

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VITÓRIA LUIZA MENDES DE ALBUQUERQUE CRUZ

**ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTO COM
MATERIAIS DO ALTO SERTÃO ALAGOANO**

Delmiro Gouveia

2023

VITÓRIA LUIZA MENDES DE ALBUQUERQUE CRUZ

**ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTO COM
MATERIAIS DO ALTO SERTÃO ALAGOANO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado/Licenciatura em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Lima.

Delmiro Gouveia

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

C957e Cruz, Vitória Luiza Mendes de Albuquerque

Estudo da dosagem de concreto permeável para pavimento com materiais do alto sertão alagoano / Vitória Luiza Mendes de Albuquerque Cruz. - 2023.

64 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2023.

1. Construção civil. 2. Concreto permeável. 3. Dosagem. I. Lima, Alexandre Nascimento de. II. Título.

CDU: 624.05

Folha de Aprovação

VITÓRIA LUIZA MENDES DE ALBUQUERQUE CRUZ

ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTO COM MATERIAIS DO ALTO SERTÃO ALAGOANO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado/Licenciatura em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Alexandre Nascimento de Lima.

Alexandre Nascimento de Lima

(Orientador – MSc Alexandre Nascimento de Lima, UFAL)

Banca examinadora:

Rafael Santos Carvalho

(Examinador Externo – MSc. Rafael Santos Carvalho)

Wendell José Soares dos Santos

(Examinador(a) Interno(a) – MSc. Wendell José Soares dos Santos, UFAL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me guiado e sustentado durante esses anos de graduação.

À minha família, em especial à minha mãe, Fabiana, a minha avó, Socorro, ao meu tio, Fernando e a minha tia, Aparecida (Lida), por todo apoio, amor e compreensão a mim depositados. À minha irmã, Heloísa, que apesar de tão pequena me proporcionou momentos de alegria, tão necessários para a caminhada ser mais leve.

Agradeço as amizades construídas ao longo dos anos, em especial a Isabelly Marília, Rikelly Rafaella, Nathalie Oliveira, Cleyslany Oliveira e Vivian Stefanny, que dividiram comigo risadas e choros e me proporcionaram experiências inesquecíveis. Aos meus amigos Micael Alves, Pedro Cruz, Clecio e Edton Costa, agradeço por todo apoio, por cada momento que vivemos juntos. Vocês tornaram essa trajetória mais especial, obrigada por tudo!

A i9 Engenharia Junior e a Enactus expresso minha gratidão. Esses programas me proporcionaram vivenciar um pouco do mercado de trabalho e do empreendedorismo, me ajudaram a descobrir minhas afinidades na área da engenharia. Além disso, essas experiências me trouxeram uma percepção mais humana, uma visão de outras realidades e possibilidades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Lima, muito obrigada por ter me orientado e desafiado com esse tema pouco estudado no Brasil. Apesar das dificuldades encontradas no caminho, foi um processo muito gratificante.

Por fim, agradeço a todo corpo docente e aos demais funcionários da UFAL, que durante a graduação foram de grande importância para minha formação.

“Me celebro
Diariamente
Pela força que tive
Para me trazer
Até aqui.” (Barbara Marca, 2020).

RESUMO

Atualmente não existe uma metodologia consolidada que permite a determinação da quantidade de materiais necessários para obtenção de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. Esse fato limita a aplicação deste tipo de concreto em obras de construção civis. Além disso, as metodologias mais utilizadas para a dosagem de concreto são fundamentadas em teste e repetição de experimentos anteriores. Neste estudo, o objetivo principal foi calcular uma dosagem adequada utilizando materiais do sertão alagoano. O método de dosagem considerado foi o da norma americana American Concrete Institute (ACI). Esse método foi utilizado para a elaboração de dois traços com porosidades de 15% e 20%, respectivamente. O ensaio de resistência a flexão foi adaptado por falta de instrumentos adequados no laboratório. O valor encontrado, considerando porosidade de 20%, foi de 4,74 MPa. A permeabilidade atingiu um valor maior que o esperado, apesar das complicações durante o ensaio. Dessa forma, os materiais utilizados juntamente com a dosagem do concreto poroso trouxeram resultados positivos em geral.

Palavras-chave: concreto permeável; dosagem; sertão.

ABSTRACT

Currently, there is no consolidated methodology that allows the determination of the amount of materials needed to obtain the mechanical and hydraulic properties of permeable concrete. This fact limits the application of this type of concrete in civil construction works. In addition, the most used methodologies for concrete dosage are based on tests and reproduction of previous experiments. In this study, the main objective was to calculate an adequate dosage using materials from the backlands of Alagoas. The dosage method was considered according to the American Concrete Institute (ACI) standard. This method was used to create two concrete recipes with porosities of 15% and 20%, respectively. Flexural strength test was adapted due to the lack of suitable instruments in the laboratory. The values found, considering a porosity of 20%, of 4.74 MPa. Permeability reached a value higher than expected, despite complications during the test. In this way, the materials used together with the dosage of porous concrete brought positive results in general.

Keywords: permeable concrete; dosage; backwoods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de infiltração total.....	23
Figura 2 - Sistema de infiltração parcial.....	23
Figura 3 - Sistema sem infiltração.....	24
Figura 4 - Representação das porosidades abertas, fechadas e vazios da pasta de concreto.....	26
Figura 5 - Relações entre a porosidade e a condutividade hidráulica de concretos permeáveis, por meio do permeâmetro de carga variável.....	29
Figura 6 - Modelos de permeâmetro de carga variável com extravasor (a) e saída (b).	30
Figura 7 - Compactação em campo do concreto permeável.....	34
Figura 8 - Ensaio de densidade do cimento.....	40
Figura 9 - Ensaio de massa unitária da brita.....	41
Figura 10 - Organização das peneiras	42
Figura 11 - Material retido na peneira.....	42
Figura 12 - Brita em tanque com água.....	43
Figura 13 - Corpos de prova oldados.....	49
Figura 14 - Insumos.....	49
Figura 15 - Ensaio de permeabilidade do concreto.....	50
Figura 16 - Dispositivos de carga para determinação da resistência à tração na flexão.....	51
Figura 17 - Amostra na prensa.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre pasta e vazios para agregados de 9,5 mm	45
Gráfico 2 - Onde vai parar a caneta quando você a deixa cair.....	47
Gráfico 3 - Comparativo entre tamanho da peneira e porcentagem de material retido.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Resistência mecânica e espessura mínima.....	32
Tabela 2	- Consumo e proporções comuns nas misturas de concreto permeável.....	33
Tabela 3	- Comparação de métodos de compactação de diversos autores.....	34
Tabela 4	- Valores b/b_o efetivos.....	44
Tabela 5	- Determinação da massa de água para ensaio.....	49
Tabela 6	- Volumes deslocados pela massa.....	52
Tabela 7	- Pesos individuais das amostras de brita.....	53
Tabela 8	- Composição granulométrica da brita.....	53
Tabela 9	- Massa das amostras para ensaio de densidade.....	54
Tabela 10	- Resumo dos traços.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resistência mecânica e espessura mínima.....	32
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos Gerais	15
1.3	Objetivos Específicos	15
1.4	Estrutura do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Problemática relacionada à impermeabilização do solo urbano	17
2.2	Concreto permeável	18
2.2.1	Breve contexto histórico	18
2.2.2	Vantagens Econômicas	20
2.2.3	Vantagens Ambientais	21
2.2.4	Sistemas de Infiltração.....	22
2.3	Características do concreto permeável	24
2.3.1	Porosidade.....	26
2.3.2	Permeabilidade.....	27
2.3.3	Resistência Mecânica.....	30
2.3.4	Materiais utilizados para compor o Concreto Permeável.....	32
2.3.5	Compactação.....	33
2.3.6	Cura.....	35
2.4	Método de Dosagem	35
2.4.1	Método do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA).....	35
2.4.2	Método American Concrete Institute (ACI).....	36
2.4.3	Método de Nguyen <i>et al.</i>	37
2.4.4	Comparação dos Métodos de Dosagem.....	37
3	MÉTODO DE PESQUISA	39
3.1	Estratégia de Pesquisa	39
3.2	Caracterização de Materiais e Ensaios	39
3.2.1	Massa específica do cimento.....	40
3.2.2	Massa unitária da brita.....	41
3.2.3	Composição granulométrica da brita.....	42

3.2.4	Determinação da densidade e absorção de água dos agregados graúdos.....	42
3.2.5	Método de dosagem pela American Concrete Institute (ACI).....	43
3.2.6	Confeção do concreto e moldagem dos corpos de prova.....	47
3.2.7	Permeabilidade do concreto.....	48
3.2.8	Resistência à tração por flexão.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	Massa Específica do Cimento.....	52
4.2	Massa Unitária da Brita.....	52
4.3	Composição Granulométrica.....	53
4.4	Densidade e Absorção de Água.....	54
4.5	Cálculo do Traço.....	55
4.5.1	Primeiro Traço.....	55
4.5.2	Segundo Traço.....	57
4.6	Permeabilidade do Concreto.....	57
4.7	Resistência à Tração por Flexão.....	59
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A atuação do desenvolvimento da humanidade, buscando garantir conforto e segurança, vem causando diferentes impactos no meio ambiente, que, na maioria das vezes, é prejudicial para o solo, fauna, flora e seres humanos.

Atualmente, as cidades têm planejamentos urbanos deficientes que causam danos extremos. Naturalmente, com o aumento da população, houve uma expansão territorial, para cultivo de alimentos ou para urbanização. A utilização dessas áreas causou alterações nos cursos d'água e no solo e desmatamento. Dito isso, houve um favorecimento para o avanço tecnológico e das civilizações. Ao mesmo tempo, houve prejuízos para a dinâmica ambiental.

Além da expansão urbana desenfreada, a preocupação com os recursos hídricos, solo e vegetação ainda não é ideal para evitar os danos, formando picos de vazão e aumento da velocidade da movimentação de água. Isto acarreta em inundações de proporções enormes. Apesar de existirem estudos e parâmetros que mostram a situação preocupante do planeta, o padrão imposto pela sociedade atual para um avanço maior impõe políticas cada vez menos preocupadas com a conservação do meio ambiente.

O concreto permeável, uma tecnologia relativamente nova no Brasil, facilita a passagem do fluido através do mesmo, valorizando a drenagem natural que o solo proporciona. Além disso, oferece a possibilidade de implantação de um reservatório para estoque, podendo ser usada para consumo não humano, após as devidas verificações de substâncias presentes.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo determinar um traço favorável, utilizando os materiais disponíveis na região do sertão alagoano, para áreas de passeio. Além disso, verificar a aplicabilidade e eficiência do sistema, e aferir a condutividade hidráulica no pavimento para observação de taxa de infiltração com a limpeza.

1.1 Justificativa

Considerando um grande problema nas cidades que é a falta de planejamento de drenagem urbana, o concreto permeável seria uma alternativa para evitar enchentes, e até para estocagem de água para irrigação na cidade.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolvimento e avaliação do desempenho hidráulico e de resistência de um

traço de concreto permeável, utilizando insumos oriundos do sertão alagoano.

1.3 Objetivos Específicos

- a) Realizar um levantamento das normas para ensaios referentes ao concreto permeável;
- b) Realizar a dosagem de um traço do concreto permeável através de método encontrado na literatura;
- c) Caracterização de materiais disponíveis no sertão alagoano para confecção do concreto, para verificação de aplicabilidade;
- d) Verificar eficácia do traço calculado através dos ensaios realizados.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 caracteriza o problema onde se insere esta pesquisa, justificando e apresentando o tema e seus objetivos.

O capítulo 2 aborda toda a problemática causada pela falta de drenagem urbana, um breve histórico sobre as primeiras aplicações do concreto permeável, bem como suas vantagens econômicas e sociais. Além disso, detalha as características do concreto poroso.

O capítulo 3 detalha a estratégia adotada para atingir os objetivos propostos, o traço adequado e outras informações pertinentes sobre o desenvolvimento da mesma.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados e discussões obtidos, em particular a permeabilidade do concreto permeável obtido com o traço calculado. Traz a verificação da aplicabilidade do concreto produzido em laboratório.

