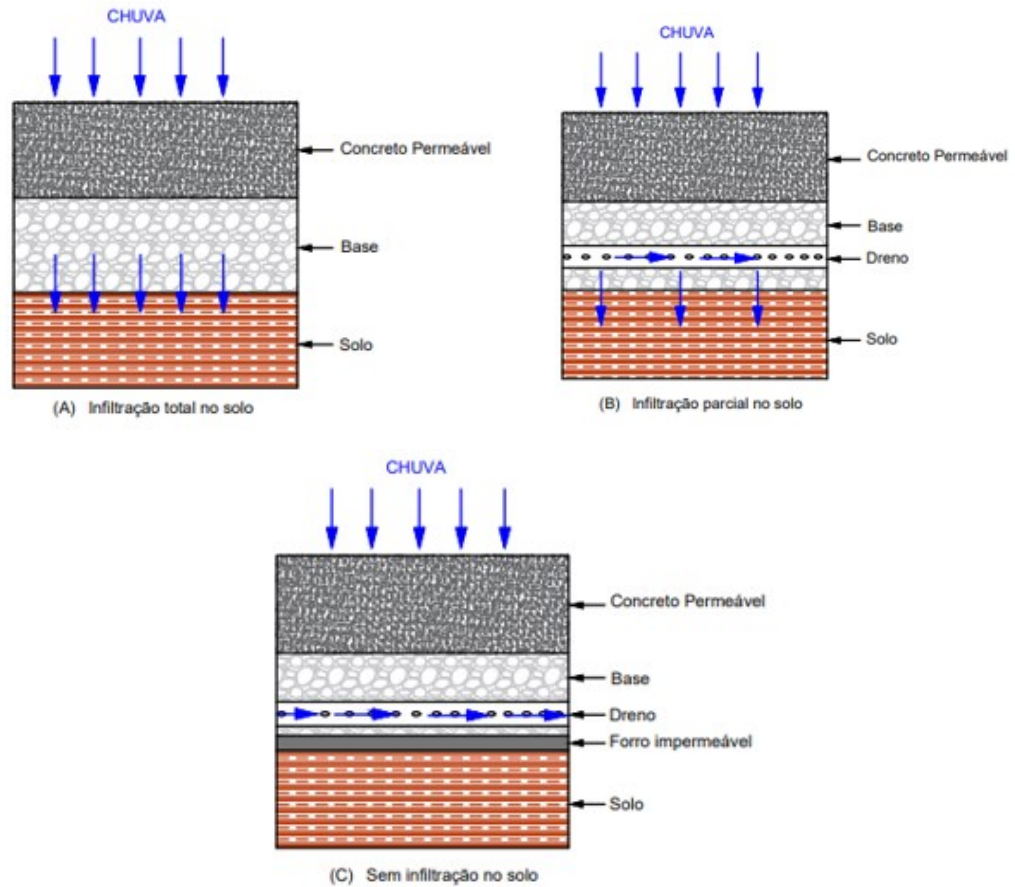
Segundo a American Society of Civil Engineers (ASCE) (2013), o concreto permeável quando utilizado para pavimentação, não é recomendado para usos no qual possa estar submetido a cargas elevadas (tráfego de caminhões), estradas de alta velocidade e alto volume ou áreas que podem estar sujeitas a grande deposição de poluentes, sedimentos ou acumulação de matéria orgânica.

2.2.2 Aplicações do concreto permeável

Costa (2019) ressalta que é importante a compreensão de que, em alguns casos não é possível a infiltração total da água no solo, pois alguns solos podem perder suas características e sofrer desestruturação na presença de água, ou ainda, dependendo da região, poderá haver o risco de contaminação de aquíferos. A Figura 1 a seguir mostra a alternativa do uso do concreto permeável em pavimentos que permitem infiltração total no solo (A), infiltração parcial do solo (B) e sem infiltração no solo (C). A camada de base e sub-base pode atuar como um reservatório para água infiltrada nos casos em que não há infiltração no solo ou a infiltração é parcial.

Conforme a Figura 1, em casos de uso de dreno, há possibilidade de armazenamento da água em reservatório para utilização em fins não-potáveis, ao invés do simples direcionamento para a rede de drenagem. Para os casos com infiltração no solo, o coeficiente de permeabilidade do mesmo deve ser compatível para tal finalidade. No caso de solos como siltes e argilas, que são muito pouco permeáveis, faz-se necessário a utilização dos tubos de drenagem, de forma a evitar que a água permaneça muito tempo na estrutura e ocasione a perda de suporte (COSTA, 2019).

Figura 1 - Tipos de infiltração com uso de concreto permeável.



Fonte: Adaptado pela autora (2023)

O concreto permeável possui variadas aplicações, dentre elas, o pavimento permeável, e assim pode servir como um adicional ao tratamento de águas pluviais. Segundo Rushton (2001) e Haselbach *et al.* (2014), o concreto permeável apresentou eficácia na remoção de concentrações de metais pesados, zinco e cobre contidos na água da chuva. Um estudo realizado por Shen *et al.* (2012) também mostrou a eficiência do concreto permeável na remoção de poluentes no ar emitidos por veículos, quando revestido com TiO_2 como foto catalisador.

Conforme Virgiliis (2009), a rápida penetração da água da chuva no concreto permeável evita o acúmulo de água em sua superfície, facilitando a mobilidade de veículos e pedestres com maior segurança, diminuindo a ocorrência de deslizamentos no contato entre pneu e estrada e acidentes de pessoas nas passarelas. O escoamento permitido pela permeabilidade do concreto drenante permite a redução de inundações causadas por enxurradas urbanas que por vezes não conseguem ser

contidas pelo sistema de drenagem tradicional. A penetração no solo contribui para a infiltração natural e recarga de aquíferos (VIRGILIIS, 2009).

Além desses benefícios, o concreto permeável se mostrou útil na redução dos efeitos da ilha de calor e do ruído acústico das vias. O efeito da ilha de calor é caracterizado pelo aumento de temperatura nos grandes centros urbanos, devido à absorção e armazenamento de calor por determinadas superfícies, como o caso do pavimento asfáltico, que ocorre em menor escala em concretos permeáveis, armazenando menor quantidade de energia. A menor absorção de radiação solar facilita a sobrevivência de arborização em áreas pavimentadas, pois permite a chegada de ar e água até as raízes das plantas (KEVERN *et al.*, 2012).

Outras vantagens do concreto permeável estão associadas às suas propriedades térmicas e acústicas, podendo ser utilizado como isolante térmico em paredes de prédios e como barreiras à passagem do som (POLASTRE e SANTOS, 2006).

De acordo com Mariano (2014), pelo viés econômico, o pavimento permeável, também apresenta vantagens com a redução da construção de sistemas de drenagem de águas pluviais. A prática do concreto permeável permite uma infiltração de até 80% do volume de escoamento anual, e pode filtrar até 65% de partículas que não são dissolvidas e até 95% dos sedimentos no escoamento.

As partículas sólidas filtradas e a incrustação de partículas de areia ou solo colaboram com o declínio do índice de permeabilidade do concreto. A condição de entupimento pode ser amenizada com a aplicação de manutenções com intervalo máximo de seis meses. Um exemplo de manutenção citada por Batezini (2013) é a limpeza a vácuo que pode recuperar até 90% da permeabilidade do concreto.

3 METODOLOGIA

Os materiais utilizados neste trabalho foram selecionados de acordo com a disponibilidade no laboratório de materiais de construção sustentável (LMCS) da UFSC campus Joinville e com os materiais comercializados na região. Portanto, os materiais utilizados para a fabricação dos corpos de provas de concreto permeável e para a execução dos ensaios serão descritos a seguir.

3.1 CIMENTO PORTLAND

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) o cimento é um pó fino com características aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurecem sob a ação da água. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra. Em função dessas características, o cimento é o material mais consumido na área da construção civil.

De acordo com a ABCP, o mercado nacional dispõe de oito opções de cimento, que se diferenciam conforme a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio e de adições acrescentadas no processo de moagem. As adições podem ser escórias, pozolanas e material carbonático, conhecido como fíler calcário.

O escolhido para o presente trabalho foi o cimento Portland composto com pozolana com resistência de 40 MPa (CP II-Z-40), sendo de fácil obtenção na região de Joinville.

3.2 AGREGADOS GRAÚDOS

O pedrisco, ou a brita 0, como também é conhecido, é um material resultante da britagem de rocha cujos grãos possuem dimensões de 4,8 mm ao diâmetro máximo de 9,5 mm, e a brita 1 apresenta dimensões mínimas de 12 mm e diâmetro máximo de 19 mm. O pedrisco e a brita 1 empregados neste trabalho foram obtidos da exploração das jazidas locais da região de Joinville pela empresa Rudnick Minérios.

