

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDA DAMASO DA SILVEIRA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL UTILIZANDO ADITIVO PLASTIFICANTE POLIFUNCIONAL E
ADITIVO MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

PONTA GROSSA

2024

FERNANDA DAMASO DA SILVEIRA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL UTILIZANDO ADITIVO PLASTIFICANTE POLIFUNCIONAL E
ADITIVO MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Me. Marcelo Miranda
Farias

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Jansen
Mikami

PONTA GROSSA

2024

FERNANDA DAMASO DA SILVEIRA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL UTILIZANDO ADITIVO PLASTIFICANTE POLIFUNCIONAL E
ADITIVO MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Marcelo Miranda Farias

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Me. Adriana Fiori Moura

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr.^a Patrícia Kruger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 21 de outubro de 2024

Dedico aos meus pais Silvane Knopp e Adriano Damaso da Silveira, e a minha irmã Fabiana Damaso da Silveira, pela compreensão e apoio em todos os momentos desse trabalho e no decorrer da trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Me. Marcelo Miranda Farias e Dr. Rafael Jansen Mikami por todo apoio e contribuições técnicas no desenvolvimento deste estudo. Por todo conhecimento e auxílio que me passaram, norteando decisões e sendo fundamentais durante a elaboração dessa pesquisa.

Agradecimento ao laboratorista Augusto Cesar Preidum e ao acadêmico Rafael Juncos pelo auxílio nas atividades laboratoriais. Aos meus amigos de curso, trabalho e da vida que me apoiaram de forma direta ou indireta, não apenas na realização do trabalho, mas a passar por todos esses anos de curso.

À infraestrutura da Universidade Estadual de Ponta Grossa, em especial ao Departamento de Engenharia Civil e principalmente ao Laboratório de Materiais de Construção Civil.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê.”*

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

O concreto permeável é um material poroso, utilizado na produção de pavimentos permeáveis devido à sua estrutura de vazios interconectados que possibilita a passagem de água por seu interior. Estudos voltados à utilização de aditivos a fim de melhorar as propriedades físicas e mecânicas desse material vêm sendo cada vez mais realizados. No presente estudo, o objetivo é propor uma dosagem otimizada para os concretos permeáveis através da inclusão de dois aditivos na mistura, o modificador de viscosidade e o plastificante polifuncional, ambos visando a melhora do adensamento e transporte desse material. Para isso, foram realizados cinco traços de concreto permeável, sendo um traço de referência, que serviu como parâmetro para todas as análises, e quatro traços com aditivos, sendo que o aditivo modificador de viscosidade foi executado com teores de 0,3% e 0,5%, enquanto o aditivo plastificante polifuncional foi dosado em 0,1% e 0,3%. Em todos os traços, a porosidade de projeto foi de 22,5% e o índice de consistência padrão foi mantido no valor de 303,80 mm (± 5 mm). Todas as amostras de concreto permeável moldadas foram ensaiadas para determinação da porosidade e densidade no estado fresco, resistência à compressão e tração aos 28 dias e permeabilidade, porosidade aberta, no estado endurecido e taxa de infiltração. Além da execução dos corpos de prova de concreto, também foram realizadas caracterizações de argamassa e pasta pura, sendo que, para ambos, foram analisadas massa específica seca, massa específica saturada, absorção e resistência à compressão e tração. As amostras de concreto apresentaram resistência à compressão entre 11,52 e 21,38 MPa. Os valores de resistência à tração encontram-se entre 2,04 e 3,17 MPa. As taxas de infiltração variaram entre 0,20 e 0,59 cm/s. As porosidades no estado fresco reduziram se comparadas à porosidade de projeto, entretanto permaneceram em torno de 20%. Já no estado endurecido, os valores obtidos ficaram entre 21,88% e 27,96%. Para as amostras de argamassas foram obtidas resistências à compressão entre 36,40 e 63,04 MPa, já à tração os valores foram de 5,73 a 6,72 MPa. Nas análises de massa específica seca e saturada das argamassas foram obtidos valores entre 1,621 e 1,922 g/cm³ e 1,876 e 2,068 g/cm³, respectivamente. Os valores de absorção ficaram entre 10,94 e 17,54%, explicando algumas das características demonstradas no concreto permeável. Os ensaios de pasta forneceram valores de resistência à compressão entre 7,18 e 27,52 MPa, enquanto de tração foram de 1,71 a 3,51 MPa. E as massas específicas seca e saturada apresentaram em ambas as análises valores com baixas variações, ficando, respectivamente, em torno de 1,618 e 1,728 g/cm³ e 2,011 e 2,092 g/cm³. Para absorção os valores ficaram entre 21,0 e 24,33%.

Palavras-chave: concreto permeável, aditivos, permeabilidade, argamassa, pasta de concreto, resistência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais camadas do sistema de pavimentos permeáveis	15
Figura 2 – Tipos de revestimentos	16
Figura 3 - Distribuição Granulométrica dos Agregados	18
Figura 4 - Representação das porosidades aberta, fechada e vazios da pasta de cimento.....	21
Figura 5 – Resultados das análises entre resistência mecânica e porosidade no estudo de Filho <i>et al.</i>	24
Figura 6 – Fluxograma da metodologia adotada	30
Figura 7 - Granulometria do agregado miúdo.....	32
Figura 8 - Teste de drenagem de pasta	42
Figura 9 - Ensaio para definição do ICp antes e após o abatimento	46
Figura 10 - Índices de consistência com diferentes teores de aditivos.....	47
Figura 11 - Porosidade média dos corpos de prova no estado fresco	49
Figura 12 - Massa específica média dos corpos de prova no estado fresco	49
Figura 13 - Porosidade média no estado endurecido e porosidade aberta	50
Figura 14 - Massa específica média dos corpos de prova no estado endurecido	51
Figura 15 - Taxa de Infiltração Média dos corpos de prova de concreto permeável	52
Figura 16 - Resistência média à compressão dos corpos de prova de concreto permeável	53
Figura 17 - Resistência média à tração dos corpos de prova de concreto permeável	55
Figura 18 - Consumo real de cimento dos traços	56
Figura 19 - Resistência à compressão média das argamassas	58
Figura 20 - Resistência à tração média das argamassas.....	59
Figura 21 - Massa específica seca das argamassas.....	60
Figura 22 - Massa específica saturada das argamassas	61
Figura 23 - Absorção das argamassas.....	62
Figura 24 - Resistência à compressão dos corpos de prova de pasta	63
Figura 25 - Resistência à Tração dos corpos de prova de pasta	63
Figura 26 - Massa específica seca dos corpos de prova de pastas	64
Figura 27 - Massa específica saturada dos corpos de prova de pasta	64
Figura 28 – Absorção dos corpos de prova de pasta	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo e graúdo.....	31
Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo	31
Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo.....	32
Tabela 4 - Características Aditivos	33
Tabela 5 - Ensaio de caracterização de corpos de prova de concreto permeável ..	34
Tabela 6 - Descrições dos Parâmetros do Método do Grau de Compactação.....	35
Tabela 7 - Dados de entrada e traço de referência	43
Tabela 8 - Teste de compactação para traço de referência	43
Tabela 9 - Dosagem Final Traço Referência.....	44
Tabela 10 - Ensaio do concreto permeável no estado fresco de rompimentos	44
Tabela 11 - Ensaio de Permeabilidade do Concreto Permeável	45
Tabela 12 - Resultados do ensaio para ajuste de consistência da pasta	47
Tabela 13 - Traços de concreto permeável definidos através do método do Grau de Compactação	48
Tabela 14 - Consumos reais de material dos traços	56
Tabela 15 - Intensidade de consumo de cimento.....	57
Tabela 16 - Caracterização física das peças de concreto permeável	65
Tabela 17 - Caracterização física das argamassas.....	66
Tabela 18 - Caracterização física das pastas	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL	15
2.2 CONCRETO PERMEÁVEL	17
2.2.1 Composição	17
2.2.2 Aditivos	19
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	20
2.3.1 Porosidade	21
2.3.2 Permeabilidade	22
2.3.3 Resistência Mecânica	23
2.4 DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL	24
2.4.1 Método do <i>American Concrete Institute</i> (ACI)	25
2.4.2 Método de Nguyen <i>et al.</i> (2014)	25
2.4.3 Método do Grau de Compactação - Mikami (2022)	26
2.5 ESTUDO DE CASO	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 MATERIAIS	31
3.1.1 Agregados	31
3.1.2 Aglomerante	32
3.1.3 Aditivos	32
3.2 MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	33
3.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO PILOTO	35
3.3.1 Definição da relação água/cimento	35
3.3.2 Definição do traço e teste de compactação	36
3.4 DOSAGEM DOS ADITIVOS	39
3.5 DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42

4.1 TRAÇO REFERÊNCIA.....	42
4.1.1 Definição da relação água/cimento	42
4.1.2 Definição do traço piloto e teste de compactação	43
4.1.3 Caracterização das peças de concreto permeável do traço referência.....	44
4.1.4 Determinação do índice de consistência padrão (ICp)	45
4.1.5 Determinação dos traços de concreto permeável	47
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM ADITIVO	48
4.2.1 Porosidade e Massa Específica no Estado Fresco	48
4.2.2 Porosidade e Massa Específica no Estado Endurecido	50
4.2.3 Taxa de Infiltração	51
4.2.4 Resistência à Compressão.....	53
4.2.5 Resistência à Tração.....	54
4.2.6 Consumo de Cimento.....	55
4.3 CARACTERIZAÇÃO ARGAMASSAS	57
4.3.1 Resistência à Compressão.....	57
4.3.2 Resistência à tração	59
4.3.3 Massa Específica e Absorção	60
4.4 CARACTERIZAÇÃO PASTA.....	62
4.4.1 Resistência à compressão	62
4.4.2 Resistência à tração	63
4.4.3 Massa específica e absorção	64
4.5 Considerações finais	65
5 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano desenfreado e sem planejamento gerou como consequência o aumento generalizado das superfícies impermeáveis, juntamente com as ocupações indevidas, beirando rios e córregos. Esses fatos vieram a ocasionar impactos mundiais nos sistemas de drenagem das cidades, aumentando a ocorrência de cheias e, conseqüentemente, de enchentes e inundações. Portanto, a busca por métodos alternativos de drenagem tem sido cada vez mais estudados, no intuito de minimizar esse impacto (Batezini, 2013).

Como uma forma de minimizar esses problemas, as estruturas de pavimento permeável têm sido usadas como um suplemento, ou até mesmo um substituto dos pavimentos convencionais, principalmente para aplicações em estradas de baixa rodagem, onde o tráfego é de veículos mais leve (Cackler *et al.*, 2006; Weiss *et al.*, 2017).

De modo geral, os pavimentos permeáveis podem ser entendidos como estruturas que possibilitam a infiltração da água sob suas camadas, a fim de absorver parte ou toda a percolação da água através da superfície permeável, de modo a diminuir o escoamento superficial, evitando danos à estrutura. Essa água pode ainda ser destinada a algum tipo de reservatório, ou simplesmente ser infiltrada no subsolo (Batezini, 2013; ABNT, 2015).

Um dos materiais mais utilizados para a execução desse tipo de pavimento é o concreto permeável, também conhecido como concreto poroso. Esse material é caracterizado por sua elevada porosidade, devido à sua estrutura, que consiste em poros conectados, capazes de conduzir água, proporcionando a permeabilidade da estrutura, que se trata da capacidade do material de permitir a passagem de água através dele. Sua produção se dá pela mistura de cimento, água e agregado graúdo, e a elevada quantidade de poros provêm da utilização de pouco ou nenhum agregado miúdo, o que possibilita os espaços em sua estrutura (ACI, 2010; Polastre; Santos, 2008).

O concreto permeável apresenta diferenças significativas em relação ao concreto convencional, sendo menos denso devido à sua estrutura interna de vazios interconectados. Essa menor densidade reduz sua resistência à compressão tornando-o menos apropriado para estruturas que exigem alta capacidade de carga.

Em contrapartida, o concreto convencional é mais compacto e resistente, devido a menor porosidade que apresenta na estrutura (ABNT, 2016).

Na literatura existem diversos métodos de dosagem propostos, dentre os quais pode-se citar o método ACI publicado em 2010, e sua versão atualizada em 2023, o método proposto por Nguyen *et al.* (2014) e o proposto por Mikami (2022). No entanto, a aplicação destes ainda apresenta grandes limitações, dentre as quais pode-se citar as necessidades de ajustes da energia de compactação, bem como variações das propriedades e necessidades na aplicação desse material em campo. O uso de aditivos já é bastante disseminado dentro da aplicação do concreto permeável, pois devido suas características a busca por

A falta de um padrão brasileiro leva a utilização de normativas internacionais, de modo a possibilitar as análises da aplicação *in loco*, comparando o que se obtém de resultado de tal aplicação com o que se conhece das propriedades apresentadas em laboratório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar misturas de concreto permeável com a incorporação de aditivo plastificante polifuncional e aditivo modificador de viscosidade, com foco na otimização do desempenho hidráulico, resistência mecânica e taxa de permeabilidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver, em laboratório, uma mistura padrão de concreto permeável visando desempenho hidráulico e mecânico satisfatório, com porosidade e energia de compactação controladas;
- Determinar a dosagem e os teores ideais de aditivo que aprimorem as propriedades do concreto permeável sem comprometer o índice de consistência padrão da pasta;
- Avaliar as modificações nas propriedades das pastas de cimento, tanto da pasta pura quanto das argamassas, que envolvem os agregados graúdos,

quando utilizados o aditivo plastificante polifuncional e o modificador de viscosidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

A falta de um sistema de drenagem urbana eficiente é um problema que afeta diversos países em desenvolvimento, inclusive o Brasil, o qual experimentou nas últimas décadas uma expansão urbana desenfreada, que ocasionou uma precária infraestrutura de drenagem (Canholi, 2014).

As inundações e alagamentos são problemas que atingem comunidades mais vulneráveis. Isso ocorre porque os sistemas de drenagem existentes são essencialmente preventivos. Quando esses sistemas não são considerados desde o início do planejamento, há uma alta probabilidade de se tornarem ineficientes ao longo do tempo (Araújo *et al.* 2000).

Conforme os dados analisados pela Confederação Nacional de Municípios (CNM), cerca de 93% dos municípios brasileiros foram atingidos por algum desastre natural nos últimos 10 anos, o que levou a estado de calamidade ou registro de emergência. Todos os registros se deram devido a tempestades, inundações, enxurradas ou alagamentos.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), em 2020, o Brasil contava com cerca de 1,8 milhões de quilômetros de vias públicas urbanas, das quais 1,1 milhão possuem pavimentação e/ou meio-fio. Desses, cerca de 390,4 mil quilômetros possuem redes ou canais pluviais subterrâneos. Além disso, sabe-se que cerca de 602 municípios contam com soluções naturais de drenagem, sendo elas faixas e valas de infiltração.

A utilização de concretos permeáveis como base em pavimentações se trata de uma alternativa complementar para solucionar os impactos da impermeabilização, utilizando métodos técnicos que permitem a infiltração da água pluvial, além de reduzir a necessidade de custos em obras de infraestrutura direcionadas aos sistemas de drenagem. Assim, viabiliza-se o uso desse material em locais com consideráveis volumes de precipitação (Acioli, 2005).