Por fim, o capítulo 5 contém as conclusões extraídas do trabalho, assim como sugestões para o prosseguimento de estudos na área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado o contexto histórico da drenagem urbana e utilização do concreto permeável no mundo, bem como propriedades hidráulicas e mecânicas de cada elemento do mesmo e suas normas.

2.1 Problemática relacionada à impermeabilização do solo urbano

No Brasil, o grande desenvolvimento urbano se deu no início dos anos 1960 até o final dos anos 1990, quando o país passou de 55% para 76% de população urbana. A concentração de população ocorreu principalmente em metrópoles, causando um aumento na poluição e na frequência de inundações em função da impermeabilização do solo com estradas e edificações (TUCCI, 2005).

De acordo com os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 2015, a população urbana brasileira representava 84,72%. Considerando o crescimento populacional, é possível observar a expansão da impermeabilização nas vias pavimentadas, e a falta de infiltração de água no solo e de evapotranspiração.

Na presença de água, essas áreas impermeabilizadas conduzem fluidos com maiores vazões e maiores velocidades de escoamento superficial, devido a diminuição da presença de rugosidades nos pavimentos impermeáveis. Esses fatores podem provocar erosões dos solos das margens dos cursos d'água, e as partículas que se soltaram se acumulam nos leitos dos rios, colaborando com o assoreamento.

Segundo Esteves (2006), pavimentos impermeabilizados transmitem ondas de calor em grandes quantidades. Por isso, também colaboram para o aumento de temperatura das águas dos rios quando entram em contato com superfícies aquecidas pela radiação solar. Outra consequência é a redução do nível do lençol freático.

Além da falta de uma gestão de águas pluviais eficiente, essa situação pode causar uma redução de vida útil gradativa nas redes de drenagens já presentes, resultando em inundações cada vez mais frequentes e de maiores proporções trazendo enormes consequências sociais, ambientais e econômicas. Em grandes centros urbanos, a perda de redes de abastecimento chega até 50% (HÖLTZ, 2011).

As bacias hidrográficas perdem sua funcionalidade, pois os pontos de retenção natural e a habilidade das plantas de reter água também sofre alterações. Assim, a necessidade de instalações de tubulações e canais aumenta.

As medidas de controle implantadas para solucionar os problemas de sobrecarga das redes de drenagem urbana não são eficientes, considerando que não existem intenções financeiras para aplicar pesquisas, e ocorre a transferência de localização do problema.

A atuação dos municípios é fundamental com criações de leis e incentivos ao cumprimento das mesmas, assim como a fiscalização do cumprimento dessas leis. Além disso, existem medidas que os cidadãos podem tomar, como o descarte correto de lixo e a criação de área em que possa ocorrer o escoamento natural do fluido.

Os métodos e tecnologias que permitem uma maior infiltração têm como objetivo manter as condições hidrológicas do ambiente, na medida do possível, levando em consideração os processos de infiltração, interceptação e amortecimento das águas, diz Höltz (2011). Esses dispositivos podem contribuir com a redução de vazões, receber funcionalidade de reservatório e diminuição dos volumes escoados.

Outro ponto importante relacionado à falta de gerenciamento das águas pluviais, é que com o escoamento superficial ocorre o carreamento de resíduos sólidos. Segundo Neves (2006), a junção da urbanização desenfreada nas grandes cidades e da impermeabilização do solo por concreto e asfalto causa um acréscimo na geração de resíduos sólidos. Estes, que ficam armazenados nas ruas à espera das coletas, são arrastados pelas enxurradas causando obstrução nos canais e aumentando os problemas de drenagem.

As enxurradas, juntamente com a alta velocidade dos fluidos, carregam muito material solto ou solúvel para os corpos hídricos, que passam a receber cargas altíssimas de poluentes. Essa velocidade é aumentada quando se considera a impermeabilização do solo, e se torna uma fonte de degradação da qualidade de água em rios e lagos (HÖLTZ, 2011).

2.2 Concreto permeável

O Concreto permeável é uma alternativa a ser considerada, já que é uma tecnologia limpa que permite reverter um grande impacto ambiental. Sua característica de percolação de fluidos através da presença de vazios ajuda a problemática da impermeabilização urbana.

2.2.1 Breve contexto histórico

O primeiro uso do concreto permeável aconteceu em 1852 na construção de duas casas no Reino Unido. Depois disso, é citado novamente na literatura em 1923, quando um grupo de 50 casas de dois andares foram construídas apenas com clínquer, matéria prima básica

de diversos tipos de cimento, em Edimburgo, Escócia. No fim da década de 1930, a Associação Escocesa de Habitação Social, responsável pela construção de conjuntos habitacionais, iniciou a utilização do concreto permeável em construções residenciais (FRANCES, 1965).

O pavimento com estrutura porosa foi aplicado na França, entre 1945 e 1950, entretanto não houve sucesso, pois o betume utilizado na época não sustentava a estrutura, devido a presença de vazios (AZZOUT *et. al.*, 1994, apud ACCIOLI, 2005).

A norma americana traz algumas informações sobre a utilização do concreto no passado. Segundo a mesma, com a destruição causada pela Segunda Guerra Mundial, a Europa tinha necessidades habitacionais. Isso impulsionou o desenvolvimento de novos métodos na construção civil. O concreto permeável, por utilizar menos cimento em sua composição e pela mão de obra escassa após a guerra, se destacou, contribuindo com a produção de novas casas no continente europeu. A procura de tijolos e a incapacidade da indústria para suprir a demanda, resultou em novas pesquisas e aplicações. A partir da Segunda Guerra Mundial, o concreto permeável começa a ser aplicado em outras situações, como a área industrial e edifícios (ACI, 2010).

Entretanto, na América, a utilização do concreto permeável era mais escassa. Provavelmente por que no cenário de lá não havia escassez de material após a Segunda Guerra Mundial. No Canadá, o primeiro registro da utilização desse tipo de concreto aconteceu em 1960, na construção de algumas casas em Toronto. O mesmo material foi utilizado como base não-estrutural do “*Federal Building*”, localizado em Ottawa (ACI, 2010).

Mulligan (2005) afirma que, nos Estados Unidos, o concreto permeável entra em cena em 1970. Com o crescimento de áreas impermeáveis, o acúmulo de água crescia na mesma proporção, gerando inundações. Isso causou erosão e contaminação da qualidade da água. Inicialmente, o concreto permeável foi utilizado nos estados da Flórida, Utah e Novo México, mas espalhou-se rapidamente pelo país.

De volta a França, em 1978, O “*Ministère de l’Equipement*” lançou um programa de pesquisa com objetivo de buscar soluções para a diminuição de inundações. O pavimento permeável se destacou por proporcionar praticidade para integração com o ambiente das cidades. A partir daí, o pavimento permeável passou por um desenvolvimento industrial onde hoje é utilizado em vias, calçadas, entre outros (AZZOIT *et al*, 1994, apud ACCIOLI, 2005).

No Japão, esse tipo de pavimento já é utilizado e integrado a programas que incluem todas as técnicas de infiltração. Essas técnicas são utilizadas em áreas com possibilidades de inundações (WATANABE, 1995, apud ACCIOLI, 2005).

A partir da década de 90, surgem os primeiros estudos sobre o uso do concreto

permeável como um artifício aos sistemas de drenagem. Sua função era armazenar, temporariamente o excedente pluvial, aliviando o escoamento superficial. Assim, a incidência era reduzida e contribuía com a manutenção dos aquíferos subterrâneos (LAMB, 2014).

Em 2006, começou a ser construído o Parque Tecnológico de Belo Horizonte (BH-Tec). De acordo com o coordenador de obras, Eduardo Roscoe, o projeto foi executado de forma ecologicamente correta, tendo sua pavimentação de concreto permeável diminuindo os riscos de inundações e, além disso, alimenta as nascentes do parque (POLASTRE E SANTOS, 2006, apud HÖLTZ, 2011).

Em São Paulo, em 2006, a Secretaria de Coordenação das Subprefeituras, juntamente com entidades e empresas privadas, divulgou que novos métodos seriam testados para recuperação de algumas áreas. Uma empresa de arquitetura contribuiu com calçadas vivas, utilizando o concreto permeável, por conseguir auxiliar na manutenção dos aquíferos subterrâneos. O Centro Tecnológico de Hidráulica da USP, afim de aperfeiçoar os modelos de pavimento permeável, utilizou cerca de 800 metros do estacionamento e revestiu com blocos pré-moldados porosos. Após a análise dos primeiros dados, foi concluído que o asfalto drenante e os blocos pré-moldados devem ser utilizados em conjunto, para melhor funcionamento (SILVEIRA, 2010).

A permeabilidade é a principal razão para que este tipo de material seja pesquisado nos últimos tempos. Em pavimentação externa, é possível diminuir o escoamento e promover a penetração de água da chuva no solo. Logo, a utilização do material contribui com a manutenção dos aquíferos subterrâneos, a redução de velocidade da água, e a quantidade da mesma. Assim, obras de drenagem mais complexas são desnecessárias.

Entretanto, para concretos permeáveis com base cimentícia, não há estudos científicos suficientes no Brasil, sendo necessário desenvolver procedimentos de dosagem, moldagem e avaliação. Conseqüentemente, há carência de estudos voltados para os benefícios ambientais e econômicos. Em agosto de 2015, foi publicada a NBR 16416:2015: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos, que estabelece requisitos mínimos, especificações, execução e manutenção de pavimentos permeáveis.

2.2.2 Vantagens econômicas

Nos Estados Unidos, existe um estímulo para construtores e proprietários de obras considerarem o uso do concreto permeável. A Environmental Protection Agency (EPA), por exemplo, exige que proprietários de novos pátios ou de pátios recém construídos, com 0,4

hectares ou mais, tenham um sistema de água pluvial. Para viabilizar essa medida, de 10% a 20% da área dos pátios são destinadas para essas construções (NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010).

Além de fazer papel de pavimentação, o concreto permeável também atua como drenagem. Isso compensa o alto investimento, em termos de espaço e custos financeiros.

Por apresentar muitos vazios, o concreto permeável pode ser produzido *in loco*, com materiais da própria região, evitando assim custos de transporte. Ele não precisa de tecnologias avançadas e mão de obra especializada, desde que a equipe que irá executá-lo tenha um treinamento adequado. Ou seja, a utilização do concreto permeável favorece a economia local ao utilizar mão-de-obra e materiais locais (HÖLTZ, 2011).

Esse tipo de concreto, apesar de ter um custo relativamente alto, tem um custo ao longo da vida útil menor que os pavimentos tradicionais. Apesar de ser alto na implantação, o mesmo compensa ao longo do tempo devido a sua durabilidade. Os pavimentos de concreto necessitam de poucos reparos se comparados ao asfalto (NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010).

2.2.3 Vantagens ambientais

A US Environmental Protection Agency (EPA) classifica o concreto permeável como uma prática apropriada de gestão. Logo, sua utilização pode ajudar um projeto a conquistar a certificação LEED (US Green Building Council Leadership in Energy and Environmental Design). Esse crédito pode ser adicionado a outros, como redução de aquecimento terrestre, por permitir a troca de calor entre subsolo e superfície e, por ter uma cor mais clara, não absorvendo radiação solar; é um material reciclável e pode ser produzido com materiais da região (HÖLTZ, 2011).

O concreto permeável é ideal para proteção das árvores em áreas pavimentadas. Além de serem responsáveis pela produção de oxigênio, são responsáveis por oferecer sombra e produzir efeito de resfriamento, reduzindo os efeitos de ilhas de calor. O concreto permeável permite que árvores recebam mais ar e água sem comprometer a funcionalidade do mesmo.

A sua capacidade de filtragem é um ponto importante e positivo. Após o derramamento de fluidos sobre o concreto permeável, a passagem pelos vazios consegue reter as impurezas, melhorando a qualidade da água. O material tem a capacidade de capturar e degradar aerobicamente os resíduos de hidrocarbonos. Os componentes que estão aderidos ao concreto são aquecidos pelo calor do sol e o carbono é absorvido pelo solo, passando a ser

digerido por planta e fungos. Os poluentes presentes nas águas pluviais não contaminam os lençóis subterrâneos (HÖLTZ, 2011).