3.3 ÁGUA

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento sob responsabilidade da concessionária Águas de Joinville.

3.4 DOSAGEM DO CONCRETO

De acordo com Balbo *et al.* (2022), é válido inicialmente comentar que não existe um método de dosagem racional de concretos permeáveis, tal como aqueles usuais empregados na dosagem de concretos plásticos convencionais.

Como não há um método consagrado baseado na quantificação do volume de pasta de cimento para a dosagem de concretos permeáveis, sendo a maioria dos estudos desenvolvidos com base em recomendações observacionais de estudos anteriores, para o presente estudo optou-se pela adaptação de um traço já desenvolvido por Ramos (2018). Para a definição do traço, estudaram-se as variações de granulometria de agregados e a ausência de areia, buscando respeitar a relação entre cimento e agregados na proporção de 1:4.

Para o traço de referência (T0) foi definido então, um concreto drenante sem a presença de finos, ou seja, utilizou-se apenas cimento, agregados graúdos e água, visando criar um concreto bastante permeável e funcional. Nesse caso, os três traços desenvolvidos (T0, T15 e T30) tiveram a variação de dois tipos de agregados graúdos: o pedrisco e a brita 1. A Tabela 1 a seguir expressa as proporções de cada dosagem.

Tabela 1 - Dosagens do concreto permeável

T0	1,0 :	0,0 :	4,0 :	0,32	
T15	1,0 :	0,0 :	3,4 :	0,6 :	0,32
T30	1,0 :	0,0 :	2,8 :	1,2 :	0,32

Fonte: Autora (2023).

Para a elaboração do traço (T0), usado como base, e de acordo com a relação a/c próxima de 0,33 recomendada por Neithalath *et al* (2003) optou-se por utilizar apenas brita 0, na proporção de 1: 0,0: 4,0: 0,32 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água).

Para o traço 15 (T15) manteve-se a ausência de finos, mas foi feita uma substituição parcial de agregado graúdo de 15% de pedrisco por brita 1, respeitando-se a proporção de referência de 1:4 pré-estabelecida. Sendo assim, este traço possui a presença de pedrisco e brita 1 para compor a parcela de agregado graúdo, de maneira a diversificar o tamanho das partículas e analisar o comportamento da mistura. O T15 com substituição de 15% por brita 1 ficou na seguinte proporção 1: 0,0: 3,4: 0,6: 0,32 (cimento: agregado miúdo: pedrisco: brita 1: água).

O Traço 30 (T30) foi desenvolvido no mesmo conceito do T15, porém com uma porcentagem de substituição ainda maior, sendo esta, de 30% de brita 1 no lugar de pedrisco. No intuito de observar como o arranjo das partículas se comportam e se a mistura ficaria mais bem intertravada, aumentando ou diminuindo a resistência do concreto. O T30 com substituição parcial de 30% de brita 1 ficou definido como 1: 0,0: 2,8: 1,2: 0,32 (cimento: agregado miúdo: pedrisco: brita 1: água).

A Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 correlacionam as proporções dos traços e suas respectivas massas em gramas utilizadas para execução dos corpos de prova (CP) de cada traço. A quantidade realizada foi de cinco unidades de CP's cilíndricos para cada traço definido.

Tabela 2 - Definição do traço e quantidade de materiais.

FORMULAÇÕES								
TRAÇO 0 – T0 – REFERÊNCIA								
Amostras (un)	CP II-Z-40		AGREGADO MIÚDO		PEDRISCO		ÁGUA	
	1		0		4		0,32	
5	5000	(g)	0	(g)	20000	(g)	1600	(g)

Fonte: Autora (2023).

Tabela 3 - Definição do traço e quantidade de materiais (Traço 15).

FORMULAÇÕES										
TRAÇO 15 – T15 - SUBSTITUIÇÃO PARCIAL 15%										
Amostras (un)	CP II-Z-40		AGREGADO MIÚDO		PEDRISCO		BRITA 1		ÁGUA	
	1		0		3,4		0,6		0,32	
5	5000	(g)	0	(g)	17000	(g)	3000	(g)	1600	(g)

Fonte: Autora (2023).

Tabela 4 - Definição do traço e quantidade de materiais (Traço 30).

FORMULAÇÕES										
TRAÇO 30 – T30 - SUBSTITUIÇÃO PARCIAL 30%										
Amostras (un)	CP II-Z40		AGREGADO MIÚDO		PEDRISCO		BRITA 1		ÁGUA	
	1		0		2,8		1,2		0,32	
5	5000	(g)	0	(g)	14000	(g)	6000	(g)	1600	(g)

Fonte: Autora (2023)

4 METODOLOGIA

4.1 EXECUÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O processo de execução e moldagem dos corpos de prova basearam-se na NBR 5738 (2015) para os três tipos de formulações. A aparelhagem utilizada foram moldes cilíndricos de dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, haste de adensamento de aço com superfície lisa, betoneira, balança de precisão, colher de pedreiro e baldes. Os moldes cilíndricos foram separados e previamente revestidos com lubrificante mineral da marca Lubrax, para que facilitasse o processo no momento da desmoldagem.

Em seguida, os materiais foram colocados de acordo com as quantidades necessárias de cada traço em baldes comuns. Inicialmente, o primeiro material a ser adicionado na betoneira foi o pedrisco, em quantidade total pré-pesada, em seguida uma pequena quantidade de água também foi adicionada, cerca de 1/3 do volume total, para misturar com o pedrisco gerando homogeneização. Dando continuidade, adicionou-se o cimento e o restante da água, com a betoneira ligada para proceder a primeira mistura do concreto. Em momentos intermediários, pausas foram realizadas no processo para desagregar os materiais que estavam se aglomerando nas laterais da betoneira, após isso, procedeu-se a mistura dos materiais. Todos os materiais foram misturados por tempo suficiente de forma a obter um bom aspecto visual e uma boa homogeneização do concreto. A Figura 2 representa as etapas desse processo.

Além da técnica tátil-visual, pequenas amostras de material foram produzidas para cada traço para verificar o aspecto das misturas, sendo possível analisar a relação a/c, de modo a evitar excesso ou falta de pasta no conjunto. A falta de pasta resulta em misturas esfarelentas, por não ter adequada adesividade entre as partículas de agregado, e o excesso escorre para o fundo do molde, comprometendo a permeabilidade (DE SOUZA, 2022).

Figura 2 - Execução do traço de concreto.



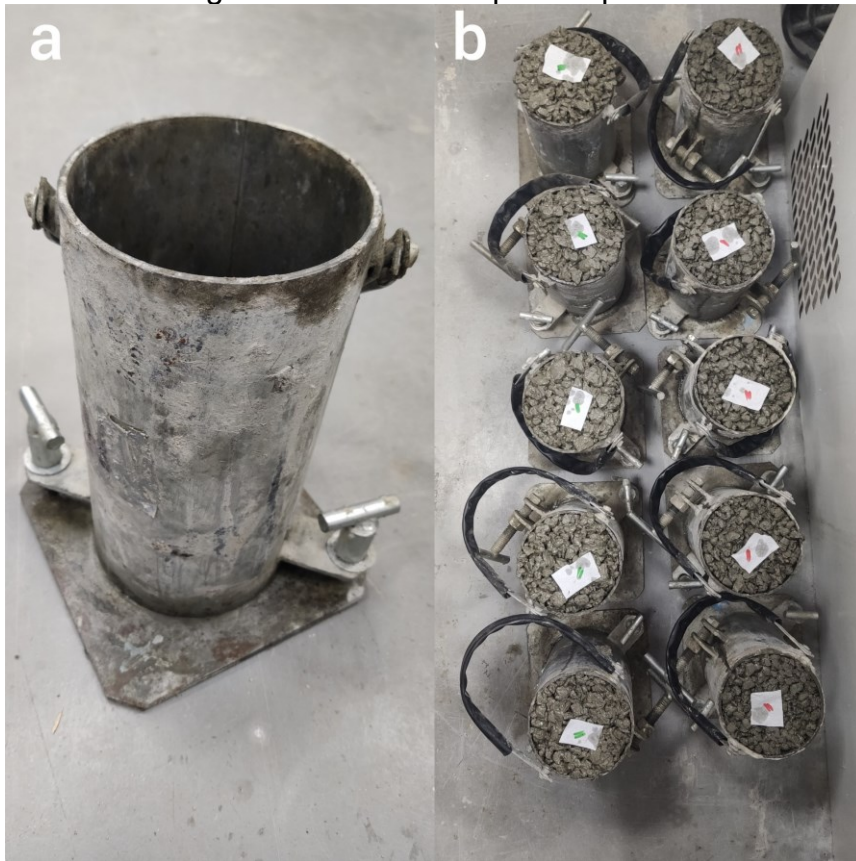
a) Betoneira utilizada; (b) Betoneira úmida; (c) Agregados graúdos e água misturados;
(d) Mistura do concreto pronta.