Além dos pontos já elencados, a escassez de informações referentes às aplicações em campo do concreto permeável, exemplificam a necessidade de realizar estudos e análises voltadas à área, visando permitir a adaptação de métodos de

dosagem em laboratório. Desse modo o intuito desse trabalho é projetar dosagens ótimas de concreto permeável utilizando o aditivo plastificante polifuncional e o aditivo modificador de viscosidade, a fim de gerar o melhor aproveitamento das propriedades do concreto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

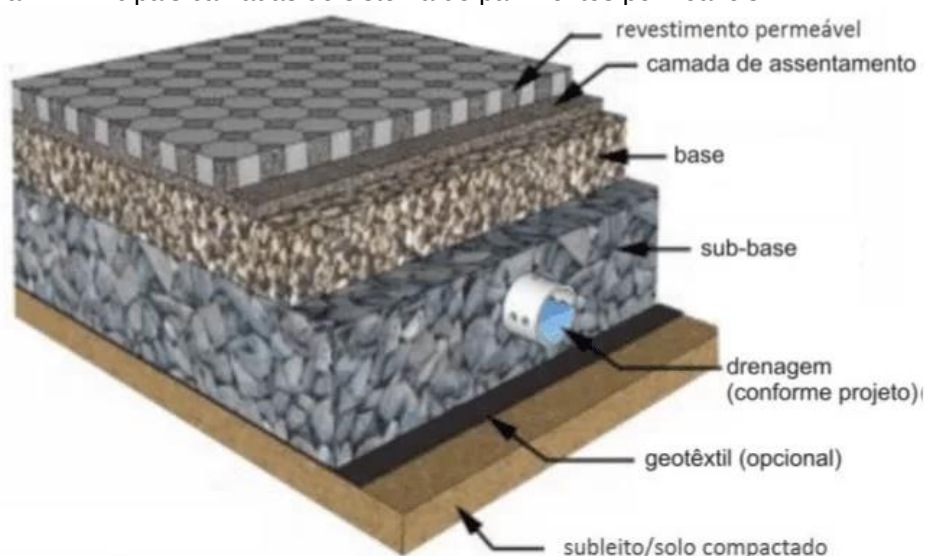
2.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL

Os pavimentos permeáveis podem ser definidos como estruturas que possuem espaços livres por onde a água pode infiltrar, de modo que podem ser considerados parte de um sistema de drenagem sustentável. Eles se diferenciam dos pavimentos convencionais, pois possibilitam a infiltração da água através de sua estrutura, diferente dos convencionais que, devido à porcentagem de agregados miúdos em sua composição, se tornam impermeáveis (Lamb, 2014).

Esses pavimentos são amplamente utilizados em meios de drenagem, como estacionamentos, estradas residenciais, calçadas, estruturas hidráulicas, quadra de tênis, estufas, decks de piscinas, camadas de base permeáveis sob pavimentos pesados, entre outros (Tennis; Leming; Akers, 2004).

De modo geral, a estrutura desse tipo de pavimento pode ser composta de 4 camadas: subleito, sub-base, base e revestimento, sendo que o revestimento deve ser composto de um material que possua alta permeabilidade a fim de possibilitar a infiltração da água, além de atender os requisitos de durabilidade, economia, aparência e facilidade de execução (Virgiliis, 2009). Na Figura 1 pode ser observada uma seção típica de pavimento permeável.

Figura 1 - Principais camadas do sistema de pavimentos permeáveis



Fonte: Motta (2009).

Para a base e sub-base a NBR 16416 (ABNT, 2015) preestabelece requisitos de resistência, onde se avalia a abrasão “Los Angeles”, índice de vazios, índice de

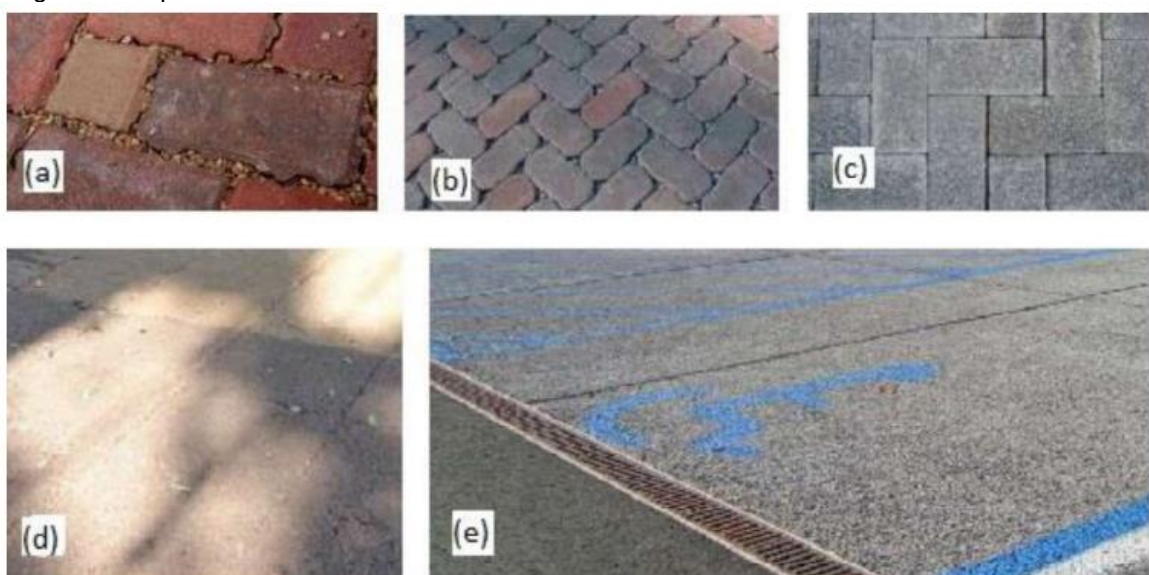
suporte Califórnia e material passante na peneira de malha 0,075 mm, além da granulometria que o material deve apresentar para poder ser utilizado na execução dos pavimentos permeáveis. O subleito, por sua vez, é representado pelas características do solo da região, podendo ainda ser reforçado em caso de necessidade (Sales, 2008).

Existem variados tipos de revestimentos que podem ser classificados como permeáveis. Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) estes podem ser divididos em: peças de concreto intertravados, placas de concreto permeável, onde a percolação de água acontece através da placa, e os pavimentos porosos, que podem ser de concreto permeável ou de concreto asfáltico poroso.

A classificação dos blocos intertravados pode ainda ser dividida em três classes, caracterizadas pelo tipo de infiltração. Na primeira divisão, têm-se as peças de concreto com juntas alargadas, de modo que a infiltração acontece apenas através das juntas. A segunda classificação trata-se das peças de concreto que possuem áreas vazadas por onde a água escoará. Já a última categoria é composta pelas peças de concreto permeável, onde a percolação da água acontece pela estrutura do material (Ono; Baldo; Cargnin, 2017).

Na Figura 2 é possível identificar os revestimentos citados, sendo eles: peças de concreto com juntas alargadas (a), peças de concreto com áreas vazadas (b), blocos intertravados (c), peças de concreto permeável (d) e por fim um exemplo do pavimento de concreto permeável (e).

Figura 2 – Tipos de revestimentos



Fonte: Marchioni e Silva (2010).

Visando a melhor eficiência e funcionalidade do sistema, é necessário que as áreas permeáveis possuam uma declividade máxima de 5%, e a área de contribuição deve possuir 20% de declividade, de modo a garantir que a água consiga infiltrar na estrutura e não apenas escoar por ela (ABNT NBR 16416, 2015).

Além das necessidades de declividade das áreas, também se torna necessário avaliar o solo onde a estrutura será aplicada, caso contrário a eficiência do sistema será reduzida ou até mesmo nula. Desse modo, recomenda-se realizar sondagens com profundidades mínimas de 1,2 metros a fim de verificar o nível do lençol freático do local onde será aplicado. É necessária a coleta desses dados para facilitar o entendimento da área de atuação, verificando o coeficiente de permeabilidade do solo, pois em caso de um valor muito baixo a infiltração não acontecerá da maneira esperada, o que tende a tornar o sistema ineficiente (Tucci, 2003).

Desse modo, ao dimensionar o sistema de maneira eficiente, esse tende a apresentar diversas vantagens, dentre as quais se tem a redução do escoamento de águas superficiais, auxiliando na redução de inundações, além de que auxiliam na filtração e redução de contaminantes que adentram os solos e consequentemente os lençóis freáticos. Outro grande benefício ambiental que pode ser citado, está na redução dos efeitos das ilhas de calor, devido à menor absorção de radiação pelos pavimentos permeáveis, já que podem apresentar coloração mais clara, assim como o menor armazenamento de calor, proporcionado pela estrutura porosa (Ibrahim *et al.*, 2014; Tennis *et al.*, 2004).

2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável pode ser caracterizado como um concreto com alto índice de vazios interligados, os quais se formam por meio de poros interconectados que possibilitam a percolação de água através de sua estrutura, diferenciando esse do concreto convencional onde o que se tem é o escoamento superficial. Desse modo, a composição do concreto apresenta particularidades na dosagem, produção e caracterização (ACI, 2010; Mikami, 2022).

2.2.1 Composição

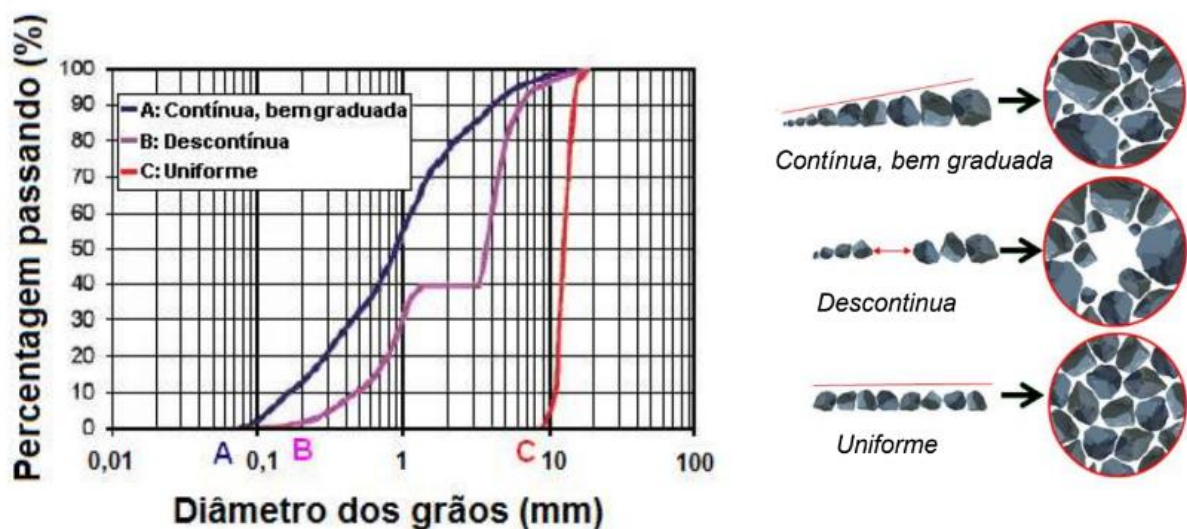
Esse tipo de concreto é produzido através da mistura de aglomerante, agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado miúdo e água. Apesar do cimento

Portland ser o aglomerante principal, segundo o relatório ACI 522R (ACI, 2010), outras adições também podem ser utilizadas no intuito de melhorar as propriedades da matriz cimentícia do material. Assim, o material resultante da mistura nada mais é que uma estrutura de agregados grãos recobertos, superficialmente, por uma camada de pasta (Schwetz *et al.*, 2015).

Os agregados grãos utilizados podem variar entre 9,5 e 19,0 mm, conforme cita ACI 522R (ACI, 2010). Entretanto, existem autores que citam a utilização de agregados de dimensões entre 1,18 e 9,5 mm (Tennis, Leming e Akers, 2004). A fim de obter uma estrutura com um arranjo que contenha a maior quantidade possível de vazios com dimensões consideráveis, Sandoval *et al.* (2018) sugerem que a escolha ideal de agregados grãos seria os que possuem granulometria uniforme, pois grãos de tamanho semelhante resultam em vazios de dimensões maiores. Entretanto, sabe-se que aumentar a quantidade de vazios na estrutura tende a prejudicar a resistência mecânica.

Assim, para mitigar esse efeito, são empregados agregados com uma granulometria contínua, aumentando os pontos de contato entre os grãos e aprimorando a distribuição dos esforços no material. A diferença entre as distribuições granulométricas se dá principalmente nas continuidades de cada agregado, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição Granulométrica dos Agregados



Fonte: Farias, M. M. e Palmeira, E. M (IBRACON, 2007).

2.2.2 Aditivos

Aditivos são comumente utilizados na confecção de misturas de concreto permeável. Por se tratar de uma mistura com abatimento zero (*slump* 0), os aditivos são incorporados na intenção de melhorar as propriedades físicas e mecânicas das peças, no estado endurecido, ou seja, melhorar desempenho hidráulico, durabilidade, resistência e trabalhabilidade.

Grande parte dos estudos utilizam os aditivos redutores de água e os superplastificantes visando melhorar as características do concreto sem aumentar o consumo de água da mistura e mantendo a relação *a/c*, evitando diminuição da resistência mecânica (Batezini, 2019). O estudo proposto por Sandoval *et al.* (2019) realiza a incorporação de aditivos superplastificantes em misturas de concreto permeável a fim de aumentar a resistência à compressão de misturas, mesmo as que possuem relação *a/c* consideravelmente baixas, em torno de 0,24. Os autores atingiram valores entre 19 e 31 MPa nas peças estudadas.

Na ACI (2023) é possível encontrar diversas sugestões de aditivos, dentre elas se têm os retardadores de pega, que estabilizam o processo de hidratação do cimento, prolongando o tempo de trabalho da mistura. Nesse sentido, podem ser utilizados em razão do tempo de transporte entre usina e local de lançamento. A norma também cita a importância de realizar teste a fim de dosar a mistura de modo a atender às necessidades apresentadas.

Está disponível no mercado o aditivo modificador de reologia, que pode ser utilizado para concretos permeáveis. Esse aditivo contempla diversas funções em um mesmo produto. Confere melhora na reologia da pasta, sua trabalhabilidade, bem como hidratação dos materiais cimentícios. O aditivo modificador de reologia também promove melhoras no manuseio e na compactação, não havendo necessidade de combinação com outros aditivos. Esse material foi aplicado em trabalhos mais recentes, como o de Rangelov *et al.* (2016) e Costa (2019).

Segundo Costa (2019), o uso do aditivo modificador de reologia, gerou melhora na trabalhabilidade das amostras, facilitando o preenchimento das misturas nas fôrmas. Entretanto, o autor frisa a atenção que deve ser dada à dosagem adequada desse aditivo, para que a consistência e trabalhabilidade sejam satisfatórias, sem que a mistura apresente aspecto seco e com falta de aderência com

os agregados. Desse modo, o controle da consistência é algo que o autor cita com bastante ênfase para que o resultado seja satisfatório.

Além dos aditivos, autores também citam a combinação do concreto permeável com demais materiais cimentícios suplementares (sílica ativa e cinza volante), ou ainda escória de alto forno. Chen *et al.* (2013) e El-Hassan *et al.* (2019) observaram que o uso combinado resultou em um aumento nas resistências à compressão e tração em amostras com 20% de porosidade, com incrementos de até 27% e 23%, respectivamente.