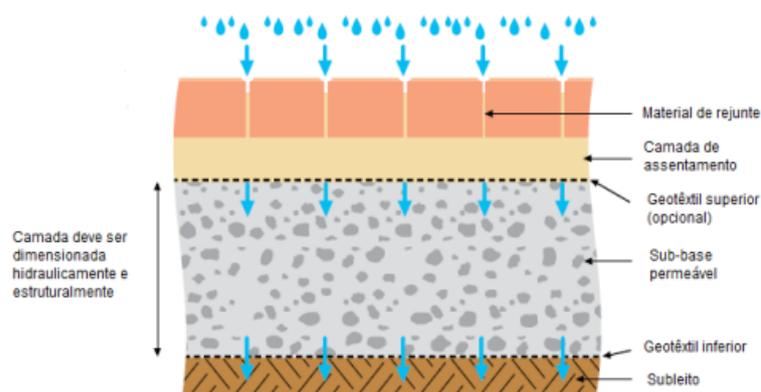
Existem vantagens para pavimentos que são as mesmas presentes no concreto convencional. Considerando que o cimento Portland é cinza, o concreto tem uma vantagem refletiva comparado ao asfalto. Em superfícies escuras como em asfaltos, o calor do sol tem absorção maior que a refletância acentuando as altas temperaturas nas cidades. O albedo é a capacidade reflectiva da radiação solar da superfície. O concreto tem um albedo muito alto, que traz vantagem sobre outros materiais. Vale ressaltar que o concreto escurece a medida que envelhece, reduzindo seu albedo e absorvendo energia solar. Além disso, a presença de vazios promove uma menor absorção de calor solar e resfria mais rapidamente em ambientes quentes (EOEARTH, 2011).

2.2.4 Sistemas de infiltração

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), existem três tipos de pavimentos em relação a infiltração de água: infiltração total, infiltração parcial e sem infiltração. A escolha do tipo de sistema que será adotado depende das condições locais.

No sistema de infiltração total, toda a água alcança o subleito, considerando que o solo deve ter permeabilidade maior que 10^{-3} m/s (ONO, 2018). Além disso, somente solos arenosos são permitidos para uso por serem altamente permeáveis. Parte da água da chuva é armazenada temporariamente na camada de base ou sub-base antes de infiltrar no subleito, assim não é necessário a presença de drenos ou trincheiras drenantes (ONO, 2017). A Figura 1 ilustra o sistema de infiltração total.

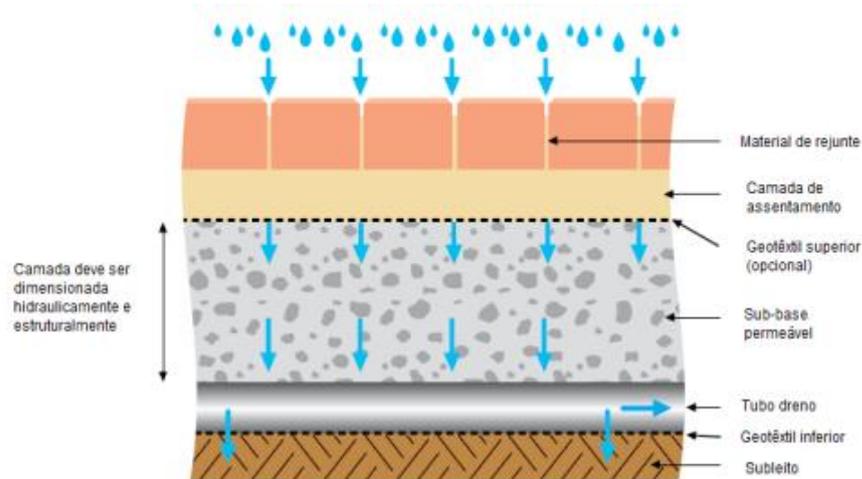
Figura 1- Sistema de infiltração total.



Fonte: ONO (2018).

No sistema de Infiltração parcial, apenas parte da água alcança o subleito e a outra parte fica temporariamente armazenada na estrutura permeável, para depois ser drenada por dreno auxiliar, como ilustra a Figura 2 (ABNT, 2015). Logo, quando o subleito tem coeficiente de permeabilidade variando entre 10^{-3} e 10^{-5} m/s, esse tipo de sistema é recomendado (ONO, 2018).

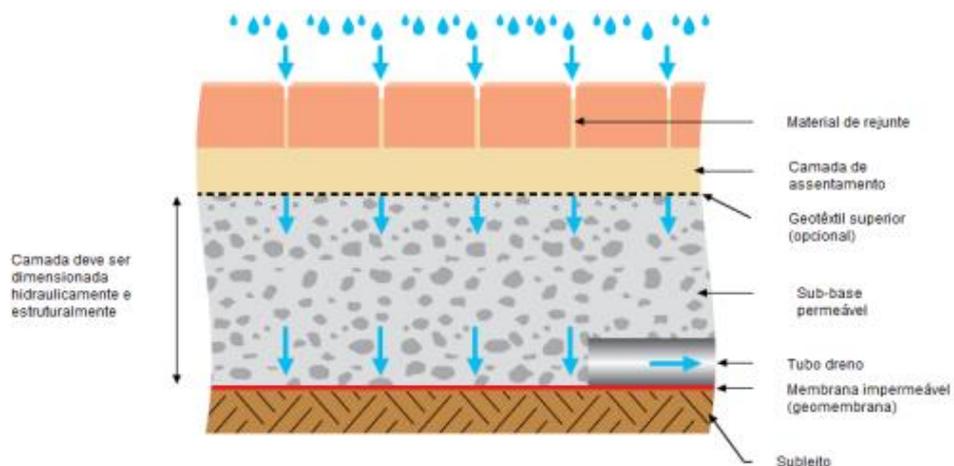
Figura 2- Sistema de infiltração parcial.



Fonte: ONO (2018).

O sistema sem infiltração, ilustrado na Figura 3, armazena a água temporariamente no concreto permeável. Assim, não ocorre a infiltração no subleito, tendo que ser removida com o auxílio de drenos (ABNT, 2015). Assim, quando o subleito apresenta baixa permeabilidade, é uma alternativa para uso. Nesses casos, é utilizada uma geomembrana para impermeabilização do solo e a água é direcionada para drenos (ONO, 2018).

Figura 3- Sistema sem infiltração.



Fonte: ONO (2018).

2.3 Características do concreto permeável

O concreto permeável deve possuir um alto índice de vazios, para garantir uma boa drenabilidade. Devido a essa possibilidade de a água infiltrar no solo, essa estrutura, quando corretamente projetada e implantada, pode influenciar nas vazões de pico que acontecem durante as chuvas.

A norma americana ACI 522R (ACI, 2006), define que o concreto permeável é constituído por cimento, agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado miúdo e água. Essa combinação irá produzir um material firme com espaços vazios com tamanhos entre 2 mm e 8 mm, permitindo que a água passe através deles. A norma também explana que o índice de vazios deve variar de 18% a 35%, com resistência à compressão entre 3,5 MPa e 28 MPa.

A produção do concreto permeável é crucial para formação de vazios interligados. Por isso, na maioria das composições, o agregado miúdo não é utilizado. Assim, tem-se um material formado por agregado graúdo coberto por uma camada de cimento e água. A área pode ser usada, em pequenas quantidades, para aumentar o volume da camada de recobrimento, sem aumento de custo. Esta técnica proporciona o material com um índice de vazios entre 15 e 25%, e capacidade de percolação na ordem de 200 L/m²/min (ACI, 2006). Entretanto, por conta de sua alta porosidade, a resistência mecânica desse concreto é reduzida, podendo ter seu uso limitado a áreas de tráfego leve.

Diante de estudos feitos pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que tinham o objetivo de avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis, constatou-se que superfícies impermeáveis com uso de asfalto geravam um escoamento superficial de 44% a mais que outras superfícies. Em áreas semipermeáveis, foi registrado um escoamento menor que as superfícies impermeáveis, entre 11% a 22% de escoamento superficial.

Ademais, a normalização para o assunto é insuficiente. A International Organization for Standardisation (ISO), reconhecendo essa lacuna, decidiu criar um grupo com especialistas de vários países, como Brasil, Coreia, China, Estados Unidos e Japão, para discutir a formulação de normas. Para viabilizar o uso desse tipo de concreto, é extremamente necessária e urgente (HÖLTZ, 2011).

Existem três tipos de concreto permeável que são caracterizados pelo nível de resistência e drenabilidade. O primeiro deles é o concreto permeável hidráulico, material com baixa resistência mecânica e alta permeabilidade, utilizado sem função estrutural. O concreto permeável comum tem resistência e permeabilidade medianas, e podem ser aplicados em áreas

com baixas tensões. E, por fim, tem-se o concreto permeável estrutural, que possui elevada resistência mecânica e baixa permeabilidade, tendo em sua composição materiais de granulometria reduzida e pode ser aplicado em lugares com tráfegos pesados (BATEZINI, 2011).

O concreto permeável apresenta uma textura superficial diferenciada comparado ao concreto convencional. A diferença está associada a pouca ou nenhuma presença de agregados miúdos em sua composição, o que resulta em uma superfície rugosa, elevando o coeficiente de atrito. Essa textura pode trazer segurança, principalmente em períodos chuvosos ou em ocorrência de neve e gelo na pista (LAMB, 2014).

O índice de vazios e a massa específica características do concreto permeável variam de acordo com a proporção de cada material presente na mistura, bem como o procedimento de compactação adotado. A massa específica aparente do concreto permeável, no estado fresco, varia de 1.300 kg/m³ a 2.000 kg/m³ (LAMB, 2014).

Considerando que o número alto de vazios que o concreto poroso tem, o índice de vazios afeta diretamente as características de resistência mecânicas do material no estado endurecido. O material que tiver índice inferior a 15% é considerado de baixa porosidade, enquanto que, um índice superior a 30% é altamente poroso. Estudos sugerem a utilização de índices de vazios na ordem de 20% para garantir permeabilidade e boa resistência (LAMB, 2014).

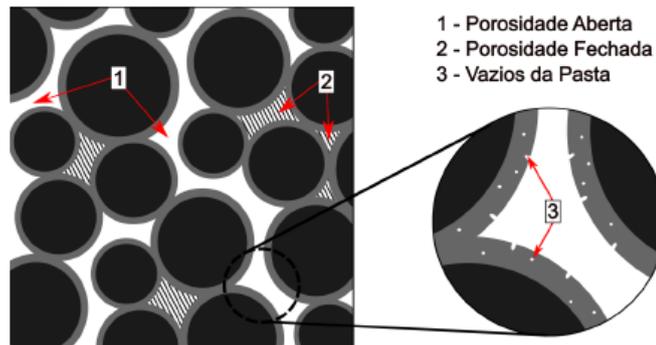
Uma das características mais importantes desse tipo de concreto é a permeabilidade. As taxas de fluxo de água típicas do concreto permeável variam de 120 L/m²/min (2 mm/s) a 320 L/m²/min (5,4 mm/s), valores muito superiores a capacidade de infiltração de outros tipos de solo. Entretanto, dependendo do tipo de solo que o concreto permeável esteja posto, pode ocorrer uma retenção maior de água e redução da quantidade da mesma que escoar superficialmente (LAMB, 2014).

O concreto permeável também apresenta boas propriedades acústicas, podendo ser utilizado para isolamento acústico e térmico. Kajio *et al.* (1998) avaliaram essas propriedades com comparações de níveis de ruído gerados em pavimentos com revestimento com concretos permeáveis com dois tipos de agregados, 6,3 mm e 12,5 mm, e em pavimentos com asfalto, considerando velocidades diferentes. Apesar de o diâmetro influenciar muito pouco na propagação do ruído, Olek *et al.* (2003) constataram que os vazios do concreto poroso promovem uma diferença no tempo de chegada e de reflexão das ondas sonoras. Essa diferença diminui a intensidade do ruído fazendo que o concreto absorva parte do ruído do tráfego (LAMB, 2014).