Fonte: Autora (2023)

Após a homogeneização da mistura, deu-se início à etapa de moldagem e adensamento. Como os moldes possuíam tamanhos relativamente pequenos e o adensamento seria manual, preencheu-se em três camadas, com haste metálica, aplicando-se 25 golpes em cada uma das camadas, sendo estes golpes aplicados de forma aleatória, procurando obter a melhor distribuição dos agregados em toda a região. Com os moldes preenchidos e com auxílio da colher de pedreiro, realizou-se o rasamento da superfície até a borda superior do molde. A betoneira foi lavada e após sua secagem repetiu-se os mesmos processos para os demais traços definidos. A Figura 3 apresenta o molde utilizado e os corpos-de-prova dos traços T0 e T15.

Para os traços subsequentes, a ordem da adição dos materiais à betoneira não se alterou, apenas houve a adição da parcela da brita 1 que compõe a quantia de agregados graúdos do traço. Após isso, as etapas e procedimentos permaneceram os mesmos.

Figura 3 - Molde e corpos-de-prova.



a) Molde para o corpo-de-prova; b) Corpos-de-prova de T0 (direita) e T15 (esquerda).

Fonte: Autora (2023)

As amostras de concreto dentro dos moldes foram identificadas e alocadas em superfície plana por 24 horas. Posteriormente, esses corpos-de-prova foram desmoldados, permanecendo mais 24 horas em temperatura ambiente, para então serem imersos em água em uma caixa plástica para realizar a etapa de cura úmida, onde permaneceram até o seu respectivo dia de ensaio de compressão axial. A Figura 4 apresenta os corpos-de-prova do T0 e Figura 5 apresenta a cura úmida, respectivamente.

Figura 4 - Corpos-de-prova de T0 desmoldados.



Fonte: Autora (2023)

Figura 5 - Cura úmida dos CP's.



Fonte: Autora (2023)

4.2 MASSA ESPECÍFICA

Realizado conforme o que consta na NBR 9833 (ABNT, 2008), o ensaio de massa específica consiste basicamente no preenchimento de um recipiente com massa e volume conhecidos. Com a mistura do concreto ainda em estado fresco, o recipiente foi preenchido em três camadas, com 25 golpes cada, por uma haste metálica.

Assim que o recipiente estava cheio, fez-se o rasamento para eliminar os excessos de mistura e a limpeza das bordas. Pesou-se o conjunto e pela diferença de massa do recipiente cheio e do recipiente vazio dividido pelo volume do cilindro, obteve-se a densidade específica do concreto para cada traço, conforme a Equação 1.

Equação 1 - Massa Específica do concreto permeável.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \times 1000$$

Sendo:

- ρ_{ap} é a massa específica aparente do concreto, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);
- M é a massa de concreto, em kg;
- V é o volume do recipiente, expresso em decímetros cúbicos (dm^3).

4.3 GRANULOMETRIA

A determinação da composição granulométrica do pedrisco e da brita 1 foi realizada de acordo com a NBR 17054 (2022), com este ensaio pode-se determinar a porcentagem em massa que cada dimensão de partícula representa na massa total ensaiada.

Aproximadamente 2 kg de cada tipo de brita foram separados e depositados nas peneiras de 25 mm, 19 mm, 12,7 mm, 9,5 mm e 4,75 mm. Nessa mesma ordem, as peneiras foram colocadas no agitador mecânico por cinco minutos e o material retido em cada peneira foi pesado.

Com os resultados obtidos pôde-se construir a curva de distribuição granulométrica do pedrisco e da brita 1, sendo importante para determinar os máximos e mínimos tamanhos das partículas. A Figura 6 exemplifica a etapa do agitador mecânico no ensaio.

Figura 6 - Agitador mecânico e peneiras.



Fonte: Autora (2023)

4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

A NBR 5739 (2018) é a norma que rege o ensaio de compressão simples do concreto, no qual a estrutura de aplicação de força é controlada e o corpo de prova é posicionado com seu eixo centralizado junto ao eixo da máquina, fazendo com que a resultante passe exatamente pelo centro.

Após um período máximo de 28 dias de cura úmida, as bases dos corpos de prova foram preparadas, de maneira que a sua superfície fosse retificada com dimensões de acordo com a relação altura/diâmetro no intervalo de 1,94 e 2,06.

Com o corpo de prova centralizado entre os pratos de compressão, o carregamento do ensaio foi aplicado com velocidade constante entre $0,45 \pm 0,15$ MPa/s

conforme estipula a norma, continuamente e isento de choques. O carregamento só cessou quando houve uma queda de força que indicou a ruptura do CP.

Com o valor da força máxima suportada pelo CP, a resistência à compressão foi calculada pela Equação 2 a seguir:

Equação 2 - Resistência à compressão.

$$F_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2}$$

Onde:

- F_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);
- F é a força máxima alcançada, em newtons (N);
- D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

4.5 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

A determinação do coeficiente de permeabilidade à água tem como finalidade medir a velocidade de percolação da água no concreto permeável. Este ensaio foi realizado conforme a NBR 13292:2021 porém adaptado ao concreto permeável, sendo executado à carga constante.

O ensaio realizado foi adaptado ao corpo de prova em questão e os materiais utilizados foram: tubo PVC de 100 mm, fita de autofusão, fita isolante, luva de PVC 100mm, proveta, medidor de pH AK90, esse em específico para verificar a temperatura da água, e reservatório de água. A Figura 7, a seguir, mostra os materiais utilizados.

Figura 7 - Materiais utilizados para realização do ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autora (2023)

Para a preparação do corpo de prova, a borda do tubo PVC de 100mm foi aquecida, para se tornar maleável, e encaixada no topo do CP, para que não houvesse folga no encaixe e ocorresse fuga da água pela lateral. O restante do CP que ficou fora do tubo foi totalmente revestido com uma camada de fita de autofusão, de modo a isolar todo o corpo de prova e ocorrendo percolação apenas pelo centro do CP. Em seguida, o CP, envolto na fita de autofusão, foi encaixado dentro da luva de PVC 100mm e uma nova camada de fita isolante foi passada ao redor de toda a estrutura, vedando todos os possíveis espaços vazios que haviam restado. A Figura 8 apresenta o aparato finalizado para o ensaio.

Figura 8 - Aparato para realização do ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autora (2023)

Os corpos-de-prova se encontravam saturados ao iniciar o ensaio, para que não houvesse vazios ocupados por ar. Uma altura de coluna d'água de 15 centímetros foi demarcada nos tubos e mantida constante sobre o CP. O tempo foi cronometrado, cerca de 15 segundos, sendo a água que percolou o CP nesse intervalo de tempo, coletada em um reservatório, em seguida, transferida para a proveta e quantificada. O ensaio de permeabilidade foi executado com carga constante, mantendo-se o nível de coluna d'água sobre o CP durante todo o processo. Os dados obtidos no experimento foram inseridos na Equação 3, e o coeficiente de permeabilidade de cada traço foi obtido pela aplicação da Lei de Darcy.

Equação 3 - Lei de Darcy.

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H}$$

Onde:

- K é o coeficiente de permeabilidade medido em centímetros por segundo (cm/s);
- Q é a vazão de entrada expressa em centímetros cúbicos por segundo (cm³/s);
- L é a altura do corpo de prova, em centímetros (cm);
- A é a área da seção transversal do corpo de prova, medida em centímetros quadrados (cm²);
- H é a altura da coluna d'água, expressa em centímetros (cm).

Para que se obtenha um resultado preciso, é necessário verificar também a temperatura da água, para que esteja à temperatura padrão de 20°C. Caso a água se encontre em valor diferente do padrão, o valor do coeficiente de permeabilidade deve ser corrigido conforme o fator equivalente a temperatura real da água. Esses fatores podem ser encontrados na Figura 9 conforme consta na NBR 13292:2021.

Figura 9 - Relação de viscosidades da água.