Podem ainda ser adicionados agentes poliméricos e microfibras nas misturas de concreto permeável, as quais visam prevenir fissuras e aumentar a resistência e durabilidade. Entretanto, o efeito desses ainda não é completamente dominado pelos pesquisadores. Por exemplo, Wu *et al.* (2016) notou que as fibras de polipropileno tendem a melhorar a resistência à abrasão, bem como durabilidade ao congelamento e descongelamento do concreto. Entretanto, para Costa (2019) as microfibras de polipropileno não são recomendadas para concretos porosos, pois, diferente dos concretos convencionais, podem causar problemas de aderência com a matriz porosa.

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

As propriedades desse material influenciam diretamente no entendimento dos parâmetros de dosagem dessas misturas de modo a atender os critérios de aplicação. Assim como no concreto convencional, as propriedades podem ser divididas em seus dois estados: fresco e endurecido. No estado fresco, a característica mais marcante é a menor trabalhabilidade e abatimento que a mistura apresenta, devido à menor quantidade de pasta de cimento e agregado miúdo (Tennis; Leming; Akers, 2004). Já no estado endurecido, as principais propriedades podem ser definidas como a porosidade, permeabilidade e resistência mecânica.

Essas propriedades são diretamente relacionadas, já que quanto maior o teor de vazios, maior a permeabilidade e, conseqüentemente, menor a resistência à compressão. Portanto, um dos maiores problemas na produção e aplicação desse concreto é encontrar uma dosagem que possua alta permeabilidade e mantenha a resistência aceitável de norma (ACI, 2010).

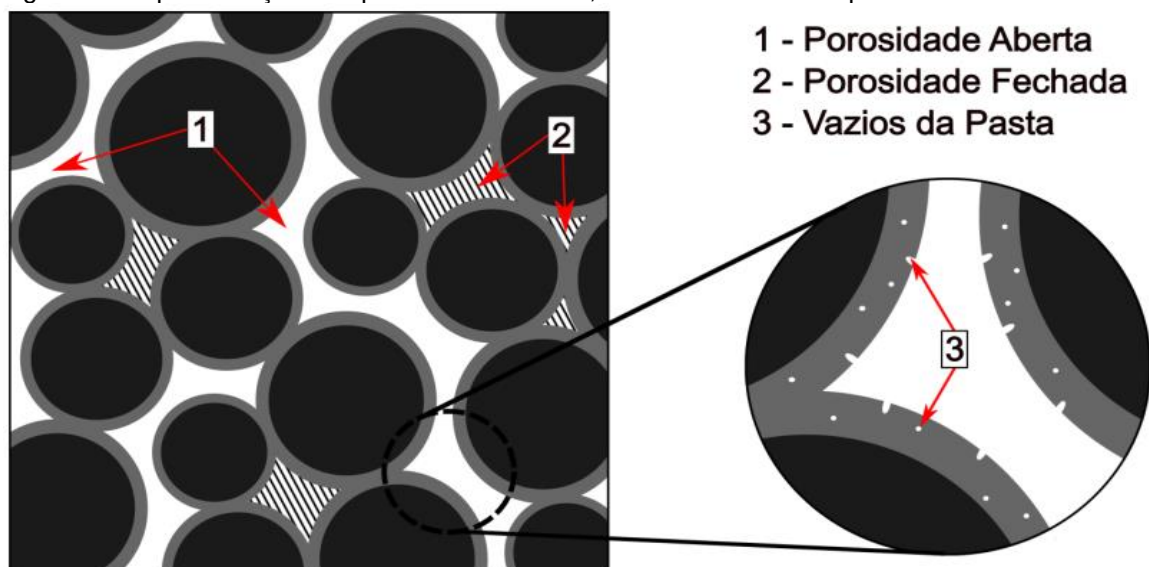
2.3.1 Porosidade

A porosidade pode ser considerada a propriedade que caracteriza os concretos permeáveis. A sua determinação está diretamente relacionada ao grau de compactação, granulometria do agregado graúdo e traço da mistura. Ela pode ser considerada um dos fatores que mais afetam a condutividade hidráulica, de modo que cresce proporcionalmente ao aumento do volume de vazios. Os primeiros estudos referentes à aplicação do concreto permeável na pavimentação relatam a necessidade de cerca de 15% de vazios para que o material apresente permeabilidade significativa (Meininger, 1988).

Usualmente, a porcentagem de vazios efetivos no concreto permeável se encontra na faixa de 15 a 35% (ACI, 2010) e pode ser controlada através do nível de compactação da mistura e das propriedades do agregado utilizado (Ibrahim *et al.*, 2014).

O total de vazios pode ser dividido em três grupos (Figura 4), sendo eles, os vazios da pasta de cimento formados nos processos de hidratação do cimento, a porosidade aberta ou efetiva que se trata dos poros que estão interligados e formam os sistemas que transportam a água pelo concreto, e por fim a porosidade fechada ou isolada, que são os vazios isolados do sistema interligado, portanto não contribuem para o escoamento (Mehta; Monteiro, 2008; Montes; Valavala. Haselbach, 2005; Joshghani *et al.*, 2015; Torres; Hu, 2016). A soma das três parcelas usualmente é denominada de porosidade total do concreto permeável.

Figura 4 - Representação das porosidades aberta, fechada e vazios da pasta de cimento



Fonte: Mikami (2022).

Os principais métodos para a obtenção da porosidade total são a pesagem hidrostática (ASTM, 2012), onde é determinado o volume do corpo de prova no estado endurecido e, após isso, ele é submerso em água e o volume deslocado é determinado. Com esses volumes, é possível determinar o teor de vazios do corpo de prova, usando a diferença entre o volume total e o volume submerso. Há ainda a estimativa por relações volumétricas, realizada ainda no estado fresco (ASTM, 2014).

2.3.2 Permeabilidade

Outra propriedade diretamente ligada à porosidade é a permeabilidade, que se relaciona à capacidade que o material apresenta de possibilitar a passagem de fluidos através de sua estrutura (Sales, 2008). Essa característica pode ser atribuída devido à rede de macroporos interconectados que esse concreto possui.

Essa característica pode ser avaliada através da taxa de infiltração, que pode ser obtida através do método da ASTM C1701 (ASTM, 2014), onde se determina o tempo necessário para que um volume de água pré-estabelecido percole a amostra, sendo que o escoamento fica restrito a um anel de infiltração com medidas conhecidas. Conforme a NBR 16416 (2015), para pavimentos permeáveis, essa taxa deve ser de, no mínimo, 0,1 cm/s, sendo que usualmente os valores obtidos variam entre 0,15 e 1,2 cm/s. Esse intervalo pode ser facilmente alcançado devido à baixa utilização de agregados miúdos em sua composição.

Ainda, outros parâmetros podem ser relacionados com a condutividade hidráulica do concreto. Dentre eles, estão as características dos agregados, tamanho de seus poros, condutividade de vazios e distribuição granulométrica (ACI, 2023).

Outro parâmetro para avaliar a permeabilidade do concreto permeável é a condutividade hidráulica. Esta corresponde à facilidade com que a água se movimenta no interior de um meio poroso sujeito a uma carga hidráulica. A condutividade pode ser determinada por ensaio de permeâmetro de carga variável ou constante (ACI, 2010; ABNT, 2015). Para carga variável, se utilizam amostras cilíndricas, que são submetidas a uma carga de água variável, sendo o coeficiente hidráulico o tempo necessário para a água percolar de um nível inicial ao final, dentro da coluna de carga. Nos ensaios de carga constante, utiliza-se um reservatório de nível constante ou um extravasor. Nesse ensaio, o coeficiente é determinado pela quantidade de água que escoar em um intervalo de tempo determinado.

2.3.3 Resistência Mecânica

É crucial observar estes parâmetros, pois o concreto permeável demonstra uma resistência mecânica significativamente inferior se comparado ao concreto convencional, disparidade que ocorre devido à resistência mecânica possuir relação inversamente proporcional à porosidade do revestimento. Como consequência, esse fator pode ser um limitante na utilização da mistura. Essa característica se dá pelo alto teor de vazios que o material apresenta, limitando a resistência de sua matriz. Portanto, a aplicação desse material é recomendada para regiões de tráfego leve (Jahn, 2016).

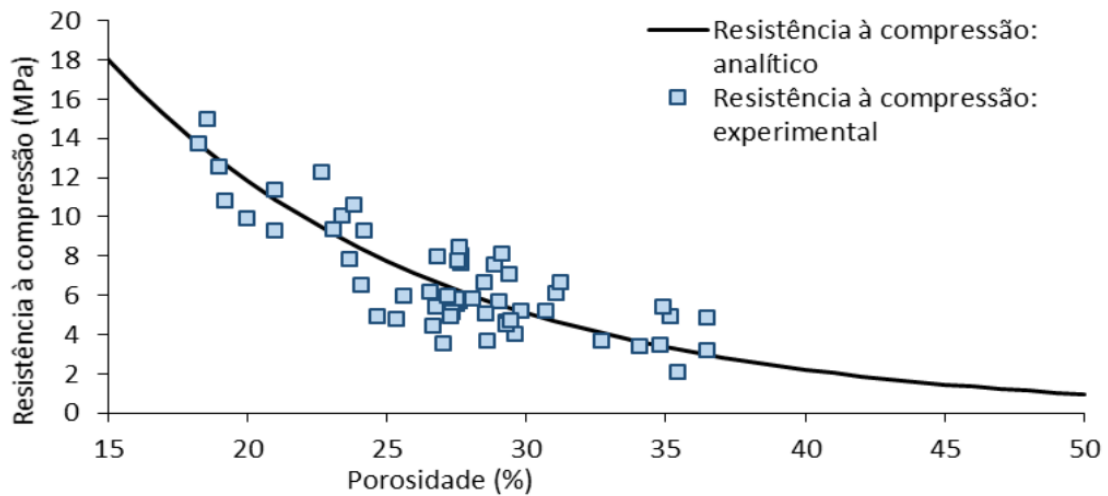
Visando a eficiência do material relacionada ao tráfego local e à espessura do revestimento, a NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece valores mínimos de resistência que os revestimentos de concreto permeável devem suportar. Desse modo, sabe-se que esses pavimentos devem resistir:

- I. Peças de concreto permeável: sua resistência à compressão deve apresentar módulo maior que 20 MPa.
- II. Placas de concreto permeável: a resistência à flexão deve ser maior ou igual a 2,0 MPa.
- III. Concreto permeável moldado no local: quando destinados ao tráfego de pedestres, devem resistir à tração na flexão a pelo menos 1,0 MPa e, quando o tráfego for leve, esse valor deve ser maior ou igual a 2 MPa.

A resistência à compressão do concreto permeável pode variar entre 3,5 e 28 MPa, sendo que os valores característicos para o material se encontram geralmente na faixa de 17 MPa (Tennis; Leming; Akers, 2004). Conforme as informações do relatório ACI 522-R (ACI, 2010), a resistência à flexão está diretamente relacionada à resistência à compressão, portanto, a porosidade também exerce uma influência significativa e inversamente proporcional, semelhante ao efeito observado na resistência à compressão. Geralmente, os valores obtidos para a resistência à flexão encontram-se entre 1,0 e 3,8 MPa, suprimindo a necessidade de grande parte das utilizações (Tennis; Leming; Akers, 2004).

As correlações podem ser exemplificadas com os estudos realizados por Filho *et al.* (2019), onde os resultados obtidos corroboram com o indicado pelo ACI de que existe uma tendência de redução da resistência à compressão conforme a porosidade aumenta, como indicado na Figura 5.

Figura 5 – Resultados das análises entre resistência mecânica e porosidade no estudo de Filho *et al.*



Fonte: Filho *et al.* (2019).

Buscando a confecção de um traço ideal, sabe-se que o controle da porosidade é um requisito determinante para adequar as propriedades do material, a fim de confeccionar um concreto que possua equilíbrio entre a resistência mecânica e a permeabilidade (Filho *et al.*, 2019). Desse modo, a padronização de métodos de dosagem se torna um fator importante no que diz respeito a aplicabilidade em larga escala desse tipo de material nos sistemas de drenagem.

2.4 DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL

Diversos estudos já propuseram métodos para a dosagem do concreto permeável. Uma abordagem de dosagem é por meio de modelos estatísticos para prever as propriedades do concreto. No entanto, cada pesquisa possui características específicas em relação às particularidades dos agregados, métodos de compactação e equipamentos utilizados, o que dificulta a padronização do procedimento de dosagem. Como alternativa, métodos baseados na previsão de porosidade permitem a relação das propriedades do concreto permeável com os parâmetros de dosagem. Dentre os métodos que empregam essa sistemática, destacam-se: método ACI, método de Nguyen *et al.* (2014) e o Método do Grau de Compactação (Mikami, 2022).

2.4.1 Método do *American Concrete Institute* (ACI)

O método proposto pelo *American Concrete Institute*, publicado na ACI 522R (ACI, 2010), se baseia na utilização das relações volumétricas dos componentes do concreto e visa obter uma mistura com uma porosidade ou massa específica predeterminada. Nessa dosagem é utilizado o método “ b/b_o ”, onde “ b ” refere-se ao volume dos agregados na mistura e “ b_o ” à compacidade desse volume de agregados. O método emprega ábacos para calcular o volume de pasta de cimento na mistura, com base em uma porosidade predefinida e no nível de compactação utilizado. O relatório possibilita a determinação da relação “ b/b_o ” por meio de valores tabelados, variando de acordo com a granulometria dos agregados e a porcentagem de agregados miúdos adotada.

Ao adotar a relação “ b/b_o ”, o volume de agregados é definido e, em seguida, através do ábaco fornecido, determina-se o volume da pasta de cimento. Isso, por sua vez, possibilita a definição do consumo de cimento e água na mistura. Tal metodologia não apresenta um método para a definição da relação água/cimento.

A metodologia do relatório ACI-522R (ACI, 2010) é restrita a faixas granulométricas específicas, sendo as classificações 8 e 67 da norma ASTM C33. Devido a essa limitação, juntamente com a ausência de uma metodologia para determinar a relação água/cimento, o método proposto no relatório em análise tem suas aplicações limitadas, sendo restrito a materiais que compartilhem características semelhantes às descritas no documento.

2.4.2 Método de Nguyen *et al.* (2014)

O método de dosagem do estudo de Nguyen *et al.* (2014) se baseia na espessura da camada da pasta de cimento que envolve o agregado, sendo que esse método propõe um procedimento de escolha da relação água/cimento para cada mistura.

Portanto, o método apresenta a utilização de um coeficiente “ k ”, onde se relacionam o tamanho de cada partícula e a espessura da camada da pasta que envolve os agregados. Com isso, o volume de agregado no concreto pode ser calculado utilizando esse coeficiente associado aos parâmetros “ a ”, que se refere à fração de partículas superiores a 80 μm , e ao parâmetro “ b ”, que se refere à quantidade de água retida no agregado.

Desse modo, os autores estabeleceram hipóteses relacionadas à consideração do agregado com o formato esférico à proporcionalidade entre a espessura da camada de pasta que reveste os agregados e suas dimensões, bem como à composição ideal da mistura. A satisfação dessa composição ocorre quando a pasta de cimento que recobre os agregados confere à estrutura do concreto a resistência mecânica adequada, permitindo simultaneamente a formação de vazios livres para a passagem de água.