2.3.1 Porosidade

O diferencial do concreto permeável é a presença de uma porosidade macroscópica conectada. Em geral, o concreto permeável é projetado para ter porosidade compreendida entre 15% e 35%, sendo controlada pelo grau de compactação ou pela quantidade de pasta (ACI, 2010). O total de vazios no concreto pode ser dividido em três grupos, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Representação das porosidades abertas, fechadas e vazios da pasta de concreto.



Fonte: Mikami (2022).

Porosidade aberta ou efetiva é a parcela de poros que formam o sistema de vazios que permitem o transporte da água pelo interior do concreto. São formados pelos espaços entre os agregados que não foram preenchidos pela pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Porosidade fechada ou isolada consiste nos vazios que estão isolados dos poros; logo não contribuem com o escoamento de água através do concreto permeável (MONTES; VALAVALA; HASELBACH, 2005; JOSHAGHANI *et al.*, 2015).

E, por fim, os vazios da pasta são os poros do interior da pasta de cimento, formados nos processos de hidratação. Os vazios capilares, o ar incorporado e os espaços interlamelares nos cristais de sulfato de cálcio hidratado (C-S-H) compõem essa parcela (MONTES; VALAVALA; HASELBACH, 2005; JOSHAGHANI *et al.*, 2015; TORRES; HU, 2016).

A porosidade ou índice de vazios é um parâmetro fundamental na dosagem de concretos permeáveis. Afeta a permeabilidade e a resistência mecânica do material. Entretanto nem sempre é possível estabelecer uma relação direta entre os três parâmetros. Isso ocorre pela dificuldade na determinação da porosidade efetiva e o entendimento de como afetará o comportamento do concreto (MIKAMI, 2022).

Existem metodologias de caracterização de porosidade que já foram normatizadas. Entretanto, os resultados obtidos em cada processo divergem, significativamente. As principais normas referentes ao estado fresco e endurecido, respectivamente, são: ASTM C1688M

(ASTM, 2014) e ASTM C1754M (ASTM, 2012). As normas não diferenciam os tipos de poros avaliados.

Mikami (2022) fez um estudo considerando dois estados. Quando fresco, o volume da pasta de cimento consiste apenas no volume ocupado pela água e o cimento.

Na caracterização de concretos convencionais a determinação da porosidade é feita pela NBR 9778 (ABNT, 2005). As amostras são submetidas à condição saturada com superfície seca. O concreto permeável impossibilita essa condição, já que seria difícil a eliminação da água no interior da amostra mantendo-se a saturação da pasta de cimento. Torres e Hu (2016) prepuseram um método utilizando um sistema de ar comprimido. Porém, além de precisar de equipamentos específicos, não existe segurança de que a condição foi atingida (MIKAMI, 2022).

2.3.2 Permeabilidade

A capacidade de drenagem do material se origina dos vazios interligados capazes de conduzir água pelo seu interior. A permeabilidade pode ser avaliada por meio da condutividade hidráulica ou o coeficiente de permeabilidade. A condutividade hidráulica marca a capacidade que o material tem em conduzir a água pelos vazios presentes (MIKAMI, 2022). Os valores usuais da condutividade hidráulica para o concreto poroso variam de 0,1 cm/s a 2 cm/s, de acordo com Chandrappa *et al.* (2016). Alguns trabalhos, no entanto, escolhem por reduzir as propriedades hidráulicas para aumentar a resistência mecânica (COSTA, 2019).

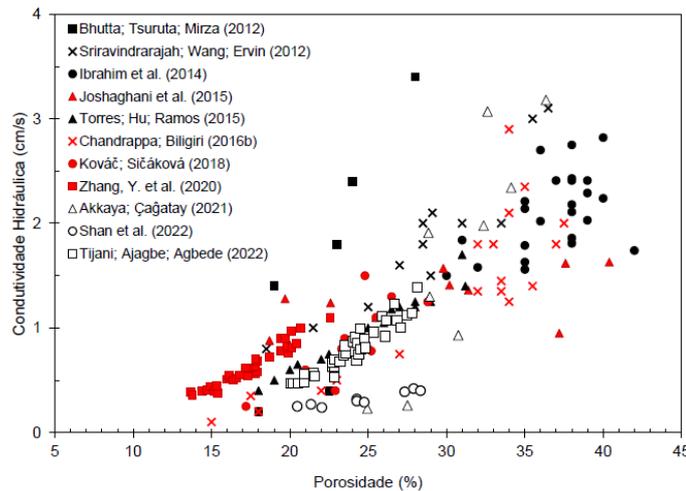
Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o coeficiente de permeabilidade mínimo de um pavimento permeável deve ser de 0,1 cm/s. Apesar desse número ser alcançado com certa facilidade, deve-se levar em consideração a colmatação dos poros. Ao longo da vida útil do pavimento, as partículas sólidas presentes nas águas podem se acumular nos espaços vazios, causando uma perda de permeabilidade (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). Existem relatos de pavimentos com idade de 10 a 15 anos que, mesmo sem manutenção, apresentaram colmatação mínima (ACI, 2010).

A norma americana ACI 522R (2010) determina que, para o material ter uma permeabilidade significativa é necessário que tenha em torno de 15% de vazios.

A Figura 5 reúne dados de condutividade hidráulica em função da porosidade de concreto permeável de alguns estudos. É possível observar que, para Zhang *et al.* (2020) e Chandrappa e Biligiri (2016), as misturas apresentaram porosidade em torno de 15% e

obtiveram concretos que mantiveram um desempenho hidráulico mínimo. Entretanto, a maioria dos estudos foi desenvolvida com porosidade superior a 20% (MIKAMI, 2022).

Figura 5 – Relações entre a porosidade e a condutividade hidráulica de concretos permeáveis, por meio do permeâmetro de carga variável.



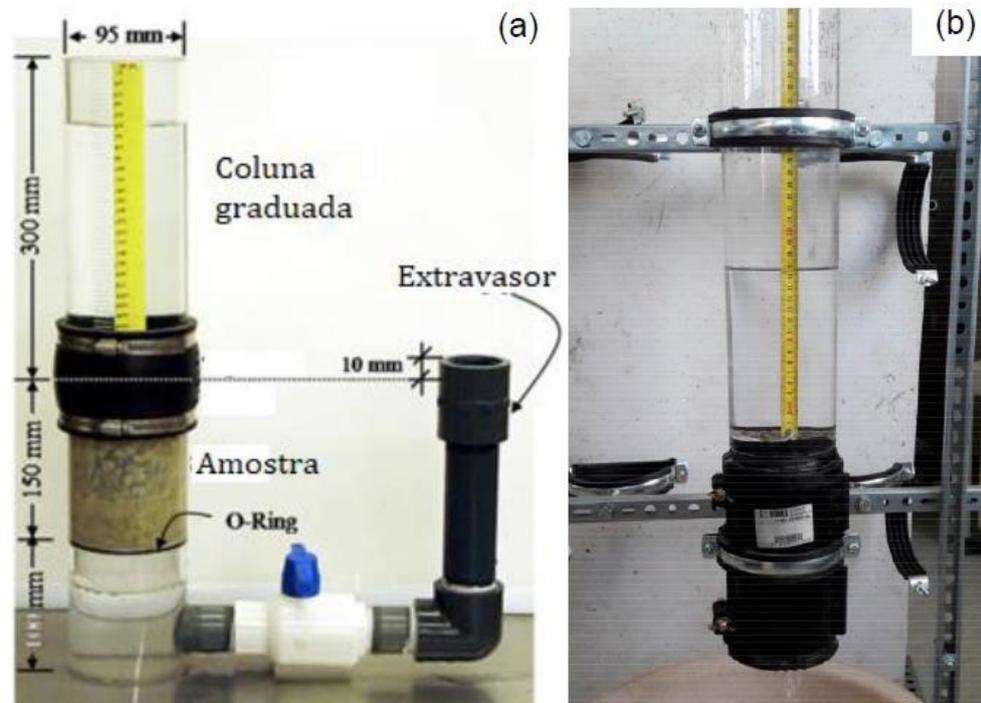
Fonte: Mikami (2022).

É possível perceber que a condutividade hidráulica cresce proporcionalmente com o aumento do volume de vazios, apesar de ser difícil estabelecer uma relação direta entre as duas propriedades.

A condutividade hidráulica, em laboratório, tem sido muito utilizada na caracterização do concreto permeável, sendo obtida tanto no permeâmetro de carga variável como de carga constante. Contudo, ainda não há padronização quanto ao equipamento e por isso torna-se difícil estabelecer limites mínimos.

Outro fato é a divergência entre as condições de campo e laboratório. Em pavimentos executados é medida a taxa de infiltração, obtida pelo teste com anel de infiltração. Para aproximar a caracterização em campo e em laboratório é adotado um ensaio similar ao anel de infiltração. As amostras produzidas em laboratório podem ser analisadas por meio do permeâmetro de carga constante, recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015a) ou pelo permeâmetro de carga variável, recomendada pela ACI 522R (ACI, 2010). A Figura 6 ilustra os principais modelos de permeâmetro.

Figura 6 – Modelos de permeâmetro de carga variável com extravasor (a) e saída (b)



Fonte: Mikami (2022).

2.3.3 Resistência Mecânica

Apesar de que o desempenho hidráulico seja fundamental para garantia da permeabilidade do pavimento, a resistência também é uma das principais propriedades, e pode ser um fator limitante para aplicação do material. Suas características, como o elevado número de vazios, a influência da consistência da pasta e o grau de compactação da mistura, dificultam em estabelecer uma relação entre a resistência mecânica e os parâmetros de dosagem (MIKAMI, 2022).

Torres, Hu e Ramos (2015) constataram que a resistência do concreto permeável está diretamente relacionada a espessura da pasta de cimento envolta nos agregados. Se a camada for mais espessa, a resistência do concreto é maior. Além disso, foi constatado que os agregados de menor dimensão apresentaram uma maior resistência a compressão. Uma das hipóteses é a maior área de contato nos grãos de menor dimensão. Entretanto também houve variação de porosidade nos estudos de Crouch, Pitt e Hewitt (2007), Bhutta, Tusuruta e Mirza (2012) e Fu *et al.* (2014). Entretanto, Yu *et al.* (2019) constataram que, para manter a porosidade constante, o aumento do tamanho do agregado incrementou a resistência a compressão do concreto permeável. Isso ocorre com agregados de até 7 mm.

Além das resistências convencionais, é importante citar a resistência à abrasão. Ela é influenciada por fatores como a cura, compactação, consistência da pasta de cimento, tamanho do agregado e a porosidade do concreto. Uma das formas para avaliar é pelo teste de Cantabro, em que é feito com o equipamento Los Angeles sem carregamento de esferas de aço (MIKAMI, 2022).

A norma ACI 522R (ACI, 2010) recomenda, para ensaios de resistência à compressão e tração, a utilização das mesmas normas para concreto convencional, ASTM C39 (ASTM, 2018a) e ASTM C78 (ASTM, 2018b), respectivamente. Porém, segundo o relatório de especificações técnicas da *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2019), por não existir normas direcionadas para o concreto permeável, e os métodos para concreto convencional não se aplicarem, é inadequado especificar requisitos de resistência à compressão ou usá-los como base de aceitação. Já a norma brasileira NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece requisitos mínimos de projeto, especificação, execução e manutenção, e os requisitos de resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

A Tabela 1 traz um resumo relacionando o tipo de revestimento, aplicabilidade, espessura mínima e resistência mecânica.

Tabela 1 – Resistência mecânica e espessura mínima.

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

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

¹ Peça de concreto permeável – componente pré-moldado de concreto permeável, utilizado como material de revestimento em pavimento intertravado e com índice de forma igual ou inferior a 4.
² Placa de concreto permeável – componente pré-moldado de concreto permeável, utilizado como material de revestimento em pavimento permeável e com índice de forma superior a 4.
Índice de forma – relação entre o comprimento e a espessura da peça ou da placa de concreto, descontando a espessura o espaçador.

Fonte: Costa, 2019 (Adaptado).