Temperatura °C	$\mu_T / \mu_{20\text{ °C}}$									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
8	1,374	1,370	1,366	1,362	1,358	1,354	1,352	1,348	1,344	1,340
9	1,336	1,332	1,328	1,325	1,321	1,318	1,314	1,310	1,306	1,302
10	1,298	1,294	1,292	1,288	1,284	1,281	1,277	1,273	1,269	1,266
11	1,262	1,259	1,256	1,252	1,249	1,245	1,241	1,238	1,234	1,231
12	1,227	1,224	1,221	1,218	1,215	1,211	1,208	1,205	1,202	1,198
13	1,195	1,192	1,189	1,186	1,183	1,180	1,177	1,174	1,170	1,167

14	1,165	1,162	1,159	1,156	1,153	1,150	1,147	1,144	1,141	1,138
15	1,135	1,132	1,129	1,126	1,123	1,121	1,118	1,115	1,112	1,109
16	1,106	1,103	1,100	1,098	1,095	1,092	1,089	1,086	1,084	1,081
17	1,078	1,075	1,073	1,070	1,067	1,064	1,062	1,059	1,056	1,054
18	1,051	1,048	1,046	1,043	1,041	1,038	1,035	1,033	1,030	1,028
19	1,025	1,023	1,020	1,018	1,015	1,013	1,010	1,008	1,005	1,003
20	1,000	0,998	0,995	0,993	0,991	0,989	0,986	0,984	0,982	0,979
21	0,975	0,973	0,971	0,968	0,966	0,964	0,961	0,959	0,957	0,954
22	0,952	0,950	0,948	0,945	0,943	0,941	0,939	0,937	0,934	0,932
23	0,930	0,928	0,926	0,923	0,921	0,919	0,917	0,915	0,912	0,910
24	0,908	0,906	0,904	0,902	0,900	0,898	0,895	0,893	0,891	0,889
25	0,887	0,885	0,883	0,881	0,879	0,877	0,875	0,873	0,871	0,869
26	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853	0,851	0,849
27	0,847	0,845	0,843	0,841	0,839	0,838	0,836	0,834	0,832	0,830
28	0,828	0,826	0,825	0,823	0,821	0,820	0,818	0,816	0,814	0,813
29	0,811	0,809	0,807	0,806	0,804	0,802	0,800	0,798	0,797	0,795
30	0,793	0,791	0,789	0,788	0,786	0,784	0,782	0,780	0,779	0,777
31	0,776	0,775	0,773	0,772	0,770	0,768	0,767	0,765	0,763	0,762

Fonte: ABNT NBR 13292:2021.

4.6 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas do concreto consistem na quantificação da absorção de água, do índice de vazios e da densidade do concreto. A NBR 9778 (2005) é a norma que define o modo de execução do ensaio e seus cálculos. Para a realização do ensaio, utilizou-se uma balança de precisão, um cesto, um reservatório e um banco para adaptação ao ensaio.

As amostras utilizadas foram fragmentos provenientes dos corpos de prova testados no ensaio de compressão axial. Foram pesadas as amostras previamente secas em estufa por 72 horas, posteriormente, pesaram-se as amostras submersas em água, após estarem também por 72 horas imersas em água e amostras saturadas, com superfície aparentemente seca. Com os valores obtidos, pôde-se extrair a porcentagem de absorção de água de cada traço e seu índice de vazios. A adaptação da balança para a medição do corpo de prova submerso em água pode ser visualizada na Figura 10.

Figura 10 - Etapas da determinação de propriedades físicas.



Fonte: Autora (2023)

5.6.1 Absorção de Água

A absorção de água, em porcentagem, pode ser calculada pela Equação 4 a seguir:

Equação 4 - Absorção de Água.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$$

Em que:

- A é a absorção de água, em porcentagem (%);
- M_{sat} é a massa da amostra saturada, em gramas (g);
- M_s é a massa da amostra seca em estufa, expressa em gramas (g).

5.6.2 Índice de Vazios

O índice de vazios exerce uma influência extremamente importante nos resultados das propriedades do concreto permeável. Os espaços vazios estão diretamente ligados à permeabilidade e a resistência do material. A porosidade do concreto pode ser extraída, através da Equação 5, de índice de vazios, em porcentagem conforme segue:

Equação 5 - Índice de Vazios.

$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} \times 100$$

Em que:

- Iv é o índice de vazios, em porcentagem (%);
- Mi é a massa da amostra saturada imersa em água, em gramas (g).

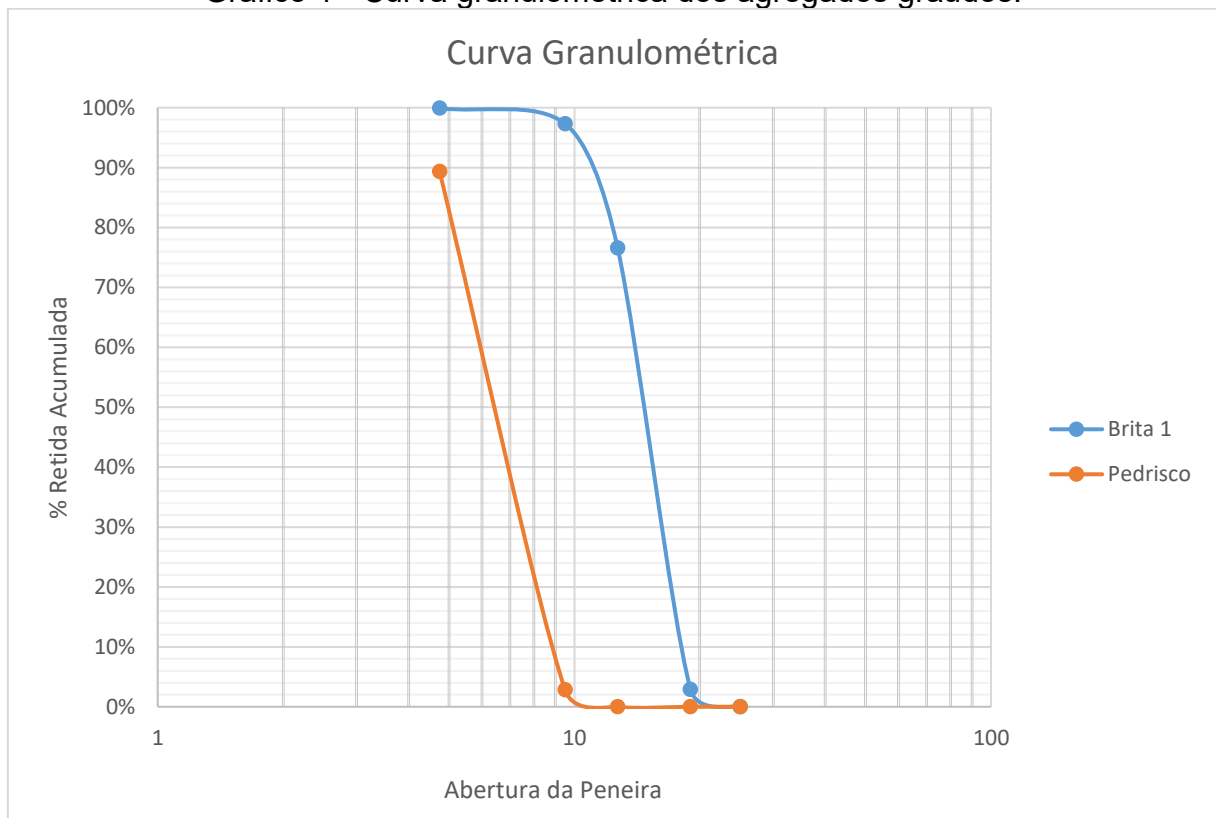
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os respectivos resultados encontrados de acordo com os ensaios propostos.

5.1 GRANULOMETRIA

Conforme citado anteriormente, seguindo a NBR 17054 (ABNT, 2022), com esse ensaio foi possível determinar a classificação das partículas da amostra de agregados graúdos pelos seus tamanhos e medir as frações correspondentes de cada tamanho. As composições granulométricas do pedrisco e da brita 1 são apresentadas na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. O Gráfico 1 abaixo representa a curva granulométrica dos agregados graúdos.

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: Autora (2023)

Tabela 5 - Composição granulométrica do pedrisco.