Conforme mencionado pelos autores, o cálculo do volume de pasta de concreto pode ser realizado considerando o coeficiente "k" e a porosidade assumida no projeto. No método de dosagem em questão, a determinação da relação água/cimento baseia-se na escolha de um valor máximo no qual não ocorra o escoamento da pasta pelos poros do concreto. Isso é estabelecido por meio de um ensaio que envolve diferentes relações água/cimento, onde uma peneira preenchida com concreto permeável é vibrada por 15 segundos. Após esse período, avalia-se a ocorrência de escoamento de água através da peneira.

No entanto, os autores recomendam o emprego de um valor obtido por meio de testes experimentais conduzidos pelos próprios autores, sem a consideração ou estabelecimento de critérios para a seleção de diferentes valores do coeficiente, gerando uma certa limitação quanto a repetição do uso desse valor.

2.4.3 Método do Grau de Compactação - Mikami (2022)

O método proposto por Mikami (2022), intitulado como Método do Grau de Compactação, relaciona as propriedades dos materiais que constituem a mistura de concreto permeável, projetando-as com porosidade controlada. O grau de compactação é determinado através da relação entre o estado de compactação do agregado gráudo em uma mistura de concreto permeável e seu estado de compactação isolado, este último definido pela massa unitária compactada do agregado.

Esse método oferece a possibilidade de ajustar as proporções do traço com base no teor de agregado miúdo incorporado à mistura, considerado parte do volume da pasta, resultando na redução do consumo de cimento Portland. Ainda, o método permite a adaptação das misturas de concreto permeável aos agregados disponíveis no local, evitando a restrição de materiais.

Além disso, o método apresenta abordagens para determinar a relação água/cimento em misturas de concreto permeável. Isso é alcançado por meio de ajustes no teste de drenagem de pasta proposto por Nguyen *et al.* (2014), permitindo a definição de uma energia de compactação conhecida, controle da porosidade do material e inclui testes relacionados à otimização de misturas de concreto permeável, como procedimentos para a dosagem de aditivos superplastificantes. Sabe-se ainda que o método é voltado principalmente para a aplicação em laboratório ou na produção de elementos pré-moldados, como as placas de concreto e pavers.

Ao analisar os métodos existentes, entende-se que existe uma falta de informações quanto aos métodos voltados à aplicação desse material em campo. As pesquisas voltadas a esse assunto ainda são muito experimentais e em menor quantidade, o que torna a aplicação dessa técnica muito empírica.

2.5 ESTUDO DE CASO

O primeiro registro da aplicação do concreto permeável aconteceu no ano de 1852, época na qual o material era conhecido como “concreto sem finos”. O material foi amplamente utilizado na construção de residências no Reino Unido devido às boas propriedades térmicas que possuía (Martins Filho, 2019). No entanto, não há menções sobre esse material na literatura até 1923, quando, em Edimburgo (Escócia), foi estabelecido um padrão para a construção de 50 casas de dois pavimentos cada, essas construções utilizaram uma mistura composta exclusivamente por agregados com base de clínquer (Höltz, 2011).

Apesar de sua aplicação desde o período pós-guerra, somente nas últimas décadas, com a expansão das áreas urbanas, houve um esforço mais significativo para empregar esse material, destacando sua permeabilidade. Nesse contexto que estudos mais aprofundados começaram a ser desenvolvidos, revelando sua viabilidade econômica e sustentável (Schwetz *et al.*, 2015).

Além disso, a aplicação desse tipo de pavimento gerou grande interesse do ponto de vista econômico, visto que sua estrutura apresenta duas funções, sendo elas pavimento e sistema de drenagem. A longo prazo, a vantagem torna-se ainda mais evidente, visto que esse revestimento necessita de uma menor quantidade de reparos do que um pavimento asfáltico (Höltz, 2011).

Foi nos Estados Unidos, que o concreto permeável teve seu início na construção civil como uma alternativa para sanar as consequências das inundações urbanas. A partir desse ponto, essa técnica construtiva sustentável expandiu-se globalmente (Höltz, 2011). No entanto, o interesse pelo concreto permeável na América do Sul é mais recente, tema que acabou ganhando destaque apenas na última década. Ainda assim, a sua presença ainda é limitada no Brasil (Lamb, 2014).

Um exemplo recente de aplicação desse tipo de material, trata-se de um estudo realizado por Batezini *et al.* (2021), que efetuou a comparação entre a aplicação do concreto produzido em laboratório e sua eficiência quando comparado com a aplicação em campo.

Para a produção da mistura em questão, o agregado graúdo utilizado foi o granito com granulometria entre 4,75 e 12,5 mm. O cimento foi o CP III 40 RS, que contém 70% de escória de alto forno. A metodologia de produção da mistura seguiu o proposto por McCain e Dewoolkar (2010). Foram produzidos três traços utilizando diferentes granulometrias de agregado graúdo.

Em laboratório para a produção dos corpos de prova (CP), foram utilizados moldes cilíndricos (20 x 10 cm) e prismáticos (10 x 10 x 40 cm). Cada CP cilíndrico foi moldado, com três camadas compactadas com 15 golpes. Enquanto os CPs prismáticos foram divididos em 2 camadas com 25 golpes. Além disso, foi realizada vibração mecânica durante 10 segundos em ambos os casos. Os corpos de prova foram desmoldados com 7 dias e curados durante 28 dias.

Após desmoldados, foram realizados testes de controle de porosidade e densidade, de resistência à compressão e tração. Também foram realizados a resistência a flexão dos corpos de prova prismáticos. Os testes realizados seguiram os procedimentos propostos pela *American Society for Testing and Materials*.

Após a determinação da mistura partiu-se para a aplicação em campo, onde foi construída uma calçada experimental de 1,0 x 8,65 m para avaliar a taxa de infiltração inicial, bem como a bacia de deflexão da estrutura sob condições dinâmicas. Para a aplicação da mistura foi adicionado aditivo modificador de viscosidade, para controlar a trabalhabilidade do concreto fresco. A camada de base sob a qual foi aplicado o concreto permeável possuía 15 cm de espessura de agregado de construção reciclado. Nenhuma das camadas foi compactada, elas foram apenas niveladas no intuito de garantir maior permeabilidade ao sistema. A finalização da camada de concreto permeável recebeu a tensão de um rolo de aço. Ao final foi

utilizada uma cobertura impermeável, durante 7 dias, a fim de evitar a alta evaporação da água, auxiliando o processo de hidratação do cimento.

Os testes para análise das propriedades do concreto em campo, foram realizados em diversos locais ao longo da calçada. Para os testes de infiltração, seis pontos foram selecionados e o teste seguiu o que propõem a C1701/C1701M. Já no rebote das deflexões foram usados dois pontos usando o teste *Falling Weight Deflectometer* (FWD), seguindo o SPT 1375-EB (Khazanovich, 2000).

Após realizar os testes propostos, o estudo levou a entender que, em campo, o concreto consegue atingir os requisitos mínimos propostos em normas. Entretanto, há necessidade de maior atenção à manutenção e local de aplicação desse material, pois caso haja entupimento dos poros tende a gerar redução das propriedades hidráulicas esperadas. O estudo também realizou análise com relação à espessura das camadas, a fim de entender os tipos de veículos que poderiam utilizar o material. Com isso, questionaram a espessura mínima apontada pela NBR 16416 (ABNT, 2015), pois ao realizarem os testes notaram que 10 cm de espessura do concreto permeável para tráfego leve é muito pouco, e tende a gerar falhas e redução na resistência.

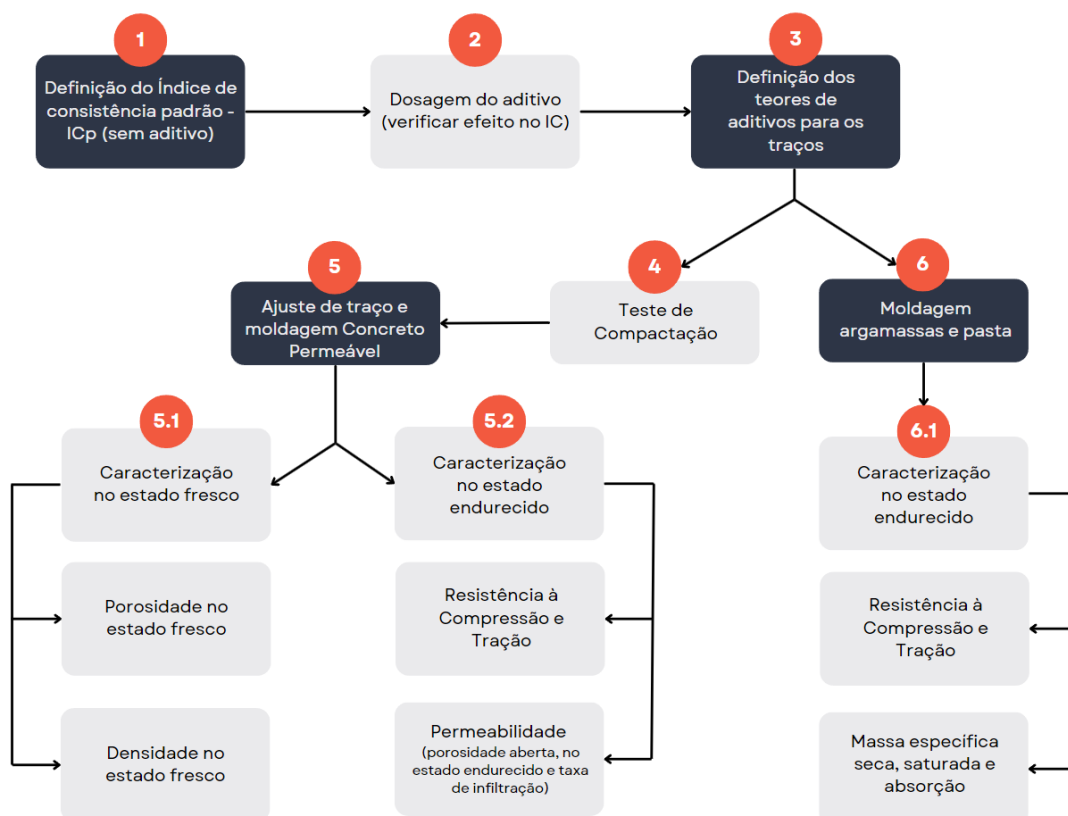
Além disso, os autores ressaltaram a importância de analisar o desgaste por fadiga do pavimento, pois sua estrutura porosa torna essa algo crítico. Desse modo, entender como lidar com a relação entre porosidade e fadiga tendem a ser a chave para dosagens e projetos de concreto permeável (Batezini *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

O objetivo do presente estudo foi desenvolver dosagens de concreto permeável, utilizando o aditivo plastificante polifuncional e o aditivo modificador de viscosidade, a fim de verificar o seu efeito nas propriedades do concreto permeável. A proposta abordada nessa metodologia avaliou o comportamento do concreto permeável quanto à adição de diferentes teores de cada aditivo. Para isso, realizou-se uma mistura de referência de concreto permeável, que serviu como base para todas as análises realizadas, sendo que os demais teores e traços foram produzidos a partir da mistura padrão. Para caracterizar os concretos, foram realizados testes experimentais a fim de avaliar a eficiência dos aditivos quando analisados o desempenho hidráulico, resistência mecânica e taxa de permeabilidade. A execução de um traço de referência serviu como um critério de avaliação, permitindo a criação de um parâmetro de comparação entre as propriedades obtidas com os aditivos e sem eles.

Na Figura 6 podem ser verificadas as etapas realizadas para o desenvolvimento do estudo em questão.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: A autora.

A definição da dosagem para todos os traços executados foi baseada no método experimental do Grau de Compactação, proposto por Mikami (2022). A fim de padronizar as misturas e permitir sua comparação direta, a energia de compactação possui valor fixo, sendo dividida em duas camadas de 15 golpes, enquanto a porosidade de projeto foi adotada como 22,5%.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Agregados

A confecção das amostras de concreto permeável contou com a utilização dos materiais fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Para os agregados graúdos, foi utilizada a brita 0, que pode ser chamada de pedrisco (com DMC de 6,3 mm), e como agregado miúdo a areia natural quartzosa proveniente de leito de rio. Ambos os agregados foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas, seguindo as normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo e graúdo

Ensaio	Agregado	Normativa
Densidade	Miúdo e Graúdo	NBR 9776 (ABNT, 2003) e NBR 16917 (ABNT, 2021)
Granulometria	Miúdo e Graúdo	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa Unitária	Miúdo e Graúdo	NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: A autora, 2024.

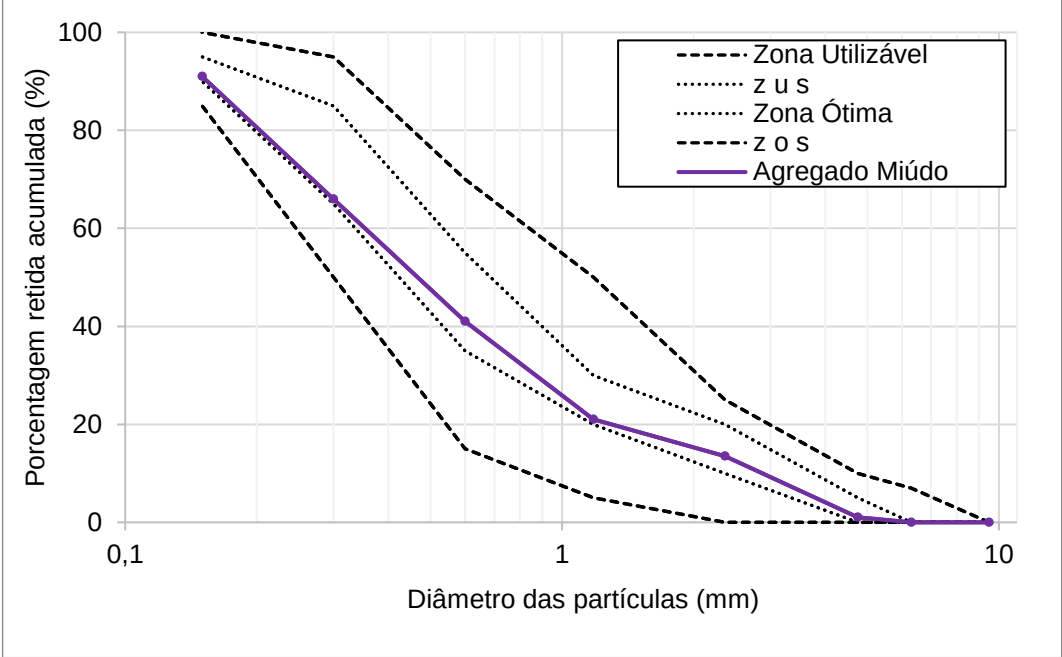
Os resultados obtidos para a caracterização do agregado miúdo no que se refere à densidade, granulometria e massa unitária, estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo

Densidade (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)	
	Estado Solto	Estado Compactado
2,08	1,47	1,42

Fonte: A autora, 2024.

Figura 7 - Granulometria do agregado miúdo



Fonte: A autora.

As caracterizações do agregado graúdo resultaram nos valores descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo

Densidade (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)	
	Estado Solto	Estado Compactado
2,86	1,53	1,67

Fonte: A autora, 2024.