As peças são avaliadas quanto a resistência a compressão axial, com valor mínimo de 20,0 MPa. Quando o pavimento permeável é moldado *in loco*, é considerado como parâmetro a resistência à tração na flexão, devendo ser superior a 2,0 MPa. A espessura da camada do concreto é definida considerando o tipo de tráfego solicitado.

2.3.4 Materiais utilizados para compor o concreto permeável

O concreto permeável é produzido com os mesmos materiais utilizados na composição do concreto de cimento Portland convencional. A diferença é que a quantidade de agregado miúdo é muito reduzida ou nula. As proporções da mistura são um pouco menos tolerantes do que as misturas de concreto convencional. Na Tabela 2 tem-se as proporções mais comuns de materiais em concretos permeáveis.

Tabela 2 – Consumo e proporções comuns nas misturas de concreto permeável.

MATERIAIS	CONSUMO/PROPORÇÃO
Ligante hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m ³)	1190 a 1700
Relação água/cimento em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: Batezini (2011).

O material ligante principal para a confecção do concreto permeável é o cimento Portland. Além dele, cinzas volantes, escória granulada de alto forno e sílica ativa também podem ser usadas. Vale ressaltar que os testes são altamente recomendados para que as propriedades sejam determinadas de forma correta para resultar em um bom desempenho, uma vez que a presença de vazios suficientes deve ser garantida, assim como uma boa condutividade hidráulica (TENNIS, 2004).

A falha de corpos de prova se dá pela pasta responsável por ligar os agregados. Entretanto, no concreto permeável a pasta de cimento é limitada e o agregado depende da superfície de contato para obter resistência suficiente.

Agregados dentro do intervalo de 3/8” e 3/4” são usados por causa do manuseio e resultado. Se forem maiores, os vazios também serão maiores e a superfície mais áspera. Os usos recentes de concreto permeável se resumem a estacionamentos, calçadas de baixo tráfego e passarelas de pedestres. Nessas condições, o agregado menor é mais viável por motivos estéticos. O agregado maior (superior a 9,5mm) tem sido utilizado em estacionamentos a 20 anos.

2.3.5 Compactação

A compactação do concreto permeável ainda é objeto de estudos, e uma das grandes questões discutidas é como replicar em laboratório os resultados obtidos em campo. Existem instrumentos que auxiliam na compactação como rolos metálicos com peso específico, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Compactação em campo do concreto permeável.



Fonte: Tennis; Leming; Akers (2004).

De acordo com as normas ASTM C1688M (ASTM, 2014) e ASTM C1747M (ASTM, 2013), são adotados os soquetes de compactação Proctor e Marshall para utilização nas amostras feitas em laboratório para determinação de massa específica no estado fresco e da resistência a degradação por abrasão e impacto. A NBR 16416 (ABNT, 2015) também estabelece a utilização do soquete Marshall para verificação da massa específica no estado fresco. Vale ressaltar que não há normalização referente ao número de camadas e de golpes para cada amostra (MIKAMI, 2022).

Na Tabela 3 tem-se alguns procedimentos de compactação e energias de compactação.

Existem dois procedimentos que estão sendo adotados para padronização da produção das amostras de concreto. O primeiro consiste em estabelecer uma quantidade de golpes com o soquete Proctor ou Marshall, produzindo uma energia constante. No segundo, a amostra é compactada até que o valor da massa específica de projeto seja atingido. Nesse caso,

o número de golpes é ajustado a cada mistura (MIKAMI, 2022).

Tabela 3 - Comparação de métodos de compactação de diversos autores.

Método de Compactação	Estudo	Nº de Camadas Nº Golpes/Camadas	Energia (kJ/m³) ^c
Soquete Proctor Massa = 2,5 kg Altura = 305 mm	Gaedicke <i>et al.</i> (2016)	20 camadas	
		5 Golpes	47,6
		10 Golpes	95,2
		20 Golpes	190,5
		30 Golpes	285,7
Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Martin III, Kaye e Putman (2014)	1 Camada	
		20 Golpes	54,2
		20 Camadas	
		10 Golpes	142,9
Haste de Compactação + Soquete Proctor Massa = 2,5 kg Altura = 450 mm	Zhong e Wille (2016)	3 Camadas	
		3 Golpes	97,6
Haste de Compactação + Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Mulligan (2005)	20 Camadas	
		25 Golpes	357,1
		1 Camada	
Haste de Compactação + Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Crouch, Pitt e Hewitt (2007)	20 Golpes	25,3
		5 Golpes	63,2
		16 Golpes	202,3
		20 Camadas	
Haste de Compactação + Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Akand, Yang e Wang (2018)	25 Golpes Haste	71,4
		5 Golpes Soquete	
		20 Camadas	
Haste de Compactação + Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Khankhaje <i>et al.</i> (2017)	25 Golpes Haste	142,9
		10 Golpes Soquete	
		4 Camadas	
		25 Golpes Haste	252,9
Haste de Compactação + Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Crouch, Pitt e Hewitt (2007)	5 Golpes Soquete	505,9
		10 Golpes Soquete	1011,7
		20 Golpes Soquete	
		20 Golpes Soquete	

Fonte: Mikami (2022).

2.3.6 Cura

Devido a sua estrutura possuir uma quantidade alta de vazios interligados, o

concreto tem uma área maior de exposição ao ambiente, comparado com o concreto convencional. Logo, pode ocorrer maior evaporação de água, o que torna a cura uma etapa crítica (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

De acordo com as pesquisas, é recomendado que a cura inicie em até 20 minutos após a compactação (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Lonas de polietileno podem ser utilizadas para evitar que o bloco fique exposto ao ambiente, e evitando a evaporação de água. Após 7 dias de cura, no mínimo, ela pode ser retirada.

Em ensaios laboratoriais, a norma NBR 5738 (ABNT, 2015) apresenta o processo de preparo de amostras de concreto convencional equivalente a ASTM C192M (ASTM, 2016), que é utilizada na maioria das pesquisas.

Ibrahim, Razak e Abutaha (2017) testaram três métodos de cura, avaliando a sua influência nas propriedades mecânicas do material. As amostras foram submetidas à cura ao ar ambiente, imersão em tanque de solução saturada de hidróxido de cálcio durando o período completo de cura, e imersão durante 3 dias. Os melhores resultados no teste de resistência à compressão se deram nas amostras imersas em cal, e prova que a insuficiência de água na hidratação do cimento pode causar redução na resistência mecânica.

2.4 Método de Dosagem

Na literatura, é comum encontrar estudos que partam de uma relação fixa entre materiais. Isso se dá pela falta de uma metodologia simples para dosagem correta. Isto é um fato que limita a utilização do concreto permeável.

Algumas pesquisas propuseram metodologias de dosagem para orientar a estimativa de materiais que serão utilizados. A seguir serão apresentados alguns estudos sobre dosagem do concreto permeável. As mesmas ainda estão em fase de desenvolvimento, com o objetivo comum de quantificar a pasta para recobrir os agregados e proporcionar resistência de projeto.

2.4.1 Método do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)

O método proposto pelo National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, 2019) relaciona os volumes com objetivo de produzir concretos permeáveis com uma porosidade de projeto. A metodologia consiste em determinar o índice de vazios do agregado no estado compactado e calcular o volume de pasta necessário para preencher todos os vazios

e atingir a porosidade desejada. Considerando a dificuldade de compactação, foi adicionado um índice de compactação “CI” para compensar. Esse índice é composto pela diferença entre a porosidade de um concreto compactado em condições reais e a porosidade nas condições de compactação máxima. O índice varia entre 1 e 8%.

Após determinação do volume de pasta de cimento, uma relação água/cimento é selecionada para cálculo do volume de cimento e agregado. Nesta metodologia não existe critério para a escolha da relação a/c, apenas a recomendação do intervalo entre 0,25 e 0,36. Diante disso, os parâmetros de dosagem iniciais devem ser ajustados em função do volume e consistência da pasta.

2.4.2 Método American Concrete Institute (ACI)

Publicada na ACI 522R (ACI, 2010), a metodologia é bastante semelhante ao método NRMCA. No documento, existem alguns aspectos de dosagem que devem ser considerados. Entretanto existem informações que ainda estão rasas e que dificultam a aplicação.

Abordado primeiramente por Meininger (1988), o método também utiliza relações volumétricas entre os materiais. Entretanto, é utilizado a relação “b/b_o”, diferença entre o volume sólido de agregado no concreto “b” e a compactidade do agregado “b_o”. Este parâmetro depende do tamanho e distribuição do agregado, e da quantidade de agregado miúdo presente na mistura. A ACI 522R (ACI, 2010) fornece valores para agregados de tamanho 3/8” e 3/4”, apenas. É adotado um valor de “b/b_o” e é possível estimar o consumo de agregado por volume unitário de concreto.

A determinação de volume de pasta é feita por meio de um ábaco que relaciona os vazios e a pasta, considerando o nível de compactação empregado. Em seguida, com o volume de pasta e a relação a/c definidos são determinadas as quantidades de cimento e água na mistura.

O processo de dosagem do ACI limita a utilização de outros tamanhos de agregados, já que o ábaco relaciona apenas dois tamanhos. No que se refere a compactação, são estabelecidos dois níveis, porém não há especificação. Logo, não existem critérios para escolha da relação a/c.

2.4.3 Método de Nguyen *et al.*

O método desenvolvido por Nguyen *et al.* (2014) se baseia na espessura da camada

de pasta de cimento que deve recobrir o agregado graúdo. A novidade aqui está na proposta de um procedimento para a escolha da relação a/c para cada mistura de concreto permeável.

No estudo, os agregados são considerados partículas esféricas que devem ser cobertas pela pasta de cimento com espessura proporcional ao seu tamanho. A partir disso, é adicionado um coeficiente “k” que relaciona o tamanho de cada partícula e a espessura da camada da pasta. Para o cálculo do volume de agregado, existem os parâmetros “a” e “b”. O parâmetro “a” define a fração de partículas superiores a 80 μm , e o “b” se refere a quantidade de água retida no agregado. O cálculo de volume da pasta também se baseia no coeficiente “k” e na porosidade de projeto.

A determinação da relação a/c é feita por um método proposto pelos autores, onde é permitido selecionar a máxima quantidade de água sem que ocorra escoamento da pasta pelos poros do concreto. Esse método consiste em misturar uma quantidade de concreto permeável suficiente para preencher uma peneira e vibrar o conjunto por 15 segundos. Em seguida, é verificado visivelmente se houve escoamento pela malha da peneira. O teste se repete para diferentes proporções de a/c. Este procedimento, diante dos outros apresentados anteriormente, é o único que apresenta um ensaio para seleção da relação a/c e critérios para a escolha.

2.4.4 Comparação dos métodos de dosagem

Os três métodos de dosagem citados anteriormente compartilham do mesmo objetivo, que é desenvolver misturas com porosidade próxima ao valor de projeto. São baseadas em relações volumétricas entre a pasta de cimento, o agregado e os vazios. No Quadro 1 estão relacionados os aspectos de cada método.

O método NRMCA e o ACI utilizam a compressibilidade dos agregados na determinação da quantidade de cimento. O ACI utiliza o coeficiente “b/bo”, enquanto o NRMCA tem um índice empírico. O método de Nguyen *et al.* (2014) resume sua metodologia a um coeficiente k constante. Percebe-se que existe uma carência de metodologia que relacione compressibilidade dos agregados e sua interação com a pasta de cimento.

Quadro 1: Comparação entre os principais aspectos dos métodos de dosagem de concreto permeável.

Método de Dosagem	NRMCA (2019)	ACI (2010)	Nguyen <i>et al.</i> (2014)
Objetivo	Porosidade de projeto	Porosidade de projeto Condutividade hidráulica	Porosidade de projeto Volume de pasta mínima
Princípio	Vazios do agregado	Método “b/b _o ”	Camada de pasta de cimento
Aplicabilidade	Qualquer agregado	Agregados 3/8 e 3/4	Qualquer agregado
Método p/ seleção da relação a/c	Não	Não	Método de drenagem da pasta
Quantidade de cimento	Relações volumétricas	Ábaco	Coefficiente “k”
Compactação	Não especificada	Não especificada	Ajustada
Previsão de Resistência	Não	Não	Não
Previsão de Condutividade Hidráulica	Não	Ábaco	Não
Vantagens	-Método simples -Aplicável a qualquer agregado	-Método simples; -Consideração sobre compressibilidade do agregado.	-Método de seleção da relação a/c; -Previsão da porosidade da pasta de cimento.
Desvantagens	-Compactação baseada em coeficiente empírico -Ausência de método de seleção da relação a/c	-Forma de compactação não informada; -Restrito a agregados utilizados no método; -Ábaco restrito aos materiais do método.	-Coeficiente “k” não é explícito; -Compactação deve ser ajustada experimentalmente.