PEDRISCO						
Abertura da Peneira (mm)	Massa Peneira (g)	Massa Peneira+Pedrisco (g)	Massa retida em cada peneira (g)	Percentual retido em cada peneira (%)	Percentual retido acumulado (%)	Percentual passante em cada peneira (%)
25	402,47	402,47	0	0,00%	0,00%	100,00%
19	432,48	432,48	0	0,00%	0,00%	100,00%
12,7	450,15	450,15	0	0,00%	0,00%	100,00%
9,5	420,12	476,185	56,07	2,80%	2,80%	97,20%
4,75	450,69	2180,755	1730,07	86,53%	89,33%	10,67%
Fundo	354,2	567,545	213,35	10,67%	100,00%	0,00%
Massa total de Pedrisco			1999,48	100,00%		

Fonte: Autora (2023).

Tabela 6 - Composição granulométrica da brita 1.

BRITA 1						
Abertura da Peneira (mm)	Massa Peneira (g)	Massa Peneira+Brita 1 (g)	Massa retida em cada peneira (g)	Percentual retido em cada peneira (%)	Percentual retido acumulado (%)	Percentual passante em cada peneira (%)
25	402,47	402,47	0	0,00%	0,00%	100,00%
19	432,48	490,35	57,87	2,89%	2,89%	97,11%
12,7	450,15	1924,69	1474,54	73,71%	76,60%	23,40%
9,5	420,12	834,76	414,64	20,73%	97,33%	2,67%
4,75	450,69	502,62	51,93	2,60%	99,92%	0,08%
Fundo	354,2	355,75	1,55	0,08%	100,00%	0,00%
Massa total de Brita 1			2000,53	100,00%		

Fonte: Autora (2023).

Nota-se então que o diâmetro máximo do pedrisco é equivalente à 9,5 mm e o diâmetro mínimo é de 4,75 mm, de modo análogo, conclui-se que o máximo diâmetro encontrado para a brita 1 foi de 19 mm e o mínimo de 9,5 mm, já que a porcentagem retida na peneira de 4,75 mm não é em quantidade representativa. Pelo Gráfico 1 percebe-se que a granulometria dos agregados é contínua, com maior quantidade de partículas em um único tamanho, contribuindo para o bom intertravamento das britas.

5.2 MASSA ESPECÍFICA

Conforme os procedimentos da NBR 9833 (ABNT, 2009), foram encontrados os seguintes resultados de massa específica aparente para cada traço expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa específica do concreto em estado fresco.

Traço	Massa do concreto (kg)	Massa específica aparente (kg/m ³)
T0	3,80	2048,43
T15	4,44	2393,43
T30	4,36	2350,30

Fonte: Autora (2023)

5.3 ÍNDICES FÍSICOS

As propriedades físicas do concreto se correlacionam diretamente com algumas de suas propriedades mecânicas, por exemplo, a porosidade do concreto e a sua capacidade de resistência à compressão.

Os resultados para cada traço, foram obtidos pela média das medições dos fragmentos das amostras secas, saturadas e submersas em água, respeitando o tempo necessário para cada etapa. Estes valores são apresentados na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Valores obtidos em ensaio de índices físicos.

ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE						
Traço	Massa submersa (g)	Média massa submerso (g)	Massa saturada (g)	Média massa saturada (g)	Massa seca (g)	Média massa seca (g)
T0	629,260	725,920	1095,950	1287,793	1032,680	1209,047
	875,690		1550,330		1459,640	
	672,810		1217,100		1134,820	
T15	357,340	690,840	614,490	1242,790	577,990	1167,470
	1024,340		1871,090		1756,950	
T30	702,990	739,670	1231,630	1311,790	1170,130	1245,885
	776,350		1391,950		1321,640	

Fonte: Autora (2023)

Com as médias das massas, os dados foram inseridos na Equação 4 e Equação 5 e definiram-se as porcentagens de absorção de água e índice de vazios de cada dosagem, conforme exposto na Tabela 9.

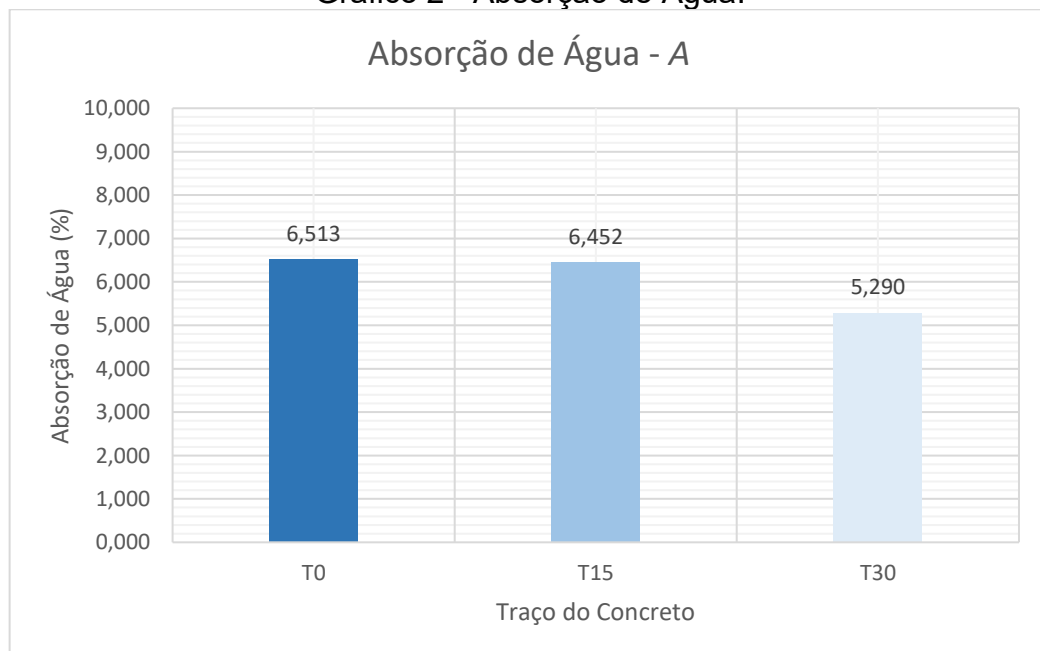
Tabela 9 - Resultados das propriedades físicas.

Traço	Absorção de Água (%)	Índice de Vazios (%)
T0	6,513	14,015
T15	6,452	13,646
T30	5,290	11,519

Fonte: Autora (2023)

De modo geral, as porcentagens de absorção de água do concreto permeável foram baixas, característica apropriada devido à ausência de agregados miúdos na composição dos traços. Há uma similaridade entre o T0 e T15, com menos de 1% de diferença os resultados, entretanto, o T30 apresenta uma redução de 23% de absorção de água, sendo este, o traço com 30% de substituição de pedrisco por brita 1. No gráfico 2 pode-se visualizar as respectivas porcentagens de cada traço.

Gráfico 2 - Absorção de Água.

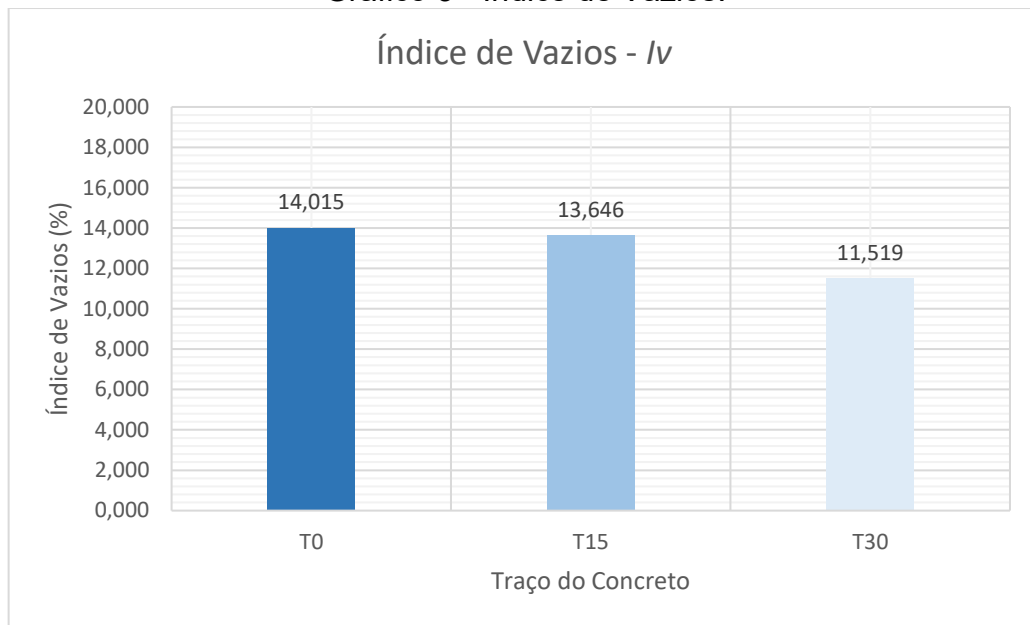


Fonte: Autora (2023)

Essa variabilidade na absorção de água do T30 pode ser explicada pela menor porosidade em seu interior, pois é possível perceber no Gráfico 3 que o T30

também é a dosagem que possui o menor índice de vazios entre as três, ou seja, menor volume de vazios em seu arranjo estrutural. O T0, composto apenas por pedrisco, e o T15, composto por substituição parcial de 15% de pedrisco por brita 1, não apresentam grandes discrepâncias, sendo esta diferença de apenas 3%. Porém, com a substituição de 30% por brita 1, T30, percebe-se uma redução de 22% do volume de vazios no interior do concreto.