3.1.2 Aglomerante

O aglomerante utilizado na mistura foi o cimento CP II-F-32, da CAUÊ. Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), este material é definido como um cimento Portland que possui adição de fíler calcário, com teor entre 6 e 10%, possuindo resistência característica de 32 MPa aos 28 dias.

3.1.3 Aditivos

Para realizar as dosagens das misturas, foram utilizados dois aditivos, sendo um deles o aditivo modificador de viscosidade, Centrament Stabi 520, da MC-Bauchemie, e o aditivo Plastificante Polifuncional, ADI-POLI MR-10, da ADITIBRAS. As características dos respectivos aditivos podem ser encontradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características Aditivos

Aditivo	Densidade (kg/L)	Dosagem Recomendada
Modificador de Viscosidade	1,00	$\geq 0,2\% \leq 1,5$
Plastificante Polifuncional	-	$0,3\% \leq 1\%$

Fonte: A autora, 2024.

A escolha dos aditivos foi baseada nas propriedades que cada um deles oferece, visando otimizar a mistura de concreto permeável. O aditivo plastificante polifuncional foi selecionado por sua capacidade de reduzir a tensão superficial da água, o que resulta em maior plasticidade na mistura. Tal característica diminui a quantidade de água de amassamento necessária, reduzindo, consequentemente, a relação água/cimento. Entretanto, esse aumento na resistência pode comprometer a permeabilidade, que trata-se de uma característica fundamental do concreto permeável. Desse modo, foram avaliadas dosagens com o objetivo de equilibrar o aumento de resistência sem prejudicar as propriedades hidráulicas da mistura.

O aditivo modificador de viscosidade, por sua vez, foi escolhido pois atua como retentor de água, contribuindo para a manutenção da consistência da mistura ao longo do tempo. Tal característica é de extrema importância, pois as misturas de concreto permeável são mais secas, tendendo a perder água mais rapidamente durante sua aplicação. A utilização desse aditivo ajuda a minimizar a segregação dos materiais e a exsudação, resultando em uma mistura mais homogênea. Isso aumenta a qualidade e uniformidade do concreto, sem comprometer suas propriedades essenciais, como a permeabilidade.

3.2 MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

As misturas de concreto permeável foram produzidas seguindo a sequência de mistura sugerida pela ASTM C192 (ASTM, 2019), sendo realizada com o auxílio de uma betoneira. Primeiramente, o agregado graúdo foi misturado com metade da água. Em seguida, adicionou-se o cimento e então a contagem do tempo foi iniciada, realizando a mistura durante 3 minutos. Durante esse período, sem interromper a betoneira, foi adicionada a areia e o restante da água. Após o término, a mistura permaneceu em repouso por 3 minutos, durante os quais as laterais da betoneira foram raspadas. Posteriormente, a mistura foi retomada por mais 2 minutos.

A moldagem foi realizada em moldes cilíndricos metálicos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Na compactação utilizou-se um soquete Proctor padrão.

As amostras foram compactadas com energia de compactação fixa, sendo dividida em duas camadas, aplicando-se 15 golpes por camada.

Após o preenchimento do molde, manteve-se uma camada de concreto que excedia, em torno de 3 mm, o nível superior do molde, conforme recomenda a ASTM C1688M (ASTM, 2014a). Tal superfície foi regularizada por meio de impactos, com o auxílio de uma placa metálica, evitando a remoção da pasta de cimento dos agregados superficiais. A fim de possibilitar a reprodutibilidade do parâmetro de projeto, a moldagem dos corpos de prova foi controlada através da massa de concreto permeável no estado fresco, valor obtido pela massa específica no estado fresco.

Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a realização da mistura. Como a cura deve ser feita em ambiente úmido, as amostras foram previamente imersas em um tanque de água e em seguida foram armazenadas em sacos plásticos, que possuíam um recipiente com certa quantidade de água, evitando assim o contato com o ar e a consequente perda de umidade. Esta condição é ideal, pois se assemelha ao procedimento utilizado para pavimentos moldados *in loco*. Os sacos foram vedados e as amostras permaneceram em cura úmida por um período de 28 dias, após o qual foram realizadas as caracterizações necessárias.

As caracterizações do concreto permeável foram realizadas no seu estado fresco e no estado endurecido. Os ensaios realizados encontram-se especificados na Tabela 5. Ao todo, foram produzidos 12 corpos de prova para cada teor de aditivo pré-determinado, totalizando 60 corpos de prova de concreto permeável. Para cada traço de concreto foram destinados 4 CPs para ensaio de tração, 4 ao ensaio de compressão e 4 para realização dos demais ensaios.

Tabela 5 - Ensaios de caracterização de corpos de prova de concreto permeável

Estado	Ensaio	Normativa
Fresco	Porosidade	ASTM C1688M (2014a)
	Densidade	
Endurecido	Resistência a Compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)
	Resistencia a Tração Indireta	NBR 7222 (ABNT, 2011)
	Porosidade no estado endurecido	ASTM C1754M (2012b)
	Porosidade aberta	Adaptado de Deo e Neithalath (2010)
	Taxa de Infiltração	Método ISO 17785-1

Fonte: A autora, 2024

3.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO PILOTO

O traço inicial de concreto permeável foi definido através do método do Grau de Compactação, proposto por Mikami (2022). A porosidade foi fixada no valor de 22,5%, além de se adotar uma relação água/cimento constante. Optou-se pela utilização de agregado miúdo já no traço piloto, uma vez que promove uma melhor eficiência da mistura em termos de eficiência no consumo de cimento. Com base no estudo de Skovronski e Carneiro (2023), adotou-se uma relação em massa agregado miúdo/cimento de 0,5 para promover redução de consumo de cimento com menor impacto na resistência mecânica. Os parâmetros utilizados estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Descrições dos Parâmetros do Método do Grau de Compactação

Parâmetro	Unidade	Descrição
a/c	-	Relação em massa água/cimento
C _{cim}	g/cm ³	Consumo de cimento por volume unitário de concreto
C _{agg}	g/cm ³	Consumo de agregado graúdo por volume unitário de concreto
d _{agg}	g/cm ³	Massa específica do agregado graúdo
d _{cim}	g/cm ³	Massa específica do cimento
G _c	-	Grau de compactação do agregado graúdo
m/c	-	Relação em massa agregado miúdo/cimento
g/c	-	Relação agregado graúdo/cimento
MU _c	g/cm ³	Massa unitária do agregado graúdo no estado compactado
P _d	%	Porosidade intergranular de projeto
V _p	%	Volume de pasta de cimento de projeto
V _{p,t}	%	Volume de pasta de cimento teórico
V _v	%	Volume de vazios do agregado graúdo no estado compactado
V _{v,est}	%	Volume de vazios efetivo do agregado graúdo
$\rho_{f,est}$	g/cm ³	Massa específica estimada no estado fresco
ρ_f	g/cm ³	Massa específica aparente
d _t	g/cm ³	Densidade teórica
P _f	%	Porosidade de Projeto

Fonte: Adaptado de Mikami, 2022.

3.3.1 Definição da relação água/cimento

A relação água/cimento foi definida a partir da realização do Teste de Drenagem de Pasta (adaptado de Nguyen *et al.* 2014), o qual se baseia na consistência ideal da pasta de cimento, onde essa promove cobertura completa e homogênea dos agregados sem que ocorra o escoamento pelos poros.

Para realizar o teste, é necessária a adoção de valores iniciais de relação água/cimento e de relação agregado graúdo/cimento. Os valores usuais partem,

respectivamente, de 0,28 e 4,0 (Nguyen *et al.*, 2014). Depois deve ser realizada uma mistura suficiente para preencher uma peneira de ensaio de agregados, com abertura de 1,18 mm. Com a peneira preenchida, deve-se realizar vibração mecânica durante 15 segundos.

O teste consiste em inspecionar o fundo da peneira, avaliando se há ou não a ocorrência de escoamento da pasta de cimento. Em caso do não escoamento, é necessário realizar o incremento de 0,02 na relação água/cimento, repetindo o teste até encontrar o teor onde ocorra escoamento. Por fim, a definição da relação água/cimento adequada, é definida como o maior valor no qual não houve escoamento significativo da pasta de cimento no fundo da peneira.

No presente trabalho, adotou-se valores iniciais de relação agregado miúdo/cimento de 0,5 e relação água/cimento de 0,30, realizando o incremento de 0,02 na relação em caso de não ocorrência de escoamento significativo da pasta de cimento. Para a confecção do concreto permeável foram utilizados 2.500 g de pedrisco e 500 g de cimento Portland, quantidade suficiente para preencher uma peneira de 1,18 mm, utilizada em ensaio de agregados regulamentado pela NBR 17054 (ABNT, 2022). Com o preenchimento da peneira, a mistura foi submetida a vibração mecânica por 15 segundos.

3.3.2 Definição do traço e teste de compactação

Após finalizado o teste de drenagem da pasta e encontrada a relação água/cimento ideal, foi realizada a definição do traço piloto e posterior teste de compactação da mistura, para encontrar o grau de compactação efetivo, bem como a validação do traço.

Primeiramente, deve-se adotar um grau de compactação do agregado graúdo inicial ($G_{c,i}$), e com os dados de caracterização do agregado graúdo, determinar o $V_{v,ef}$ através da Equação 1. Posteriormente, deverá determinar uma porosidade de projeto P_d e calcular o volume de pasta necessário através da Equação 2. No presente estudo, o grau de compactação inicial ($G_{c,i}$) foi estabelecido em 0,94, valor que se encontra na faixa usual de 0,90 a 0,97.

$$V_{v,ef} = \frac{d_{agg} - MU_c \cdot G_{c,i}}{d_{agg}}$$

Equação 1

$$V_p = V_{v,ef} - P_d \quad \text{Equação 2}$$

Após a caracterização dos materiais, relação água/cimento e $G_{c,i}$ definidos, os valores deverão ser utilizados para calcular o consumo de cimento e agregado graúdo da mistura através das Equação 3 e Equação 4.

$$C_{cim} = \frac{V_p/100}{1/d_{cim} + a/c + (m/c)/d_{agm}} \quad \text{Equação 3}$$

$$C_{agg} = G_c \cdot MU_c \quad \text{Equação 4}$$

Por fim, para determinar o traço piloto, deverá ser calculada a relação agregado graúdo/cimento pela Equação 5, enquanto a massa específica do concreto será calculada através da Equação 6.

$$g/c = C_{agg}/C_{cim} \quad \text{Equação 5}$$

$$\rho_{f,est} = \left(1 + \frac{1}{g/c} + \frac{a/c}{g/c} + \frac{m/c}{g/c}\right) \cdot MU_c \cdot G_c \quad \text{Equação 6}$$

Para o teste de compactação, no trabalho em questão, para realizar a confecção de um corpo de prova de concreto permeável, foram utilizados 6 kg de pedrisco. Posteriormente, mediu-se a massa do molde vazio a ser utilizado, e então esse foi preenchido com a mistura de maneira uniforme. Em seguida, foi medida a massa do molde preenchido com concreto e assim se definiu a massa específica aparente no estado fresco, pela Equação 7.

$$\rho_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad \text{Equação 7}$$

Posteriormente, deve ser calculada a densidade teórica do concreto, com base na ASTM C1688M (ASTM,2014), conforme a Equação 8. Com a densidade e massa específica aparente definida, calcula-se a porosidade do concreto no estado fresco, bem como o consumo real de cimento e agregado graúdo, através das equações 9, 10 e 11.

$$d_t = \frac{M}{V} \quad \text{Equação 8}$$

$$P_f = \frac{d_t - \rho_f}{d_t} \quad \text{Equação 9}$$

$$C_{cim,r} = \frac{\rho_f}{1 + g/c + a/c + m/c} \quad \text{Equação 10}$$

$$C_{agg,r} = C_{cim,r} \cdot g/c \quad \text{Equação 11}$$

Com os valores devidamente calculados, pode-se por fim definir o grau de compactação efetivo da mistura, através da Equação 12.

$$G_{c,ef} = \frac{C_{agg,r}}{MU_c} \quad \text{Equação 12}$$

No final do teste, é necessário verificar se a massa específica aparente e a porosidade no estado fresco, são próximas aos valores estimados. Caso aconteça uma diferença significativa na porosidade de projeto, deve-se adotar o grau de compactação efetivo para correção do traço de concreto permeável uma vez que, o grau de compactação inicial ($G_{c,i}$), nesse caso, não pertence ao valor real da mistura em relação ao agregado e método de compactação empregados.

Com os valores devidamente calculados, após a realização mistura do traço foi necessário calcular o consumo real de cimento e agregado gráudo dos traços executados, para isso foram utilizadas as massas específicas médias das misturas e em seguida realizados os cálculos conforme equações 10 e 11.

Após calcular o consumo parte-se para o cálculo da intensidade de consumo de cimento (I_c) representa a quantidade de cimento utilizada em cada traço para alcançar 1 MPa de resistência, permitindo identificar o traço mais eficiente por meio desse indicador, sendo o menor valor de I_c o mais eficiente. A intensidade de consumo de cimento é determinada pela Equação 15, que relaciona o consumo de cimento de uma determinada mistura com o valor correspondente de sua resistência mecânica.

$$I_c = \frac{C_{cim}}{f_c} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo:

C_{cim} – consumo real de cimento

F_c – resistência à compressão

3.4 DOSAGEM DOS ADITIVOS

A dosagem do aditivo se baseou na metodologia proposta por Mikami (2022). Segundo o autor, o procedimento de dosagem de aditivo deve considerar algumas premissas, como a determinação de um índice de consistência padrão (ICp) da argamassa. Esse índice deverá ser definido através do traço piloto determinado anteriormente, o qual promoverá o recobrimento adequado dos grãos. Para isso, igualou-se o índice de consistência do traço piloto com os traços contendo aditivos, ajustando-se a relação água/cimento.

Para a determinação do índice de consistência padrão (ICp), foi utilizado o traço de argamassa de 1: 0,5 e relação a/c obtida no teste de drenagem de pasta. Para a confecção da pasta, foi utilizado 1.000 g de cimento. Com isso, foi realizada a mistura mecânica dos componentes da seguinte maneira:

- a) Adicionar água e cimento Portland na cuba do misturador mecânico e realizar mistura lenta por 60 segundos, sendo que nos 30 segundos finais foi adicionado o agregado miúdo a mistura;
- b) Em seguida, foi realizada mistura rápida durante 30 segundos;
- c) O misturador mecânico foi desligado por 90 segundos, as laterais da cuba foram raspadas durante os 30 segundos iniciais, e no restante do tempo a mistura permaneceu em descanso;
- d) Por fim, realizou-se a mistura mecânica novamente, por mais 60 segundos, em velocidade rápida.

Para os traços com aditivo, este foi considerado como parte da relação água/cimento, sendo previamente misturado com a água para realizar a mistura. Após as etapas descritas, foi realizado o ensaio de abatimento de um molde troncocônico, na mesa de medição para índice de consistência, seguindo a NBR 7215 (ABNT, 2019). O índice de consistência foi considerado como a média dos diâmetros obtidos da base do tronco após o abatimento.