Fonte: Mikami (2022).

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo abordará as estratégias adotadas para cumprimento dos objetivos propostos para essa pesquisa. Haverá detalhamento de todos os procedimentos feitos em cada etapa da pesquisa.

3.1 Estratégia de Pesquisa

A escassez de pesquisa e conhecimento nessa área é enorme no Brasil. Existem poucos trabalhos relacionados, como o Parque de Belo Horizonte (Polastre e Santos, 2006) e outros que já foram citados. Além disso, existe apenas a norma NBR 16416 (ABNT, 2015) que traz alguns requisitos para uso do pavimento permeável. Entretanto, não há o aprofundamento necessário.

Assim, o estudo foi iniciado tendo como base a recomendação da norma americana ACI 522R (ACI, 2010) para referência de traços de concreto permeável. Com as recomendações em mãos, se deu início a determinação do traço mais adequado, considerando a baixa quantidade de trabalhos publicados e a falta de norma brasileira para orientação.

O ACI 522R (ACI, 2010) explica que a faixa de relação água/cimento (a/c) adequada para produção de concreto permeável varia entre 0,26 e 0,45. Se a relação a/c for baixa, ocorre a formação de bolas, dificultando a distribuição uniforme da pasta, causando redução na resistência e na durabilidade. Se a relação foi alta, a aderência é reduzida, fazendo com que a pasta escorra e preencha os vazios. Neste trabalho, foi estabelecido o valor de a/c igual a 0,3. Vale ressaltar que, embora a relação a/c do concreto poroso seja importante para o alcance de uma resistência à compressão, esta relação entre a a/c e a resistência à compressão não é bem definida.

3.2 Caracterização de Materiais e Ensaio

Neste item serão descritos os ensaios utilizados neste estudo. O processo de moldagem, compactação e demais informações serão descritas em cada fase, já que as variáveis foram analisadas experimentalmente, uma vez que não há normas e padrões que estabeleçam tais procedimentos.

3.2.1 Caracterização do cimento

Considerando que o concreto permeável é um tipo de material novo no Brasil e, conseqüentemente, existem pouquíssimas normas, foi decidido considerar a variável a/c para determinação da dosagem do traço do concreto.

A massa específica do cimento foi determinada considerando a norma NBR 16605 (ABNT, 2017). Para este ensaio foram necessárias duas amostras de 60 g de cimento. Inicialmente, é adicionado o querosene dentro do frasco volumétrico de Le Chatelier, em seguida é adicionada a amostra de cimento. Depois disso, deve-se agitar o frasco até que as bolhas de ar saiam e registrar a leitura. A Figura 8 ilustra o procedimento.

Figura 8 – Ensaio de densidade do cimento.



Fonte: Autora (2023).

A massa específica do cimento deve ser calculada pela Equação 1. O resultado final será a média das duas massas específicas encontradas.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_2' - V_1'} \quad (1)$$

Onde:

ρ é a massa específica, em g/cm³

m é a massa do material ensaiado, em g;

$V_2' - V_1'$ é o volume deslocado pela massa do material ensaiado, em cm³.

3.2.2 Massa unitária da brita

Em relação ao tamanho dos agregados graúdos, a norma americana recomenda que o diâmetro utilizado no concreto permeável deve ser reduzido, variando entre 9,5 e 19 mm, e que não é recomendado usar a fração mais fina dos agregados.

A massa unitária da brita é determinada pela norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Ela propõe os métodos A, B e C do procedimento. O Método A, selecionado para este trabalho, consiste em separar duas amostras de brita e as mesmas passam 24 horas na estufa para secagem. O ensaio constitui-se em dividir o volume do recipiente em três camadas, onde cada camada deve receber 25 golpes, distribuídos uniformemente.

A Figura 9 mostra o procedimento de compactação com o auxílio de uma haste de ferro.

Figura 9 – Ensaio de massa unitária da brita.



Fonte: Autora (2023).

A massa unitária determinada pelo método B deve ser calculada pela Fórmula 2:

$$M_u = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (2)$$

Onde:

M_u é a massa unitária do agregado, em kg/m³;

m_{ar} é a massa do recipiente com o agregado, em kg;

m_r é a massa do recipiente vazio, em kg;

V é o volume do recipiente, em m³.

O valor final será a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações.

3.2.3 Composição granulométrica da brita

Baseado em outros estudos, os concretos produzidos com agregado de menor dimensão tendem a trazer resultados abaixo do valor limite estabelecido pela norma americana. Desta forma, optou-se pela utilização de brita 1, com dimensão máxima de 19 mm. O procedimento se dá pela passagem da brita entre as peneiras. Nesse estudo a agitação foi feita manualmente. Em seguida, o material retido em cada peneira foi pesado e transformado em porcentagem. As Figuras 10(a) e 10(b) ilustram etapas do procedimento de ensaio.

Figura 10 – Organização de peneiras (a) e material retido (b).



Fonte: Autora (2023).

3.2.4 Determinação da densidade e absorção de água da brita

Para determinação da densidade e da absorção de água da brita utilizada, seguiu-se o procedimento da NBR 16917 (ABNT, 2021). Inicialmente as amostras foram lavadas na peneira de abertura 4,8 mm, para remoção do pó de brita restante, em seguida foram secas em estufa e foram separadas duas amostras de 2 kg do material. Em seguida, foram colocadas em cestos de arame e mergulhadas em um tanque com água (Figura 12).

Figura 12 – Brita em tanque com água.



Fonte: Autora (2023).

Em seguida, as amostras submersas foram pesadas (Figura 13).

Figura 13 – Amostra submersa em água na condição saturada superfície seca.



Fonte: Autora (2023).

Após a pesagem com a brita submersa, o agregado foi removido da água, enxugado até que toda a água visível fosse eliminada, e pesado novamente, chamado de condição saturada superfície seca (Figura 14).

Figura 14 – Amostra na condição saturada superfície seca.



Fonte: Autora (2023).

A densidade do agregado na condição seca é calculada através da Equação 3:

$$\rho_s = \frac{m_A}{m_B - m_C} \quad (3)$$

Onde:

ρ_s é a densidade da brita na condição seca, em g/cm³;

m_A é a massa da amostra seca em estufa, em g;

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em g;

m_C é a massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca, em g.

A absorção de água é calculada utilizando a Equação 4:

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

Abs é a absorção de água, em %;

m_A é a massa da amostra seca em estufa, em g;

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

3.2.5 Método de dosagem pela American Concrete Institute (ACI)

Considerando a escassez de normas para a dosagem do concreto permeável, foi adotado o método presente na norma americana ACI 522R (ACI, 2010). São necessários oito passos para cálculo do traço: determinação do peso do agregado, ajuste de peso de acordo com

a absorção, determinação do volume da pasta, determinação do teor de concreto, determinação do teor de água, determinação do volume sólido, porcentagem de vazios e estimativa de porosidade.

- *Determinação do peso do agregado graúdo*

A Tabela 4 estabelece valores de b/b_o relacionando a porcentagem de agregados miúdos e o tamanho da brita.

Tabela 4 – Valores b/b_o efetivos.

Porcentagem de agregados miúdos	b/b_o	
	ASTM C33/C33M Tamanho 9,5 mm	ASTM C33/C33M Tamanho 19 mm
0	0,99	0,99
10	0,93	0,93
20	0,85	0,86

Fonte: ACI (2010) (Adaptado).

O cálculo é feito pela Equação 5.

$$W_a = \rho \times b/b_o \quad (5)$$

Onde:

ρ_s é a densidade da brita.

- *Ajuste do peso considerando absorção*

Dado que a porcentagem da absorção é de 1,0071% (1+0,7%) a peso é dado pela Equação 6.

$$W_{SSD} = W_a \times 1,0071 \quad (6)$$

Onde:

W_a é o peso do agregado graúdo;

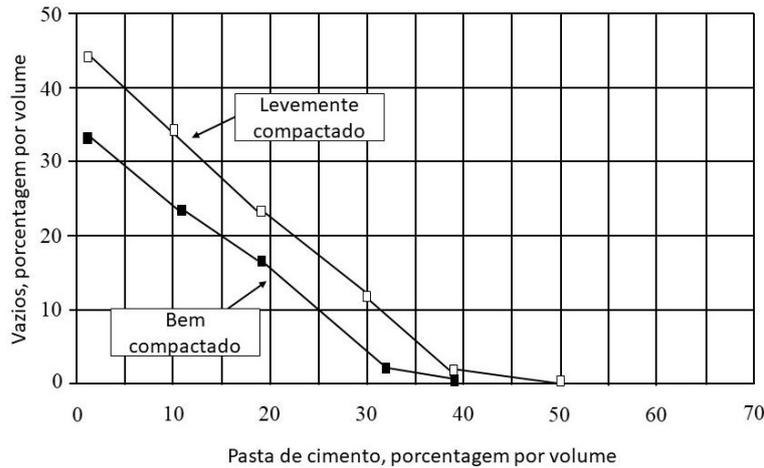
W_{SSD} é o peso seco superficial saturado.

- *Volume da Pasta de Cimento*

A dosagem do concreto permeável tem como objetivo estabelecer o volume mínimo

de pasta de cimento necessário para unir as partículas do agregado, mantendo a presença de vazios, resistência e trabalhabilidade. O gráfico 1 é utilizado para estimar o volume da pasta utilizando agregado de 9,5 mm de tamanho, relacionando a porcentagem de pasta com a porcentagem de vazios.

Gráfico 1 – Relação entre pasta e vazios para brita de 9,5 mm.



Fonte: Adaptado da ACI 522R (ACI, 2010)

Vale ressaltar que, segundo ACI (2010), quando se utiliza agregado miúdo, o volume da pasta de cimento deve ser reduzido em 2% para cada 10% de agregado miúdo total para concreto bem compactado, e em 1% para cada 10% de agregado miúdo total para concreto levemente compactado. Essas medidas são necessárias para que a porcentagem de vazios por volume se mantenha.

- *Determinação do teor de cimento*

A Equação 7 determina a quantidade de cimento necessária.

$$c = \left[\frac{V_P}{\rho + \frac{w}{cm}} \right] \times 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

Onde:

c é o teor de cimento;

V_P é o volume da pasta;

$\frac{w}{cm}$ é a relação água/cimento;

ρ é massa específica do cimento.

- *Determinação da quantidade de água*

Este valor é determinado pela Equação 8.

$$w = c \times \frac{w}{cm} \quad (8)$$

Onde:

w é a quantidade de água;

c é o teor de cimento;

$\frac{w}{cm}$ é a relação de água/cimento.

- *Determinação do volume sólido*

O volume sólido da brita será calculado através da Equação 9.

$$V_a = \frac{W_{SSD}}{\rho_s \times 1000 \text{ kg/cm}^3} \quad (9)$$

Onde:

ρ_s é a densidade da brita;

W_{SSD} é o peso da brita ajustado.

Para o volume de cimento, utiliza a Equação 10.

$$V_c = \frac{c}{\rho \times 1000 \text{ kg/cm}^3} \quad (10)$$

Onde:

c é o teor de cimento;

ρ é a massa específica do cimento.

O volume de água é calculado pela Equação 11.

$$V_w = \frac{w}{1000 \text{ kg/cm}^3} \quad (11)$$

Onde:

V_w é o volume de água;

w é teor de água.