Gráfico 3 - Índice de Vazios.



Fonte: Autora (2023)

Diante disso, identifica-se a correlação entre a absorção de água e o índice de vazios, com valores proporcionais entre os resultados, sendo maior a absorção de água conforme maior a quantidade de vazios no interior do concreto. A maior porcentagem de mistura do pedrisco com brita 1, com o arranjo dos agregados de diferentes tamanhos, resultou no concreto menos poroso (T30).

Em comparação às dosagens testadas por Ramos (2018), o T1 referência de Ramos, composto apenas por brita 1 e com ausência de agregado miúdo, apresentou maior absorção de água que os traços T0, T15 e T30 desse estudo. Em contrapartida, os valores do índice de vazios de T0, T15 e T30 foram maiores que os valores de índice de vazios das dosagens de Ramos (2018), concluindo-se então, que os traços de concreto desse estudo são muito mais porosos, sendo essas características refletidas na capacidade de percolação do concreto.

5.4 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Para Marchioni & Silva *et al.* (2011) o valor de $K \geq 1,40 \times 10^{-3} \text{m/s}$ proporciona um fator de segurança que garante o funcionamento hidráulico por toda vida útil do pavimento, levando em conta que o concreto poroso irá se colmatar ao longo do tempo. Valores inferiores a esta referência apresentam permeabilidade muito baixa, dificultando a infiltração de água e reduzindo a vida útil do pavimento.

Com o ensaio de permeabilidade realizado, os seguintes valores foram obtidos e são apresentados na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 - Resultados do ensaio de permeabilidade.

PERMEABILIDADE					
Traço	Área média - A - (cm ²)	Altura média - L - (cm)	Vazão Média - Q- (cm ³ /s)	Altura Coluna d'água - H - (cm)	Coefficiente de Permeabilidade - K - (cm/s)
T0	77,601	19,663	136,467	34,663	0,9976
T15	77,972	20,100	62,217	35,100	0,4569
T30	76,746	21,683	50,617	36,683	0,3898

Fonte: Autora (2023)

De acordo com Marangon (2018), quanto maior for a temperatura, menor a viscosidade da água e, portanto, mais facilmente ela escoar pelos vazios do solo com correspondente aumento do coeficiente de permeabilidade. Logo, K é inversamente proporcional à viscosidade da água.

Como a temperatura da água no momento do ensaio se encontrava a 16°C, foi necessário realizar a correção no coeficiente de permeabilidade dos CP's, logo, multiplicou-se os coeficientes por 1,106 (encontrado na NBR 13292:2021), fator de correção equivalente à 16°C, e os valores finais obtidos estão apresentados na Tabela 11 abaixo.

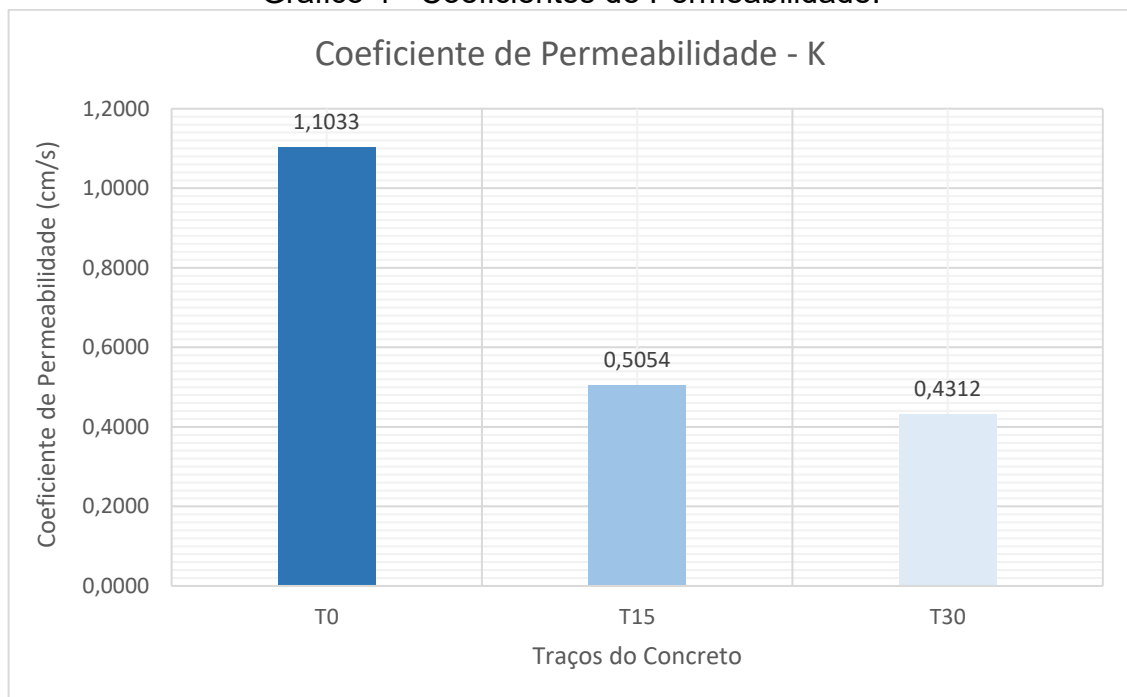
Tabela 11 - Coeficiente de permeabilidade final.

PERMEABILIDADE				
Temperatura da água (°C)	Coeficiente de Permeabilidade - K - (cm/s)	Correção da temperatura da água	Coeficiente de Permeabilidade corrigido - K - (cm/s)	Traço de Concreto
16	0,9976	1,106	1,1033	T0
	0,4569	1,106	0,5054	T15
	0,3898	1,106	0,4312	T30

Fonte: Autora (2023).

Da mesma forma que o T0 possui maior índice de vazios e maior porcentagem de absorção de água, no ensaio de permeabilidade, o T0 também foi o traço que apresentou maior permeabilidade da água, apresentando mais que o dobro de permeabilidade que o T15 e T30. A comparação entre os coeficientes de permeabilidade pode ser visualizada com o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Coeficientes de Permeabilidade.



Fonte: Autora (2023)

Todos os traços apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade, acima do K mínimo recomendado pela norma ACI 522R-06 de 2006.

Para a análise desse coeficiente de permeabilidade, é comum lidar com valores em ordem de grandeza, assim, é possível determinar a faixa típica do material,

conforme apresenta a Figura 11. As permeabilidades foram adequadas à finalidade do tipo de concreto que se deseja obter.

Figura 11 - Variação dos valores de K.

	K		Material	Características de escoamento
	<i>cm/seg</i>	<i>m/dia</i>		
10 ⁺²	1 a 100	864 a 86400	Pedregulho limpo	Bom
10 ⁻³	0,001 a 1	0,86 a 864	Areia limpas, misturas de areia limpas e pedregulho	
	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³	8,64 x 10 ⁻⁵ a 0,86	Areias muito finas; siltes; misturas de areia, silte e argila; argilas estratificadas
10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁷	8,64 x 10 ⁻⁷ a 8,64 x 10 ⁻⁵	Argilas não alteradas	Impermeável

Fonte: Marangon (2018)

Todas as dosagens estudadas, T0, T15 e T30, apresentaram permeabilidades superiores às permeabilidades encontradas por Ramos (2018), conforme Figura 12, sendo da ordem de aproximadamente 2% a 4% maiores.

Figura 12 – Resultados obtidos por Ramos (2018)

Ensaio de Permeabilidade (07/11/18)						
	H (cm)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume I (g)	Volume II (g)	Volume III (g)
T1)	36,2	10	102	3099,0	3076,0	3087,0
T2)	34,8	10	116	2903,0	2798,0	2956,0
T3)	34,2	10	122	0,00	0,00	0,00

Fonte: Ramos (2018)

Em termos de comparação de traços com apenas um tipo de agregado graúdo, o T1 estudado por Ramos (2018) apenas com brita 1 e T0 apenas com pedrisco, esta dosagem apresentou cerca de 4,75% mais permeabilidade do que o T1.