Com o índice de consistência padrão definido, e a fim de definir os teores ótimos do aditivo plastificante polifuncional e do aditivo modificador de viscosidade, foram realizados diferentes testes variando, com tentativas experimentais, o percentual de cada aditivo incorporado à mistura, bem como a relação água/cimento. Para o aditivo plastificante polifuncional, empregou-se inicialmente os teores de 0,1%,

0,3 e 0,5%, valores escolhidos com base no recomendado pelo fabricante, e no caso do 0,1% devido a sugestão de aplicação de demais empresas. Enquanto para o aditivo modificador de viscosidade foram testados os teores de 0,3% e 0,5%, sendo os teores definidos por recomendação do fabricante e após realizar a leitura de trabalhos que utilizavam valores dentro dessa faixa. Para cada percentual de aditivo incorporado, foi realizado o ensaio de abatimento de um corpo de prova troncocônico, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), da mesma maneira que foi executado para a definição do IC_p, determinando-se assim o índice de consistência (IC) de cada adição. Por fim, os teores ótimos de aditivo foram aqueles cujo valor do índice de consistência (IC) coincidir com o IC_p ± 5 mm.

Para avaliar o efeito do aditivo na matriz cimentícia e correlacionar com possíveis alterações físicas e mecânicas do concreto permeável, foram feitas caracterizações da argamassa constituinte do traço de concreto permeável. Para isso, foram moldados 4 corpos de prova cilindros (5 x 10 cm), de cada um dos traços, seguindo o método proposto pela NBR 7215 (ABNT, 2019), totalizando 20 CPs de argamassa. Desses corpos de prova 2 foram rompidos à compressão e os outros passaram pelos ensaios de massa específica e absorção, para então serem rompidos à tração por compressão.

Com o objetivo de avaliar a influência dos aditivos exclusivamente na pasta de concreto, foram realizados ensaios utilizando pasta pura. Para isso, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 2 cm de diâmetro por 4 cm de altura, utilizando tubos de PVC como fôrmas fixadas em bases de madeira.

A mistura foi preparada manualmente, e, nos traços que continham aditivos, estes foram considerados parte da água de amassamento, sendo misturados previamente. Como a mistura possui uma consistência maior, devido à menor relação água/cimento, para garantir o adensamento adequado e remover bolhas de ar, as fôrmas foram submetidas a leves batidas sobre uma superfície lisa, assegurando uma compactação eficiente das pastas. No total, foram produzidas 13 amostras para cada um dos traços. Destas, 5 amostras foram destinadas ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, outras 5 para o ensaio de resistência à tração também aos 28 dias, para o rompimento das amostras, utilizou-se de uma prensa da marca SOLOCAP, Modelo CI, de 100 toneladas força de capacidade, e as 3 amostras restantes foram utilizadas para análise de massa específica e absorção, seguindo método proposto na NBR 9778 (ABNT, 2005).

3.5 DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL

Após as definições de índice de consistência e teores de aditivos, com os testes realizados na argamassa, foi realizado novamente o teste de compactação, com base no método descrito no item 3.3.

A incorporação de aditivo na mistura pode gerar pelo menos duas situações: i) afetar o grau de compactação; ii) facilitar o adensamento. Portanto, considerando estas possibilidades, o teste de compactação deve ser refeito para avaliar se a relação água/cimento estipulada previamente ainda mantém a mistura satisfatória e detectar possíveis alterações do grau de compactação.

Caso haja necessidade, o traço deve ser ajustado, sempre mantendo a porosidade fixa de 22,5%, conforme estabelecido anteriormente. Após a correção do traço, foram moldados corpos de prova com o traço referência, com o aditivo modificador de viscosidade e com o aditivo plastificante polifuncional. Para as misturas utilizando aditivos, foram executados dois traços distintos, para avaliar, posteriormente, qual apresentou melhor desempenho e características.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

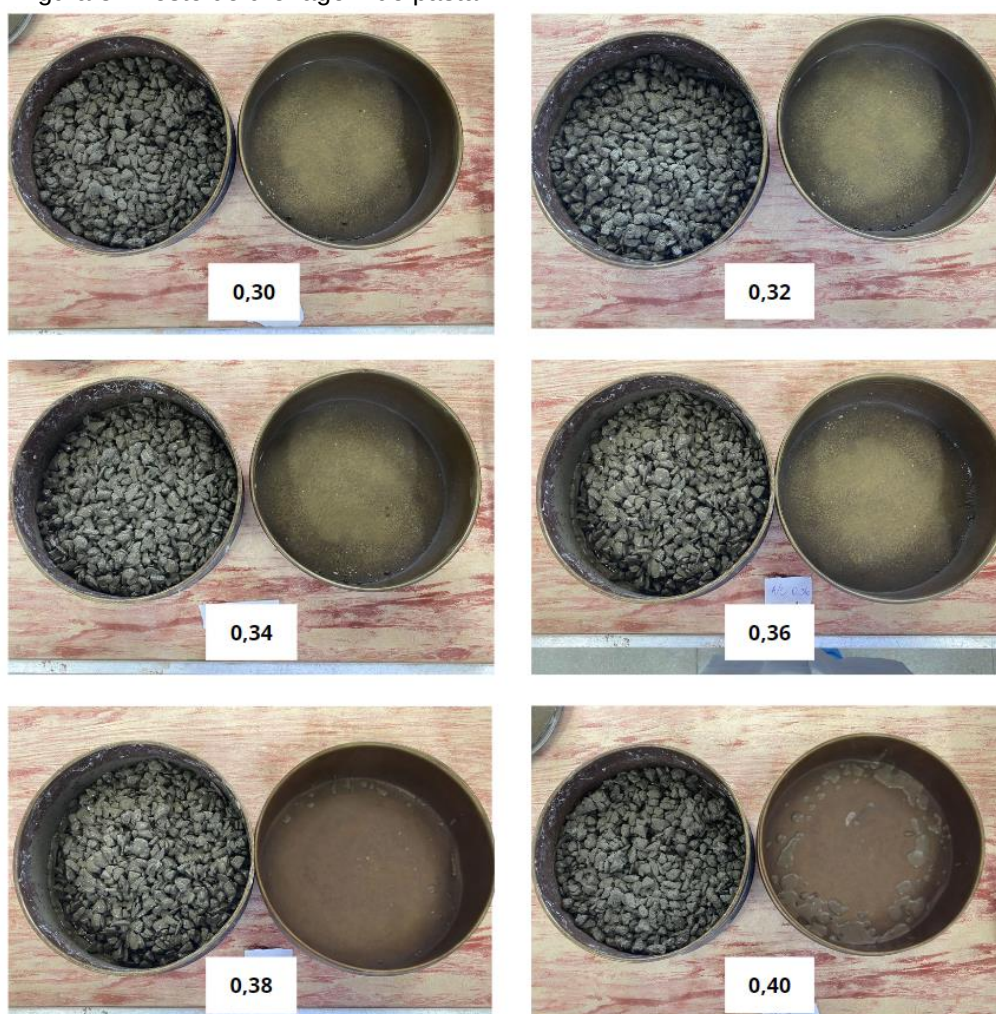
4.1 TRAÇO REFERÊNCIA

Conforme explicado na metodologia, para iniciar a dosagem do concreto permeável, utilizou-se o método do Grau de Compactação proposto por Mikami (2022), para definir o traço referência. Desse modo, os traços foram definidos mantendo a porosidade fixa em 22,5%, além da relação água/cimento constante.

4.1.1 Definição da relação água/cimento

Inicialmente, com a relação água/cimento de 0,30, não houve escoamento da pasta de cimento. Incrementos de 0,02 foram feitos até atingir a relação de 0,40, onde foi observado escoamento significativo. A relação água/cimento de 0,38 foi identificada como a que proporcionou a melhor consistência da pasta, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Teste de drenagem de pasta



Fonte: A autora.

4.1.2 Definição do traço piloto e teste de compactação

Após a realização do teste de drenagem da pasta de cimento e a definição da relação água/cimento ideal, procedeu-se à determinação do traço piloto do concreto permeável, seguida do teste de compactação da mistura, que visam estabelecer o grau de compactação efetivo ou validar o traço proposto.

Visto que se considerou uma porosidade de projeto (P_d) de 22,5%, os dados de entrada do método e o traço piloto obtido a partir das equações anteriormente explicitadas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de entrada e traço de referência

Parâmetro		Resultado
Grau de Compactação Inicial	$G_{c,i}$	0,9378
Relação água/cimento	a/c	0,38
Volume de vazios efetivos (%)	$V_{v,ef}$	48,54
Porosidade de Projeto (%)	P_p	22,5
Volume de pasta (%)	V_p	26,04
Relação Agregado miúdo/cimento	m/c	0,5
Consumo de Cimento	C_{cim}	291,2
Consumo de agregado graúdo (kg/m^3)	C_{agg}	1547,4
Relação agregado graúdo/cimento	g/c	5,31
Traço em massa	-	1: 0,5: 5,31
Massa Específica estimada (g/cm^3)	$\rho_{f,est}$	1,951

Fonte: A autora, 2024.

Os resultados do teste de compactação estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Teste de compactação para traço de referência

Parâmetro		Resultado
Densidade teórica (g/cm^3)	d_t	2,703
Massa específica medida (g/cm^3)	ρ_f	2,091
Porosidade no estado fresco (%)	P_f	22,64
Consumo de cimento real (kg/m^3)	$C_{cim,r}$	290,7
Consumo de agregado graúdo real (kg/m^3)	$C_{agg,r}$	1544,5
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,9361
Traço final	-	1: 0,5: 5,28: 0,38

Fonte: A autora, 2024.

Com base nos resultados, é possível perceber que o grau de compactação efetivo e a porosidade no estado fresco apresentam grande proximidade com os valores iniciais, indicando que a compacidade da mistura atendeu o esperado. Desse modo, a dosagem final do traço de referência pode ser identificada na Tabela 9.

Tabela 9 - Dosagem Final Traço Referência

Parâmetro		Resultado
Volume de Vazios Efetivo (%)	$V_{v,ef}$	48,64
Volume de Pasta (%)	$V_{v,ef}$	26,14
Consumo de Cimento (kg/m^3)	C_{cim}	292,3
Consumo de Agregado Graúdo (kg/m^3)	C_{agg}	1544,5
Consumo de Areia (kg/m^3)	C_{agm}	146,2
Relação Agregado Graúdo/Cimento	g/c	5,28
Densidade Teórica (g/cm^3)	d_t	2,702
Massa Específica Estimada (g/cm^3)	$\rho_{f,est}$	2,094
Traço final	-	1: 0,5: 5,28: 0,38

Fonte: A autora, 2024.

4.1.3 Caracterização das peças de concreto permeável do traço referência

As peças de concreto permeável produzidas a partir do traço referência definido, foram testadas quanto à porosidade e densidade no estado fresco, resistência à compressão e tração, aos 28 dias, e permeabilidade (porosidade no estado endurecido, porosidade aberta e taxa de infiltração).

Conforme demonstrado na Tabela 10, as porosidades no estado fresco se mantiveram constantes, indicando êxito quanto ao uso do Método do Grau de Compactação proposto por Mikami (2022). Os valores de porosidade ficaram próximos ao valor de porosidade de projeto de 22,5%, sofrendo uma variação de aproximadamente $\pm 0,5\%$.

Os valores de resistência à compressão e tração, usualmente possuem valores inferiores aos do concreto convencional, variando entre 3,5 e 28 MPa, e 1,0 e 3,8 MPa, respectivamente (Tennis; Leming; Akers, 2004). Desse modo, os resultados obtidos se enquadram dentro da faixa esperada.

Tabela 10 - Ensaio do concreto permeável no estado fresco de rompimentos

	Porosidade no Estado Fresco (%)	Densidade Estado Fresco (g/cm^3)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
Média	23,09	2,079	11,41	2,39
D.P.	$\pm 0,987$	$\pm 0,027$	$\pm 1,527$	$\pm 0,488$

Fonte: A autora, 2024.

Conforme demonstra a Tabela 11, no estado endurecido é possível perceber que os resultados de porosidade são superiores a 22,5%, que era a porosidade de projeto. Segundo Mikami (2022), isso se dá pelo surgimento de poros na pasta de cimento, os quais são responsáveis pelo aumento da porosidade.

A densidade no estado endurecido varia, usualmente, entre 1,90 g/cm³ e 2,10 g/cm³ (Tennis; Leming; Akers, 2004), e esses resultados dependem da composição e grau de compactação da mistura. Os valores obtidos se enquadram nessa variação.

A porosidade aberta tem relação direta com a capacidade de infiltração do concreto permeável. Portanto, quanto maior a porosidade aberta, melhor a taxa de infiltração. Entretanto, dependendo dos valores, a maior porosidade pode ocasionar em uma menor resistência mecânica do material. Os valores obtidos demonstram que a porosidade e taxa de infiltração estão dentro do exigido (ABNT, 2015). A Tabela 11 apresenta os resultados detalhados dos ensaios de permeabilidade.

Tabela 11 - Ensaios de Permeabilidade do Concreto Permeável

ID CP	Densidade no Estado Endurecido (g/cm ³)	Porosidade Estado Endurecido (%)	Porosidade Aberta (%)	Taxa de Infiltração (cm/s)
Média	2,004	27,96	15,50	0,589
D.P.	0,006	0,204	1,753	0,085

Fonte: A autora, 2024.

Com esses resultados, definiu-se os padrões mínimos que os traços que foram realizados com aditivos precisavam atender.

4.1.4 Determinação do índice de consistência padrão (ICp)

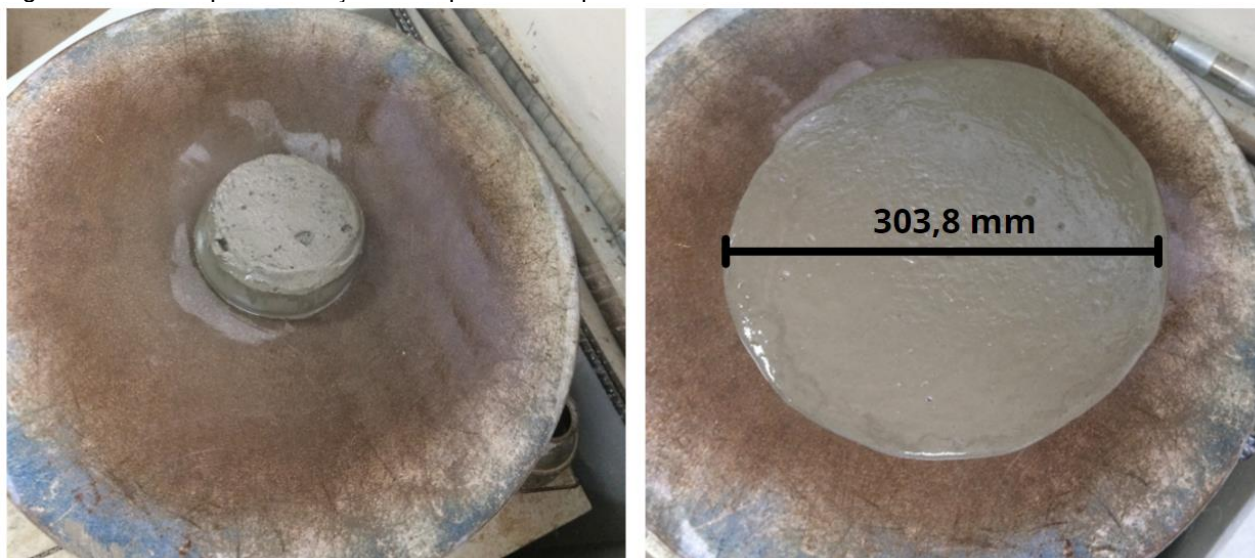
As etapas subsequentes do trabalho em questão envolveram a dosagem de aditivos, visando compreender as melhorias que essas adições proporcionaram nas propriedades do concreto permeável. A fim de possibilitar a dosagem adequada dos aditivos, torna-se crucial seguir algumas premissas básicas propostas por Mikami (2022). A principal delas é a possibilidade de manter constante a reologia da pasta de cimento mediante o uso de aditivos, desde que haja um controle rigoroso do índice de consistência da pasta. Com isso, torna-se de extrema importância definir o índice de consistência padrão (ICp) do traço referência.