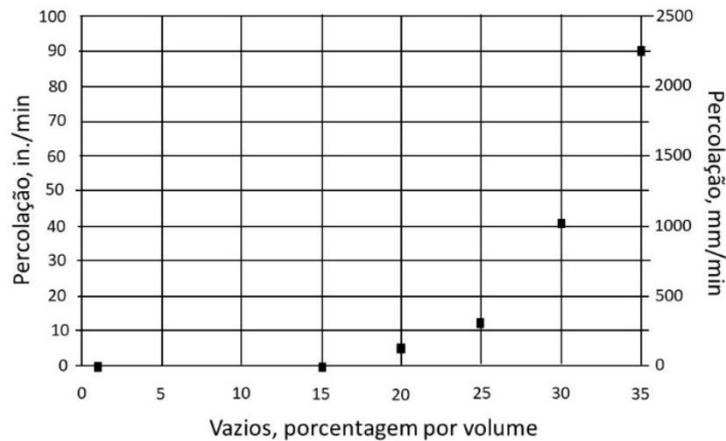
Assim, considerando a Equação 12, o volume total sólido será:

$$V_S = V_a + V_c + V_w \quad (12)$$

- *Porcentagem de vazios*

Para garantir que a água percole através do concreto permeável, o teor de vazios deve ser maior ou igual a 15%, segundo a norma americana. O Gráfico 2 ilustra esse comportamento relacionando os vazios e a percolação.

Gráfico 2 – Teor mínimo de vazios.



Fonte: ACI (2010) (Adaptado).

Abaixo de 15% não existe percolação significativa. O Gráfico 2 permite concluir que, quanto maior o teor de vazios, maior é a percolação do concreto.

A porcentagem de vazios se dá pela Equação 13:

$$P = \frac{(V_{tot} - V_s)}{V_{tot}} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

V_{tot} é o volume total geral;

V_s é o volume total sólido.

3.2.6 Confeção do concreto e moldagem dos corpos de prova

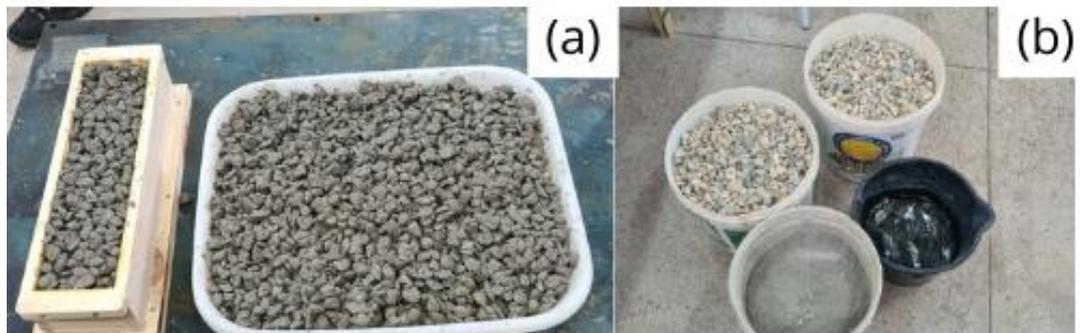
O procedimento para o preparo do concreto poroso é uma etapa fundamental para que suas propriedades atuem corretamente. Embora ainda não exista uma metodologia padronizada, todas as etapas do processo influenciam na sua funcionalidade.

Os materiais secos foram despejados na betoneira, primeiramente, e a água foi adicionada aos poucos, de acordo com a observação do processo da mistura. Depois de finalizar a mistura, percebeu-se que não havia água suficiente para que a pasta envolvesse todo o

agregado graúdo. Foi necessário um novo cálculo do traço e a partir dele os corpos de prova foram confeccionados.

A moldagem das amostras foi realizada por meio da compactação da mistura em moldes prismáticos de dimensões 10 cm x 10 cm x 40 cm para o ensaio de tração e 47 cm x 42 cm x 10 cm para percolação. Inicialmente, foi aplicado o óleo queimado nos moldes, em seguida os mesmos foram preenchidos com o concreto. A compactação das amostras foi realizada com um soquete. As amostras foram compactadas em três camadas, aplicando-se 25 golpes em cada camada, considerando o estudo de Mulligan (2005) citado no Quadro 2. As peças foram molhadas diariamente durante 7 dias com água. A Figura 13(a) ilustra os corpos de prova moldados, e a Figura 13(b) mostra os insumos utilizados.

Figura 13 – Corpos de prova moldados (a) e insumos (b).



Fonte: Autora (2023).

3.2.7 Permeabilidade do Concreto

Considerando que a norma NBR 16416 (2018) indica que o ensaio seja feito *in loco*, foi necessário fazer uma adaptação para a amostra em laboratório. Esse método avalia o tempo necessário para escoamento de o volume de água pela superfície do concreto permeável. A adequação ocorreu na elaboração de uma placa de concreto poroso no formato de tronco de pirâmide com dimensão iguais a 47 cm x 42 cm x 10 cm e seguiram-se os passos e recomendações do anexo A da NBR 16416 (ABNT, 2018). A água deve ser despejada no anel de infiltração com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as duas marcações do anel de 10 mm e 15 mm.

Em seguida, ocorre a marcação do intervalo de tempo quando a água atinge a superfície do pavimento, como está ilustrado na Figura 15. Além disso, de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015) o coeficiente de permeabilidade mínimo de um pavimento permeável de ser superior a 0,1 cm/s.

Figura 15 – Ensaio de permeabilidade do concreto.



Fonte: Autora (2023).

A determinação do volume de água deve ser realizada de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Determinação da massa de água para ensaio.

Tempo de pré-molhagem (s)	Massa de água para o ensaio (kg)
≤ 30	18 ± 0,05
>30	3,6 ± 0,05

Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k) é utilizada a Equação 14:

$$k = \frac{C \times m}{d^2 \times t} \quad (14)$$

Sendo:

C é o fator de conversão de unidades do SI, com valor igual a 4583666000;

m é a massa de água infiltrada, em quilogramas (kg);

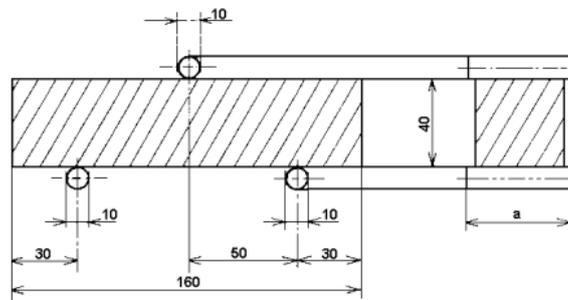
d é o diâmetro interno do cilindro de infiltração, em milímetros (mm);

t é o tempo necessário para toda a água percolar, em segundos (s).

3.2.8 Resistência à tração por flexão

A norma para esse ensaio é a NBR 12142 (ABNT, 2010), específica para o concreto. Entretanto, para este trabalho foi necessário fazer uma adaptação, em função do tamanho reduzido dos corpos de prova, e a norma utilizada foi a NBR 13279 (ABNT, 2005), para argamassas. O ensaio consiste em posicionar o corpo de prova prismático de modo que a face rasada não fique em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga. A Figura 16 ilustra a posição recomendada.

Figura 16 – Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão.



Fonte: NBR 13279 (ABNT, 2005).

O prisma confeccionado em laboratório teve dimensões de 10 cm x 10 cm x 40 cm. Para evitar o contato entre o prisma, a base e o dispositivo de carga, foram utilizados corpos de prova cilindros de argamassa.

Figura 17 – Amostra na prensa.



Fonte: Autora (2023).

A resistência à tração na flexão é calculada pela Equação 15:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_t \times L}{100^3} \quad (15)$$

Sendo:

R_f é a resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L é a distância entre os suportes, em mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os objetivos do presente trabalho, foi analisada a adequação do processo de implantação e dos materiais empregados, verificando a influência deles no desempenho hidráulico e de resistência.

4.1 Massa específica do cimento

A Tabela 6 contém as leituras dos volumes deslocados nos frascos utilizados no ensaio. A primeira leitura dos frascos foi igual a 0,2 cm³.

Tabela 6 – Volumes deslocados pela massa.

Frasco 1 (g/cm ³)	Frasco 2 (g/cm ³)
20,5	20,6

Fonte: Autora (2023).

Com a substituição dos resultados obtidos na Equação 2, as massas específicas individuais do material ensaiado serão:

$$\rho_1 = \frac{60}{20,5 - 0,2} = 2,95 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_2 = \frac{60}{20,6 - 0,2} = 2,94 \text{ g/cm}^3$$

A norma estabelece que a diferença entre as massas deve ser até 0,02. Logo, o resultado encontrado está de acordo. O resultado final da massa específica do cimento será a média dos valores individuais. Logo, a massa específica final será de 2,95 g/cm³.

4.2 Massa unitária da brita

Na Tabela 7 encontram-se os pesos individuais do ensaio referente a massa unitária.

Tabela 7 – Pesos individuais das amostras de brita.

Amostra	Peso
1	8,56 kg
2	8,70 kg
3	8,50 kg

Fonte: Autora (2023).

Considerando que a balança utilizada estava tarada, a massa do recipiente foi desconsiderada. Aplicando a Equação 2, obter-se os valores:

$$M_{u1} = \frac{8,56}{0,006} = 1426,6 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{u2} = \frac{8,70}{0,006} = 1450 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{u3} = \frac{8,50}{0,006} = 1416,6 \text{ kg/m}^3$$

A massa unitária final foi a média dos três resultados individuais, que foi igual a 1431,1 kg/m³.

4.3 Composição granulométrica da brita

A composição granulométrica, juntamente com o grau de finura, está representada pela Tabela 8.

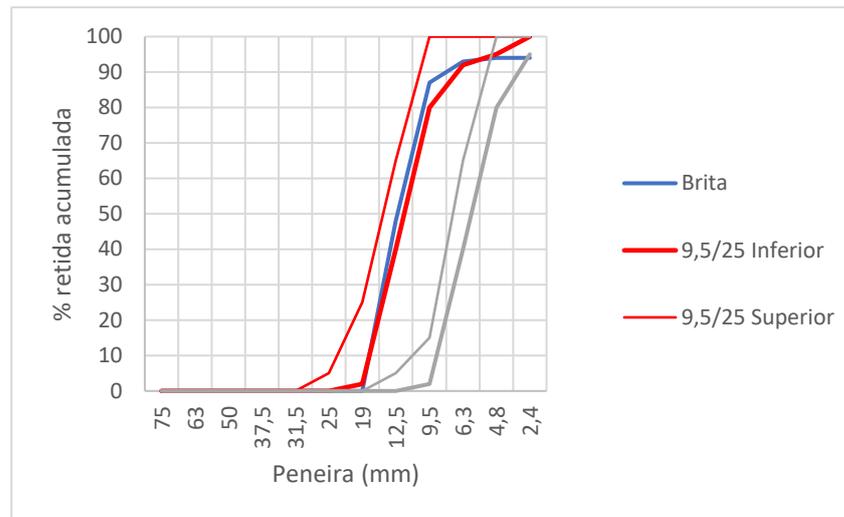
Tabela 8 – Composição granulométrica da brita

Abertura das peneiras	% Retido
19 mm	0
12,5 mm	48
9,5 mm	39
6,3 mm	6
4,75 mm	1
Fundo	6
Dimensão máxima característica	9,5 mm
Módulo de Finura	6,51
Classificação granulométrica	Muito próxima 9,5/25 (Brita 1)

Fonte: Autora (2023).

O Gráfico 3 ilustra a relação entre a porcentagem de material retido em cada peneira e o tamanho da mesma. A brita utilizada se mantém entre os limites estabelecidos pela NBR 7211 (2015).

Gráfico 3 – Composição granulométrica da brita.



Fonte: Autora (2023).

4.4 Densidade e absorção da brita

A Tabela 9 traz os valores das massas das duas amostras necessárias para calcular densidade e absorção.

Tabela 9 – Massas das amostras para ensaio de densidade

DESCRIÇÃO	AMOSTRA 1 (g/cm ³)	AMOSTRA 2 (g/cm ³)
Massa da amostra seca em estufa (m_A)	2000	2000
Massa do agregado saturado superfície seca (m_B)	2015,61	2012,69
Massa da amostra submersa (m_C)	1251,72	1244,81

Fonte: Autora (2023).