Essa superioridade se dá pelo fato da ausência de agregado miúdo e pelos maiores índices de vazios obtidos. Percebe-se então que a influência do agregado graúdo é bastante significativa no traço do concreto, aumentando significativamente sua capacidade de percolação.

5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O preparo das amostras e o ensaio de resistência à compressão foram todos realizados no laboratório da fábrica Perville, com mínimo de 28 dias de cura úmida.

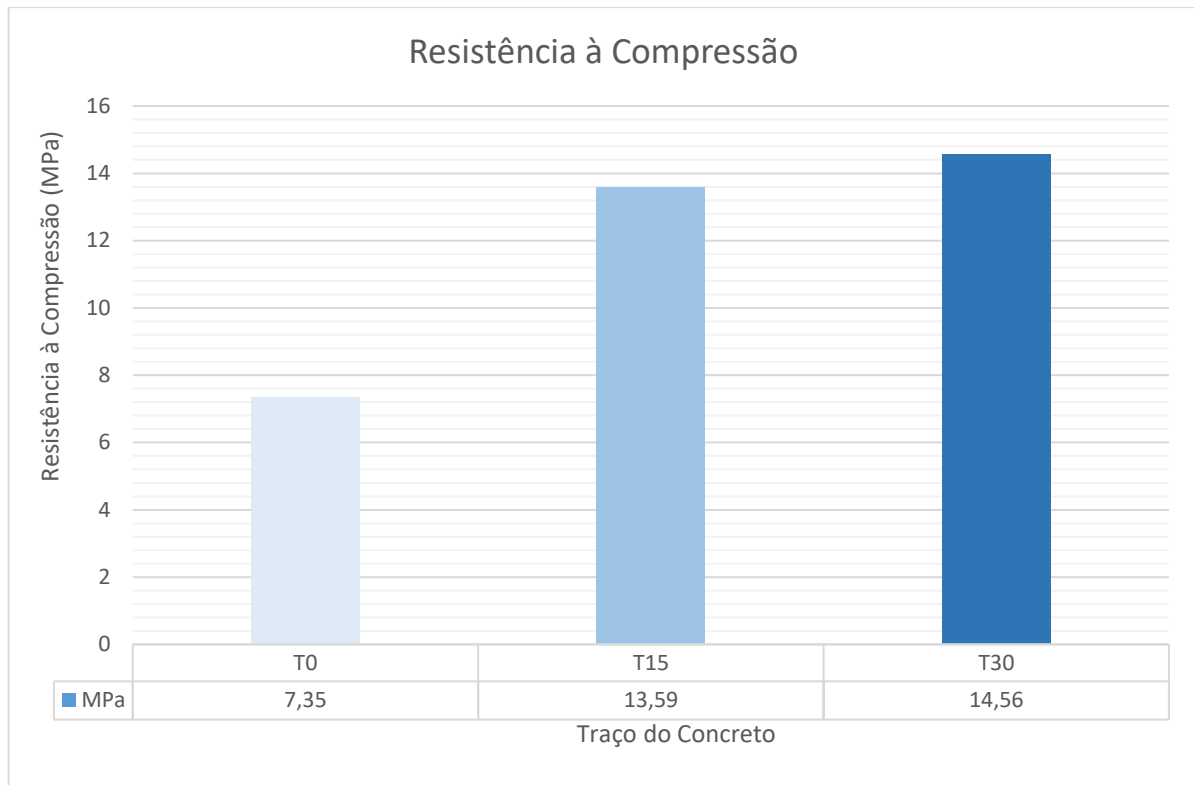
Com os valores dos carregamentos suportados, obtém-se o Gráfico 5 e os dados apresentam-se na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - Dados encontrados com ensaio de resistência à compressão.

Formulação	Massa (Kg)	Fck (Kgf)	Fck (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Média Final (MPa)
T0	3,00	6,32	7,89	6,367	1,8211	7,349
	2,98	2,74	3,42			
	2,94	6,30	7,87			
	2,94	5,03	6,28			
T15	3,30	12,00	14,99	13,936	0,7237	13,585
	3,30	11,01	13,75			
	3,24	11,24	14,04			
	3,30	10,38	12,97			
T30	3,34	12,61	15,75	13,958	1,2909	14,560
	3,32	9,73	12,15			
	3,30	10,93	13,65			
	3,36	11,43	14,28			

Fonte: Autora (2023)

Gráfico 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2023)

Através de uma análise prévia, observa-se o desvio padrão e a média aritmética simples dos quatro CP's, tendo sido eliminado o valor que apresentava a maior divergência da média, em relação ao desvio padrão, podendo ser ele um valor acima ou abaixo da média inicial, e assim, obtém-se as resistências finais de cada traço.

O desvio padrão encontrado foi de 1,82/0,72/1,29 para T0/T15/T30, respectivamente. Todos os corpos de prova foram ensaiados sob as mesmas condições, de acordo com a NBR 5739 (2018).

A presença de 15% de brita 1 na mistura de agregado graúdo junto ao pedrisco (T15), expressa um acréscimo de 85% de resistência à compressão em relação ao traço apenas com pedrisco na composição (T0). O traço com 30% de substituição por brita 1 (T30) apresenta uma diferença ainda maior, sendo uma resistência 98% superior à resistência de T0, caracterizando a maior resistência obtida entre as dosagens testadas no presente trabalho.

Essa maior resistência à compressão pode ser correlacionada com a quantidade de vazios, absorção de água e permeabilidade que o CP apresentou, visto

que o T30 foi o traço com menores valores nessas propriedades. Em compensação, manifestou o melhor suporte à tensão de compressão. Contudo, as resistências encontradas em todos os traços atendem ao esperado para concretos permeáveis, variando de 5,0 a 25,0MPa conforme a literatura, porém ainda não atingem o mínimo requerido em norma, de 30 MPa, para que seja possível a aplicação em pavimentos de tráfego moderado a alto.

Quando comparados os traços do presente trabalho com os analisados na pesquisa de Ramos (2018), nota-se que as dosagens com a presença de agregado miúdo deste, seja areia ou cinza de madeira, possuem uma resistência muito superior aos traços sem a presença de finos. Isto porque a pasta cimentícia é maior, preenchendo os vazios na estrutura do concreto e impactando diretamente a sua resistência mecânica.

Ao comparar-se especificamente o traço 1 (T1), dosagem referência de Ramos (2018), com o T0, percebe-se que a resistência de T1 é maior em 37,96% quando o agregado graúdo é composto apenas por brita 1 do que quando é composto apenas por pedrisco (T0), porém, quando mistura-se a composição com diferentes granulometrias, como é o caso de T15 e T30, a resistência à compressão apresenta um aumento de 34,02% e 43,60% em relação à dosagem sem agregado miúdo (T1) de Ramos (2018) respectivamente. Compara-se essas dosagens pois todas elas não apresentam finos em sua composição, podendo-se avaliar as mesmas propriedades. As dosagens de Ramos (2018) que possuíam finos obtiveram resistências melhores que as resistências dos traços deste estudo. Os resultados das comparações estão apresentados na Figura 13.

Em termos de resistência, os resultados de T0, T15 e T30 são aceitáveis para aplicações diversas deste concreto permeável, como isolamento térmico, acústico, redução do efeito de ilha de calor e entre outros, mas excetuando-se a aplicação em pavimentos de tráfego alto, pois estes requerem maiores resistências.

Figura 13 – Comparação com as dosagens de Ramos (2018)

DOSAGENS DE RAMOS (2018)			
Formulação	Resistência a compressão (MPa)	Formulação	Resistência a compressão (MPa)
T0	7,35	T1	10,14
T15	13,59	T2	26,96
T30	14,56	T3	25,53

Fonte: Autora (2023).

Vale ressaltar ainda que os corpos-de-prova não romperam repentinamente, como uma explosão, e sim gradualmente, gerando fissurações transversais em toda a superfície e desagregando-se em pequenos fragmentos no caso de T15 e T30. Apenas T0, composto por pedrisco, que se fragmentou quase que partícula por partícula. A Figura 14 a seguir representa o rompimento.

Figura 14 – Exemplos dos corpos-de-prova rompidos.



Fonte: Autora (2023).

6 CONCLUSÃO

As dosagens estudadas nesta pesquisa apresentaram resultados satisfatórios em termos de permeabilidade do concreto. O processo de compactação das misturas é uma importante etapa para que se possa ter bons resultados, pois faz com que as partículas se acomodem de maneira mais uniforme, aumentando a rigidez e a resistência do concreto.