Para realizar o índice de consistência padrão da pasta de cimento, foi considerado o valor referente à uma pasta de cimento produzida com a relação a/c obtida no teste de drenagem da pasta, no estudo em questão de 0,38.

A mistura seguiu o procedimento descrito no item 3.4. Após a realização das etapas mencionadas, foi realizado o ensaio de abatimento utilizando um molde troncocônico, com o auxílio de uma mesa para índice de consistência, conforme descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019). O valor foi determinado pelo diâmetro médio da

base do tronco de cone após o abatimento, conforme demonstrado na Figura 9. Desse modo, o valor obtido para o índice de consistência padrão (ICp) foi de 303,8 mm ($\pm 10,97$).

Figura 9 - Ensaio para definição do ICp antes e após o abatimento



Fonte: A autora.

Para o aditivo plastificante polifuncional inicialmente testou-se o teor de 0,3%, ao encontrar a relação água/cimento ótima, para esse caso de 0,33. Foi testado também a relação 0,1%, onde obteve-se relação água/cimento de 0,35. Com esses valores definidos, testou-se o teor de 0,5%, em uma tentativa de extrapolar a dosagem. Entretanto, com esse valor não foi possível encontrar uma relação água/cimento que enquadrasse a mistura dentro do parâmetro pré-definido, pois foram testadas relação água/cimento até 0,40 e ainda assim o IC não se aproximou do desejado. Com isso, descartou-se o valor de 0,5% para esse aditivo, pois sua aplicação em excesso não seria interessante.

O aditivo modificador de viscosidade foi testado em sequência. A fim de obter um teor de comparação com o polifuncional, adotou-se o inicialmente o valor de 0,3%, para o qual obteve-se uma relação água/cimento de 0,37. Para o teor de 0,5%, obteve-se uma relação água/cimento de 0,35. Para esse aditivo optou-se por manter o máximo em 0,5%, já que é o teor citado em alguns trabalhos (Evaristo, W. F. De O.; Almeida, V. L. De; Capuzzo, V. M. S, 2021).

As definições de percentual de aditivo, bem como relação água/cimento, podem ser conferidas na Tabela 12.

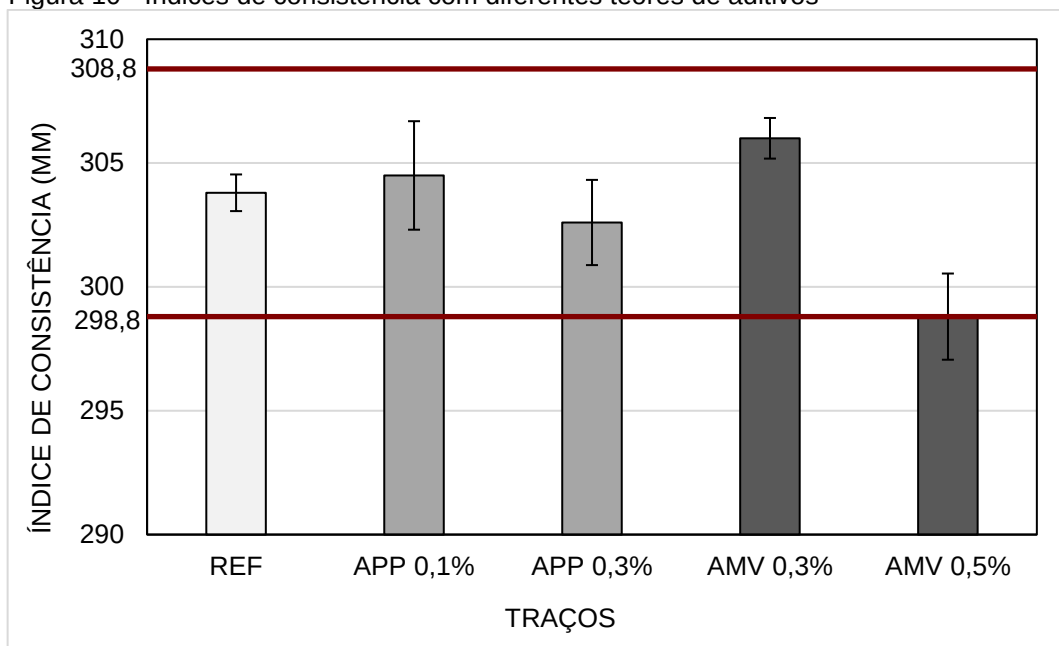
Tabela 12 - Resultados do ensaio para ajuste de consistência da pasta

Aditivo	%	a/c	IC (mm)	Diferença para ICp (mm)
Ref	-	0,38	303,8	0,00
APP	0,1	0,35	304,5	0,72
APP	0,3	0,33	302,6	1,21
AMV	0,3	0,37	305,9	2,99
AMV	0,5	0,35	298,9	4,15

Fonte: A autora, 2024.

As variações de índice de consistência podem ser observadas na Figura 10.

Figura 10 - Índices de consistência com diferentes teores de aditivos



Fonte: A autora

4.1.5 Determinação dos traços de concreto permeável

Os traços finais para confecção das peças de concreto permeável foram definidos pelo grau de compactação efetivo, calculado através do teste de compactação. Com base no método proposto inicialmente, foram definidos o traço referência sem aditivos, e mais quatro traços com aditivos, sendo dois com o plastificante polifuncional (APP), com teores de 0,1% e 0,3%, e outros dois com o modificador de viscosidade (AMV), com 0,3% e 0,5%.

Os traços partiram de um grau de compactação inicial de 0,9378, e relação água/cimento seguindo conforme valores obtidos através do índice de consistência, descrito no item 3.4. Para a definição dos traços utilizou-se as equações descritas no item 3.3, e encontram-se demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Traços de concreto permeável definidos através do método do Grau de Compactação

Parâmetro		Ref.	APP= 0,1%	APP= 0,3%	AMV= 0,3%	AMV= 0,5%
Grau de Compactação	$G_{c,ef}$	0,9361	0,8812	0,9015	0,9471	0,9366
Relação água/cimento	a/c	0,38	0,35	0,33	0,37	0,35
Volume de vazios efetivo (%)	$V_{v,est}$	48,64	51,65	50,53	48,03	48,61
Volume de pasta (%)	$V_{p,t}$	26,14	29,15	28,03	25,53	26,11
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	292,3	337,3	332,1	288,7	302,1
Consumo de agregado graúdo (kg/m ³)	C_{agg}	1544,5	1453,9	1487,5	1562,8	1545,4
Consumo de agregado miúdo (kg/m ³)	C_{am}	146,2	168,7	166,0	144,4	151,1
Relação agregado graúdo/miúdo	g/m	5,28	4,31	4,48	5,41	5,12
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,702	2,681	2,703	2,713	2,715
Massa específica estimada (g/cm ³)	$\rho_{f,est}$	2,094	2,078	2,095	2,103	2,104
Traço Final	-	1:5,28:0,38	1:4,31:0,35	1:4,48:0,33	1:5,41:0,37	1:5,12:0,35

Fonte: A autora, 2024.

As misturas ensaiadas demonstraram boa aplicabilidade do método do grau de compactação, com os resultados obtidos de 0,8812 e 0,9015 para o aditivo plastificante (APP), e de 0,9471 e 0,9366 para o aditivo modificador de viscosidade (AMV). Esses valores estão em conformidade com o grau de compactação de controle adotado, que foi estabelecido em 0,9361.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM ADITIVO

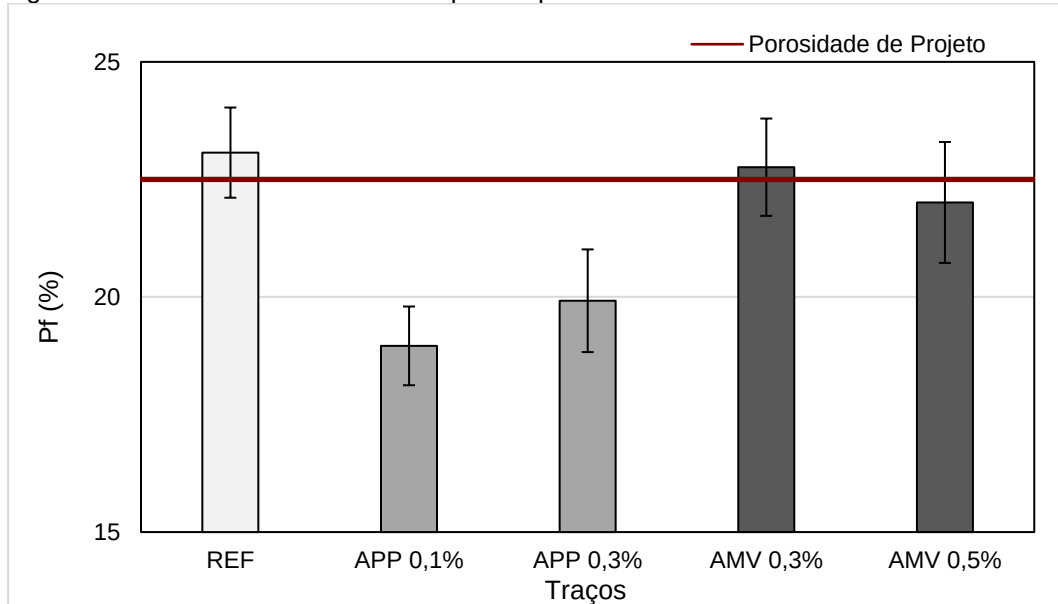
Os corpos de prova de concreto permeável foram caracterizados quanto resistência à compressão e tração, porosidade, densidade e taxa de infiltração, possibilitando a obtenção de parâmetros e propriedades como porosidade no estado fresco e endurecido, e a correlação de tais valores com os teores de aditivo incorporados a mistura.

4.2.1 Porosidade e Massa Específica no Estado Fresco

Os valores de porosidade no estado fresco para os traços executados com aditivo plastificante polifuncional (APP) apresentaram redução em torno de 3,5% quando comparadas a porosidade do traço referência, que foi estipulada em 22,5%. Já o aditivo modificador de viscosidade (AMV), apresentou valores de porosidade próximos ao valor de referência, conforme pode ser observado na Figura 11. Portanto

os traços com APP apresentam-se menos porosos, possivelmente por atuarem diretamente na redução do fator água/cimento. Já os traços com AMV pode-se dizer que atuam mais na estabilidade reológica sem influenciar significativamente a densificação da matriz.

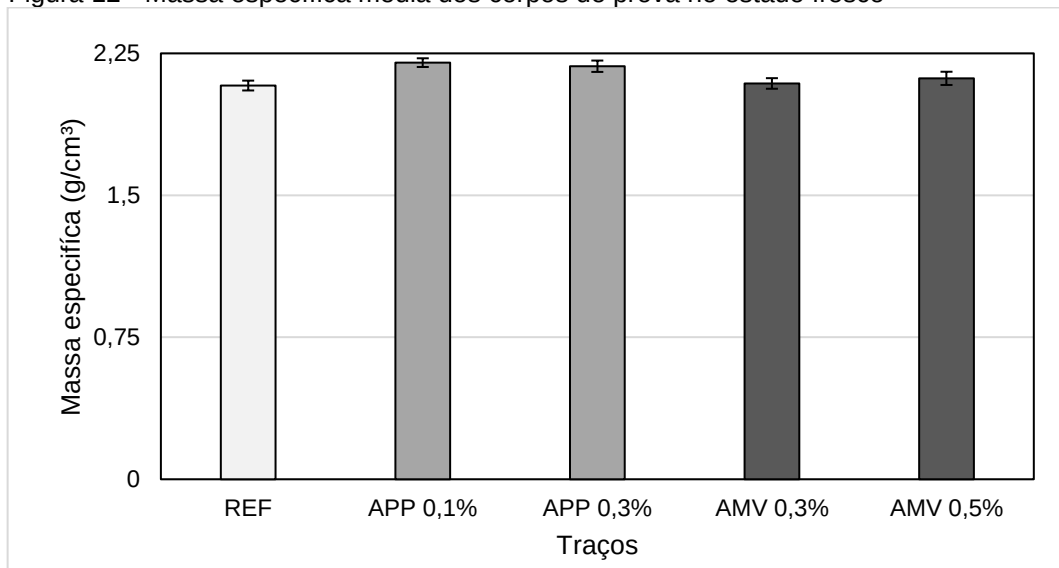
Figura 11 - Porosidade média dos corpos de prova no estado fresco



Fonte: A autora.

Com relação à massa específica no estado fresco, as misturas em geral apresentaram proximidade com a média obtida no traço de referência, conforme demonstra a Figura 12.

Figura 12 - Massa específica média dos corpos de prova no estado fresco



Fonte: A autora.

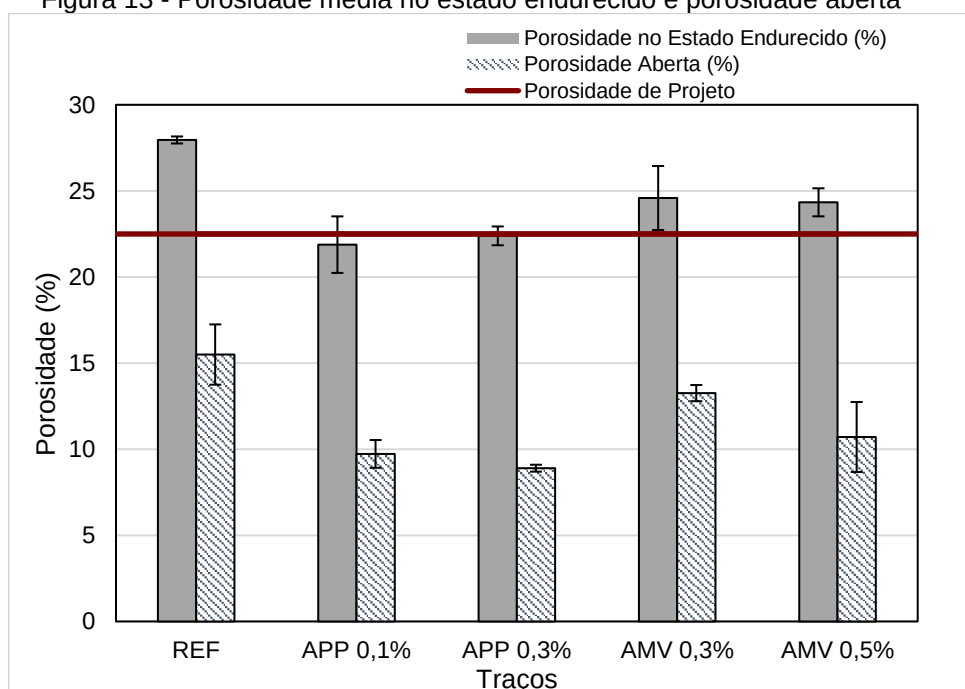
4.2.2 Porosidade e Massa Específica no Estado Endurecido

Levando em conta a porosidade total no estado endurecido, é possível analisar através da Figura 13 que as amostras do traço referência obtiveram um aumento considerável, chegando a valores próximos de 30%. Por outro lado, as amostras que foram realizadas com o aditivo plastificante polifuncional apresentaram valores inferiores à porosidade de projeto, aproximadamente 3%. Tal fato pode demonstrar que apesar do surgimento de poros, esses não foram suficientes para compensar a baixa porosidade apresentada já no estado fresco, pois seu aumento, quando comparado ao estado fresco, foi em torno de 2,7%.