Substituindo os valores encontrados na Equação 3:

$$\rho_{s1} = \frac{2000}{2015,61 - 1251,72} = 2,62 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{s2} = \frac{2000}{2012,69 - 1244,81} = 2,61 \text{ g/cm}^3$$

A diferença entre as massas não deve ultrapassar o valor de 0,01 g/cm³. Logo, as amostras estão de acordo com a norma. O resultado final será a média delas, igual a 2,61 g/cm³

A absorção é calculada pela Equação 4:

$$Abs_1 = \frac{2015,61 - 2000}{2000} \times 100 = 0,78\%$$

$$Abs_2 = \frac{2012,69 - 2000}{2000} \times 100 = 0,63\%$$

A média das absorções foi de 0,71%.

4.5 Cálculo do Traço

Nesta pesquisa, foi necessário calcular dois traços. Durante a confecção do concreto poroso com o primeiro traço, percebeu-se que o material final estava muito seco impossibilitando que o agregado graúdo fosse completamente coberto pela pasta. Esse efeito resultaria em uma baixa resistência.

4.5.1 Primeiro Traço

Durante a procura de materiais no sertão alagoano, foi definido a utilização de brita 1 já que é um insumo de fácil acesso. Utilizando a Tabela 5, sem a presença de agregado miúdo, o valor de b/b_o adotado foi de 0,99. A densidade da brita foi de 2,61 g/cm³ e a massa unitária da mesma de 1,43 g/cm³. O peso do agregado foi de:

$$W_a = M_u \times b/b_o$$

$$W_a = 1431,1 \times 0,99$$

$$W_a = 1426,7 \text{ kg}$$

O ajuste de absorção foi de:

$$W_{SSD} = W_a \times (1 + 0,7\%)$$

$$W_{SSD} = 1426,7 \times 1,007$$

$$W_{SSD} = 1426,7 \text{ kg}$$

No primeiro traço, o cálculo do volume da pasta foi feito presumindo 20% de volume de vazios. Assim, o volume de pasta foi de 15%, considerando a curva bem compactada do Gráfico 1. Logo, o volume de pasta foi:

$$V_p = 0,15 \text{ m}^3$$

A norma, por ser americana, utiliza jardas como unidade de medida. Neste estudo foi feita a transformação para o Sistema Internacional de Medidas (SI).

Aplicando a equação 7, o teor de cimento foi de:

$$c = \left[\frac{0,15}{0,295 + 0,3} \right] \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 252,1 \text{ kg/m}^3$$

A quantidade de água se dá pela equação 8:

$$w = 252,1 \times 0,3$$

$$w = 75,63 \text{ kg}$$

O cálculo do volume dos sólidos é a soma de todos os componentes que formam o concreto permeável. Começando pelo volume da brita, o valor se dá pela equação 9:

$$V_a = \frac{1426,7}{2,61 \times 1000 \text{ kg/m}^3} = 0,55 \text{ m}^3$$

Aplicando a equação 10, o volume de cimento foi:

$$V_c = \frac{252,1}{2,95 \times 1000 \text{ kg/m}^3} = 0,09 \text{ m}^3$$

O volume de água, considerando a equação 11, foi:

$$V_w = \frac{75,63}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,08 \text{ m}^3$$

Conclui-se que o volume total de sólidos será de:

$$V_s = 0,55 + 0,09 + 0,08 = 0,72 \text{ m}^3$$

A porcentagem de vazios será:

$$P = \frac{(1 - 0,88)}{1} \times 100 = 28 \%$$

Com 28% de vazios, o Gráfico 2 prevê uma taxa de percolação de aproximadamente 39 in/min (998 mm/min).

Considerando o aspecto seco resultante do concreto, decidiu-se calcular um novo traço e a partir dele confeccionar os corpos de prova, e em seguida executar os ensaios de resistência e percolação.

4.5.2 Segundo Traço

Nesta segunda tentativa a percentagem do volume de vazios foi alterada para 15%. Desse modo, a percentagem correspondente de pasta foi de 20% em relação a um metro cubico. Assim, o volume de pasta foi igual a:

$$V_p = 0,20m^3$$

O teor de cimento aumentou para:

$$c = \left[\frac{0,2}{0,295 + 0,3} \right] \times 1000 \text{ kg/cm}^3$$

$$c = 336,13 \text{ kg}$$

A nova quantidade de água foi de:

$$w = 336,13 \times 0,3 = 100,84 \text{ kg}$$

O volume do agregado, do cimento e da água foram, respectivamente, iguais a:

$$V_a = \frac{1426,7}{2,61 \times 1000 \text{ kg/cm}^3} = 0,55 \text{ m}^3$$

$$V_c = \frac{336,13}{2,95 \times 1000 \text{ kg/cm}^3} = 0,11 \text{ m}^3$$

$$V_w = \frac{100,84}{1000 \text{ kg/cm}^3} = 0,1 \text{ m}^3$$

Logo, o volume total de sólidos foi:

$$V_s = 0,55 + 0,11 + 0,1 = 0,76 \text{ m}^3$$

A nova percentagem de vazios foi de:

$$P = \frac{(1 - 0,76)}{1} \times 100 = 24 \%$$

Para o valor encontrado de vazios, o Gráfico 1 prevê uma taxa de percolação de aproximadamente 12 pol/min (304,8 mm/min).

O traço unitário para o primeiro traço foi de 1:0,3:5,66. Para o segundo o unitário foi de 1:0,3:4,24. Na Tabela 10 se apresenta um resumo dos dois traços calculados.

Tabela 10 – Resumo dos Traços

DESCRIÇÃO	1º TRAÇO	2º TRAÇO
Cimento	252,1 kg	336,13 kg
Água	75,63 kg	100,84 kg
Brita	1426,7 kg	1426,7 kg

Fonte: Autora (2023).

4.6 Permeabilidade do Concreto

No ensaio, o tempo de escoamento para os 3,6 litros de água despejados no concreto foi de 9,25 segundos. Vale ressaltar que não foi possível manter o nível de água entre o intervalo estabelecido por norma, porque o escoamento aconteceu muito rapidamente. A massa de água utilizada foi de 3,6 kg, o diâmetro do anel foi de 300 mm. Substituindo na Equação 14:

$$k = \frac{4583666000 \times 3,6}{300^2 \times 9,25} = 19821,25 \text{ mm/h} = 0,5 \text{ cm/s}$$

O concreto confeccionado com o 2º traço apresentou uma permeabilidade acima do esperado, apesar que a água não se manteve nos limites determinados no anel.

4.7 Resistência à Tração na Flexão

Os apoios inferiores tinham uma distância de 280 mm entre si. As forças de ruptura encontradas do primeiro e do segundo prisma foi de, respectivamente, 1,08 tf e 1,15 tf. Transformando, tem-se que a força de ruptura para a primeira amostra foi igual a 10591,18 N, e para a segunda 11277,65 N. As resistências foram de:

$$R_{f1} = \frac{1,5 \times 10591,18 \times 280}{100^3} = 4,45 \text{ MPa}$$

$$R_{f2} = \frac{1,5 \times 11277,65 \times 280}{100^3} = 4,74 \text{ MPa}$$

A média das resistências foi de 4,59 MPa. Considerando a norma NBR 16416 (ABNT, 2015), a tensão de ruptura mínima que é de 2 MPa foi ultrapassada nas duas amostras.

Fazendo comparação com outros trabalhos, o concreto poroso desse estudo teve uma melhor desenvoltura. Com o volume de vazios igual a 15%, a tensão foi de 2,21 MPa. E com o volume de vazios igual a 20%, a tensão foi de 1,93 MPa (MAINES, PRUNER, KNOBLAUCH, 2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a execução desse estudo, percebeu-se uma grande diferença entre os resultados obtidos para corpos de prova de concreto poroso, quando comparados com resultados normalmente encontrados de concreto convencional.

A norma americana utilizada para o cálculo do traço se mostrou eficaz, considerando que os resultados foram satisfatórios e dentro dos limites estabelecidos.

Diante do exposto, conclui-se que os traços elaborados e testados em laboratório são adequados para aplicações em vias destinadas ao tráfego de pedestres, uma vez que, comparando com as especificações da ACI 552R (2010) a resistência é atendida.

A placa de concreto usada para o ensaio de permeabilidade apresentou uma taxa alta de infiltração.

Existe a possibilidade de implantação de um sistema de captação de água abaixo do concreto, já que o solo não tem capacidade de absorver toda a água em momentos de pico. A água armazenada pode ser destinada ao reaproveitamento com finalidades como irrigação, ou conduzir a mesma para o sistema de drenagem mais próximo.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Adição de aditivos a fim de melhorar a resistência do concreto;
- Aplicabilidade do concreto permeável em solos alagoanos;
- Implementação de reservatório para armazenar a água infiltrada.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10: Report on pervious concrete**. ACI, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C192M: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**. ASTM, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete**. ASTM, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. ASTM, 2018a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete**. ASTM, 2018b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- AKAND, L.; YANG, M.; WANG, X. Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 32-39, 2018.
- AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F. N., ALFAKIH, E.; **Tecnicas alternativas em assainissement pluvial**. Paris: Technique et Documentation – Lavoisier, 1994.
- BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

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, 2007.

COSTA, P. B. F. **Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação**. 2019. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GAEDICKE, C.; TORRES, A.; HUYNH, K.; MARINES, A. **A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores**. Construction and Building Materials, v. 124, 2016.

HÖLTZ, F. da C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A.; ABUHATA, F. **Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method**. Construction and Building Materials, v. 147, p. 576-587, 2017.

JOSHAGHANI, A; RAMEZANIANPOUR, A J; ATAELI, O; GOLROO, A. **Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method**. Construction and Building Materials, v. 101, 2015.

KAJIO, S.; TANAKA, S.; TOMITA, R.; NODA, E.; HASHIMOTO, S. **Properties os porous concrete with high strenght**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, 8., Lisboa. 1998.

KHANKHAJE, E; SALIM, M. R.; MIRZA, J.; HUSSIN, M. W.; KHAN, R; RAFIEIZONOOZ, M. **Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell**. Applied Acoustics, v. 122, 2017.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, R. **Clogging in permeable concrete: A review**. Journal of Environmental Management, v. 193, 2017.

MAINES, A.; PRUNER, L. H. C.; KNOBLAUCH, J. H. O. **Influência dos Agregados sobre as Propriedades do Concreto Permeável**. Santa Catarina: IBRACON, 2020.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEININGER, R. C. **No-fines pervious concrete for paving**. Concrete International, v.10, p. 20-27, 1988.

MONTES, F.; VALAVALA, S.; HASELBACH, L. M. **A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete.** Journal of ASTM International, v. 2, n. 1, 2005

MULLIGAN, A. N. **Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems.** 2005, 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Central Florida, Orlando, 2005.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Materials and Mix Design.** Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org>>. Acesso em: 3 abr. 2019.

NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. A **modified method for the design of pervious concrete mix.** Construction and Building Materials, v. 73, p. 271–282, 2014.

OLEK, J.; WEISS, W. J.; NEITHLATH, N.; MAROLF, A.; SELL, E.; THORNTON, W. D. **Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials.** Final Report, SQDH 2003-5, ACBM, Pardue University, 2003.

ONO, B. **Análise do desempenho estrutural e hidráulico de um pavimento permeável com revestimento de blocos de concreto unidirecionalmente articulados.** Tese (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p.248. 2018.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. **Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado.** TRANSPORTES, v. 25, n. 3, p. 90-101, 2017.

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

TORRES, A.; HU, J. **An Alternate Test Method for the Void Content of Pervious Concrete.** Advances in Civil Engineering Materials, v. 5, n. 1, 2016.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. **The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 95, 2015.

WANG, Z.; ZOU, D.; LIU, T.; ZHOU, A.; SHEN, M. **A novel method to predict the mesostructure and performance of pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 263, 2020.

ZHANG, Q.; FENG, X.; CHEN, X.; LU, K. **Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology.** Construction and Building Materials, v. 259, 119776, 2020.

ZHONG, R.; WILLE, K. **Compression response of normal and high strength pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 109, p. 177-187, 2016.