Em relação às dosagens estudadas, a dosagem T30, com substituição parcial de 30% de pedrisco por brita 1, cuja resistência à compressão foi de 14,56 MPa, foi a maior entre os três traços analisados. Para fins de pavimentação, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) recomenda uma resistência mínima de 30MPa, que nesse caso, não foi atingido por nenhuma das dosagens, limitando a sua aplicação para este fim. Entretanto, este concreto pode ser útil para outras aplicações, tais como base não estrutural, isolante térmico e acústico, para absorver menos radiação solar, reduzir efeitos de ilha de calor e entre outros.

No quesito permeabilidade, os resultados foram satisfatórios, obtendo-se boa permeabilidade em todos os traços. Todos os traços enquadram-se adequadamente à permeabilidade esperada para pedregulhos, visto que a norma ACI 522R-06 (2006) estabelece como valor mínimo para o concreto permeável um coeficiente de permeabilidade (K) de $1,40 \times 10^{-3} \text{m/s}$.

O índice de vazios exerce uma influência importante nos resultados das propriedades do concreto permeável. Os espaços vazios estão diretamente ligados à permeabilidade e a resistência do material. Porém, devido à sua alta porosidade, a resistência desse concreto tende a ser mais reduzida, quando comparada ao concreto convencional. Por isso seu uso é muitas vezes limitado a áreas de tráfego leve ou pouco intenso.

Conforme o ACI (2006) pode-se considerar que a relação cimento/agregado, assim como o procedimento de compactação ou adensamento a ser utilizado na produção de concretos permeáveis, são os dois fatores mais importantes da mistura, pois afetam diretamente as características mecânicas do material.

Diante dos resultados obtidos, acredita-se que tanto a permeabilidade como a resistência mecânica podem ser bem influenciadas pela granulometria da mistura. Como busca-se encontrar um concreto que não seja adequado apenas em termos de

resistência mecânica ou percolação, mas sim que tenha bons índices em ambos os parâmetros, incentiva-se o estudo de variações desse traço.

Com o intuito de dar continuidade às pesquisas nessa área, propõe-se os seguintes trabalhos futuros:

- Desenvolver uma dosagem com pedrisco e agregado miúdo visando melhorar a resistência do concreto e manter boa permeabilidade;
- Analisar a substituição de diferentes granulometrias de agregados graúdos;
- Analisar a substituição de diferentes porcentagens de pedrisco (5%,10%,20%);
- Estudar quais os benefícios econômicos do concreto permeável;
- Analisar diferentes processos de compactação do concreto permeável;
- Estudar diferentes tipos de agregados graúdos, como por exemplo, resíduos de construção civil.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do Cimento Portland. **Boletim técnico**, São Paulo, n.106, 2002.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), Committe 522. **522R-06**: pervious concrete. Farmington Hills, Michigan, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. **Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines**. Technical Report. Permeable Pavement Technical Committee of the Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, United States, 2013.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo — Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.

BALBO, J. T.; MARTINS, J. R. S.; CARGNIN, A. P.; RIBEIRO, H. L.; ESPOSITO, C. M.; SILVA E. R.; **Concreto colorido e permeável para ciclovias**: estudo de

dosagem laboratorial. *Concreto e Construções*, São Paulo, ed 105, p. 34-41, Jan-Mar 2022, DOI: 10.4322/1809-7197.2022.105.0002.

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

Concrete Technology – **Portland Cement Association**, v. 25, p 8, Dez, 2004.

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da. **Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CROUCH, L.K; PITT, J.; HEWITT, R. **Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity**. *Journal of materials in Civil Engineering*, v. 19, n. 7, p. 561-568, jul. 2007.

DELEPRANI, Fernanda Bianchi. **Concreto permeável com a utilização de materiais reciclados**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Sustentáveis) — Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

DE SOUZA, B. C. G.; TRIGO, A. P. M.; FURINI, R. C. B.; SIMÕES, M. N.; ANONI, L. G. Dosagem de pavers de concreto permeável com agregado reciclado misto (ARM), São Paulo, ano L, ed. 108, p. 76-80, Out-Dez 2022, DOI: 10.4322/1809-7197.2022.108.0005.

GARBER, G. **Paving with pervious concrete**. 1. ed. Atglen: Schiffer Publishing Ltd., v. 1, 2010.

GERHARZ, B. **Pavements on the base of polymer- modified drainage concrete, Colloids and Surfaces**. A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 152, 1999.

HASELBACH, L.; POOR, C.; TILSON, J. **Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary Portland cement pervious concrete**. *Construction and Building Materials*, v.53, p.652-657, 2014.

HOLTZ, Fabiano da Costa, **Uso do concreto permeável na drenagem urbana: Análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, 2007. Editor Geraldo Cechella Isaia.

KEVERN, J.; HASELBACH, L.; SCHAEFER, V. Hot Weather **Comparative Heat Balances in Pervious Concrete and Impervious Concrete Pavement Systems**. Journal of Heat Island Institute International, v.7, n.2, 2012.

LAMB, Gisele Santoro, **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LAMBERTI, Lucas Alves. **Desempenho hidrológico de revestimentos de concreto de cimento portland aplicados a pavimentos permeáveis**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MARANGON, M. **Unidade 1 - Hidráulica Dos Solos**. UFJF: Mecânica dos Solos II, Faculdade de Engenharia – NuGeo/Núcleo de Geotecnia. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-2018-Cap%C3%ADtulo-01-Hidr%C3%A1ulica-dos-Solos-20181.pdf>>. Acesso em 21 de Junho de 2023.

MARIANO, Humberto Rodrigues. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

MARCHIONI, M.; SILVA, Cl. O. **Pavimento intertravado permeável – melhores práticas** - ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2011.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Pervious Concrete Contractor Certification**. NRMCA Publication, Silver Spring, n. 2PPCRT, 2011.

NEITHALATH, N., WEISS, W.J., and OLEK, J. **Enhanced porosity concrete: Electrical Impedance, Acoustic Absorption, and Hydraulic Permeability**. Presented at the ACI Fall Convention, Boston, 2003.

NELSON, P. M. **Designing porous road surfaces to reduce traffic noise**. TRL Annual Review, Transportation Research Laboratories, UK, 1994.

ONSTENK, E.; AGUADO, A.; EICKSCHEN, E.; JOSA, A. **Laboratory study of porous concrete for its use as top layer of concrete pavements**. Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete Pavement and Rehabilitation, Purdue University, Vol.2, pp. 125-139, Indiana, 1993.

PEDROSO, Fábio Luis. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. São Paulo, ano 23, ed. 53, p. 14-19, Jan-Mar 2009, ISSN 1809-7197.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 2a Ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

POLASTRE, B., SANTOS, L. D. Concreto Permeável: Impermeabilização do Solo e Drenagem Urbana. 2006. **AUT 221 – Arquitetura, Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. USP, 2006.

PUTMAN, B.J.; NEPTUNE, A.I. **Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements**. Construction and Building Materials, v.25, 2011; p.3480–5.

RAMOS, Gustavo Moreira. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de agregado miúdo e resíduo (cinza de madeira)**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

REYES, F.; TORRES, A. **Concreto poroso: tecnologia e investigación para su uso en pavimentos**. In: Revista Noticreto nº65. Colombia, p. 56-61. 2002.

RIZVI, R; TIGHE, S; HENDERSON, V; NORRIS, J. **Evaluating the Use of Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009.

RUSHTON, B. **Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads**. Journal of Water Resources Planning and Management, v.127, n.3, p.172–179, 2001.

SACCANI, A. M.; BIGNOZZI, C.; SANDROLINI, F. New polymers mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microestruure and mechanical properties. **Composites: Part A**, v. 31, p. 97-106, 2000.

SALES, Tarso Luís de, **Pavimento permeável com superfície em blocos de concretos de alta porosidade**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SHEN, S.; BURTON, M.; JOBSON, B.; HASELBACH, L. Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urbanroad environment. **Construction and Building Materials**, v.35, p.874-883, Jun. 2012.

SHU, X.; HUANG, B.; WU, H.; DONG, Q.; BURDETTE, E.G. **Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures**. Construction and Building Materials, v. 25, p.3187-3192, 2011.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**. Skokie: Portland Cement Association e Silver Spring: National Ready Mixed Concrete Association, 2004. iv, 28 p.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. **Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate**. Cement & Concrete Composites. v. 33, p. 1080-1085, 2011.

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