Para os traços com aditivo modificador de viscosidade, é possível perceber que os valores obtidos foram superiores à porosidade de projeto de 22,5. Esses resultados corroboram com o proposto por Mikami (2022), que explica que o surgimento dos poros na pasta de cimento é o responsável pelo aumento da porosidade. Se comparada à porosidade no estado fresco, houve um aumento de cerca de 2% para cada teor com modificador

A porosidade aberta do concreto permeável também foi avaliada e pode ser observada na Figura 13. Como os valores apresentados foram inferiores à porosidade total no estado endurecido, isso indica a presença de poros fechados. Tal porosidade pode ter sido formada pela compactação do concreto e volume de pasta das misturas.

Figura 13 - Porosidade média no estado endurecido e porosidade aberta

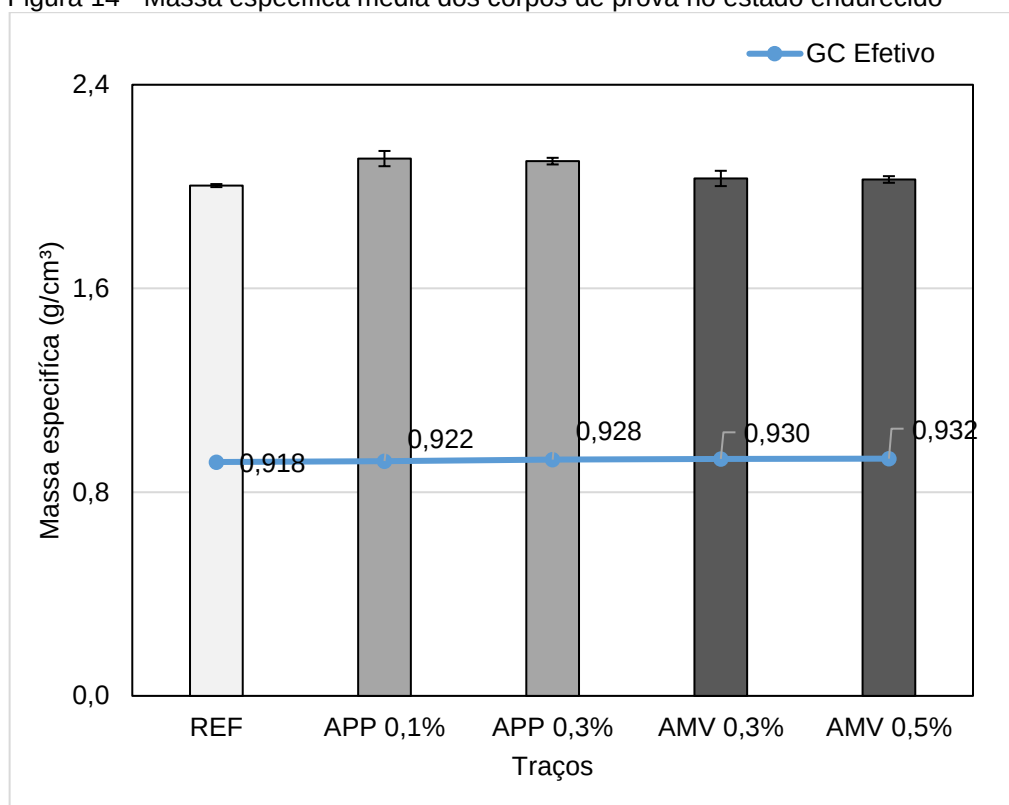


Fonte: A autora.

Com relação à massa específica média dos traços ensaiados no estado endurecido (Figura 14), é possível observar que com o aditivo plastificante polifuncional, houve um aumento, de cerca de 5%, em função dos teores de aditivo adicionados. Os traços com o aditivo modificador de viscosidade também apresentaram aumento quando comparados ao traço referência, porém de apenas 1,3%, fato que já era previsto dentro do Método do Grau de Compactação. Ressaltando ainda que a densidade teórica não considera o volume de vazios, o que leva a valores maiores de densidade.

Ao calcular o grau de compactação efetivo, levando em conta a massa específica média dos traços, foi possível perceber que ambos os aditivos, nos teores executados, apresentam um aumento de cerca de 1% em relação à referência, o que pode explicar a redução na porosidade de todos os traços.

Figura 14 - Massa específica média dos corpos de prova no estado endurecido

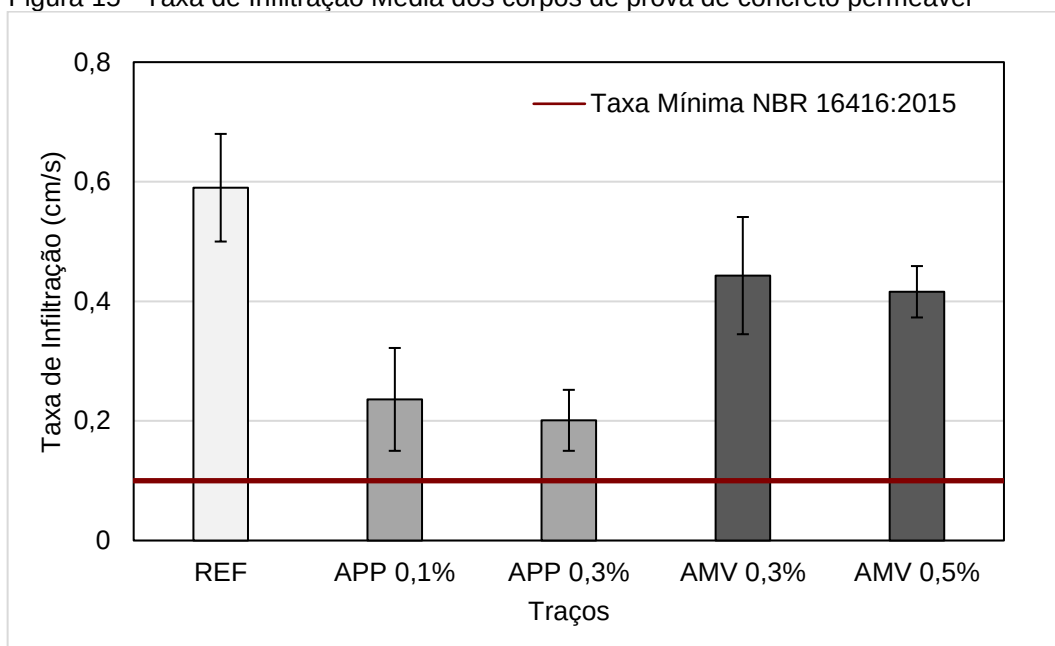


Fonte: A autora.

4.2.3 Taxa de Infiltração

Os traços executados apresentaram taxa de infiltração média conforme demonstra o gráfico da Figura 15.

Figura 15 - Taxa de Infiltração Média dos corpos de prova de concreto permeável



Fonte: A autora.

Com os dados apresentados na Figura 15, sabe-se que apesar das variações apresentadas, todos os traços apresentaram valores acima do mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), de 0,1 cm/s.

As variações entre aditivos demonstram que o aditivo plastificante polifuncional reduz as características de permeabilidade da mistura. Essa redução pode ser explicada através do grau de compactação efetivo das misturas, no caso do polifuncional, os valores obtidos, 0,922 e 0,928 para as dosagens de 0,1 e 0,3%, respectivamente, foram próximos ao obtido para o traço de referência (0,918), entretanto a porosidade foi muito menor, o que justifica a redução de permeabilidade dessas misturas.

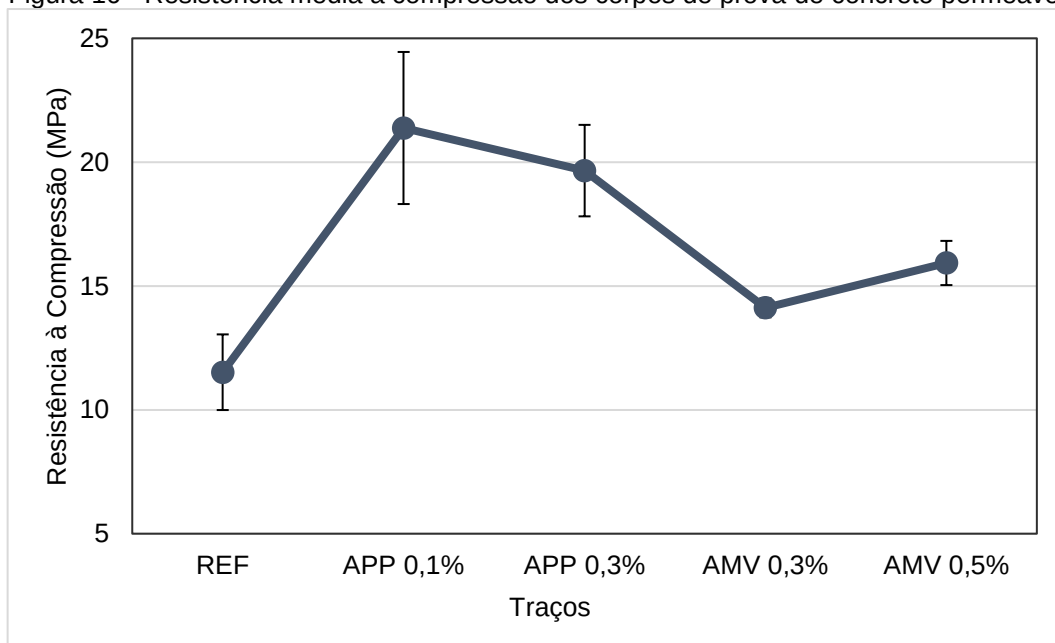
Já nos traços com aditivo modificador de viscosidade, os valores de grau de compactação foram superiores ao traço de referência, 0,930 e 0,932, para as dosagens de 0,3 e 0,5%, respectivamente. Fato que justifica a redução da permeabilidade da mistura, pois a estrutura granular está mais compacta, gerando mais poros fechados, ainda que a porosidade tenha ficado mais próxima do traço de referência. Esse comportamento pode ser justificado pela ação do aditivo, que melhora a estabilidade da mistura e evita a segregação dos materiais.

4.2.4 Resistência à Compressão

As análises de resistência à compressão das amostras ensaiadas, foram realizadas após 28 dias de cura, e seus resultados podem ser observados na Figura 16. Com os resultados obtidos, é possível perceber que houve alteração significativa entre os traços. Os traços que foram executados utilizando o aditivo plastificante polifuncional, apresentaram um aumento de 78% se comparado ao traço de referência, obtendo valores próximos a 20 MPa, valor consideravelmente alto em concretos permeáveis.

Para os traços com aditivo modificador de viscosidade, também foi possível notar aumento na resistência em torno de 60%, com os valores ficaram na faixa dos 15 MPa. Por outro lado, em ambos os aditivos a variação no teor aplicado não influenciou de maneira significativa para o aumento da resistência entre os próprios aditivos, conforme pode ser avaliado na Figura 16.

Figura 16 - Resistência média à compressão dos corpos de prova de concreto permeável



Fonte: A autora.

Para o traço referência, que apresentou resistência média à compressão de 11,52 MPa, e consumo de cimento estimado através método de dosagem de 290,5 kg/m³. Nos traços utilizando aditivo plastificante polifuncional as resistências médias a compressão para porcentagem de 0,1 e 0,3%, foram de, respectivamente, 21,38 e 19,66 MPa, enquanto os consumos de cimento estimados pelo método foram de 357,1 e 345,8 kg/m³. Os traços com aditivo modificador de viscosidade foram realizados com

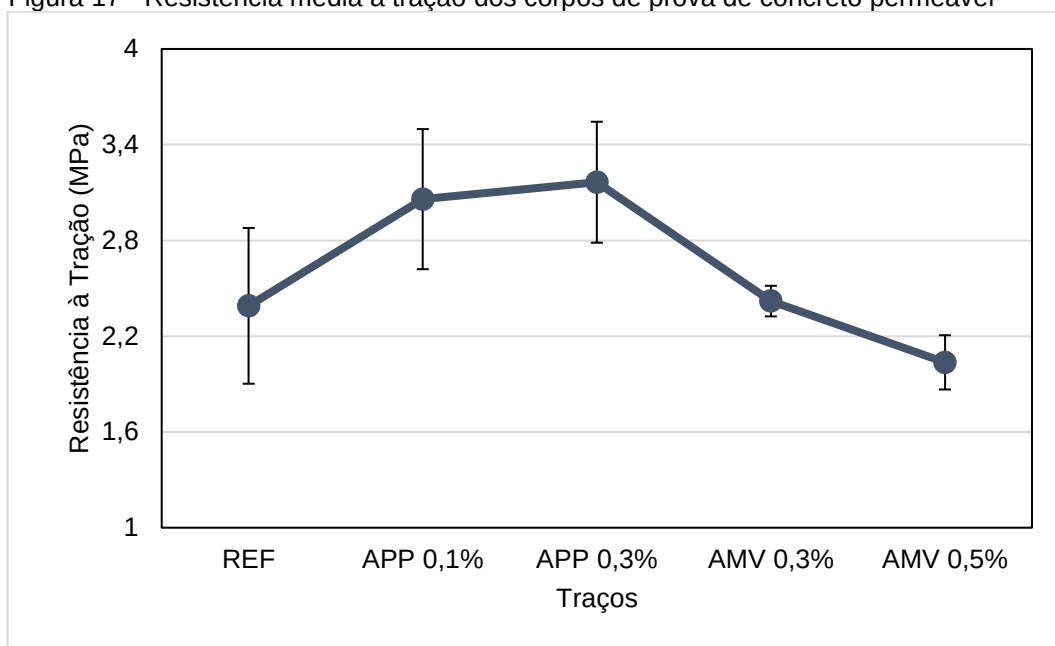
porcentagens de 0,3 e 0,5%, e apresentaram valores de compressão média, respectivamente, de 14,12 e 15,93 MPa, com consumos estimados de cimento igual a 287,2 e 303,9 kg/m³.

De acordo com Xie (2020), a resistência à compressão está intimamente relacionada à estrutura formada no material, bem como à espessura da camada de pasta que envolve os agregados. Os aumentos de resistência proporcionado pelo aditivo plastificante polifuncional pode ser explicado pela redução da porosidade das misturas, o que implica em uma diminuição do volume de vazios, resultando em um material mais resistente. O trabalho de Park, S. B. e Tia, M. (2004), cita que a dosagem adequada do aditivo modificador de viscosidade tende a melhorar as propriedades mecânicas sem comprometer a permeabilidade da mistura. No presente trabalho foi possível verificar essas características, pois os valores de resistência tiveram um aumento e a porosidade apesar de reduzir, ainda assim apresentou valores próximos ao do traço de referência.

4.2.5 Resistência à Tração

Para as análises de resistência à tração, foi utilizado o método proposto pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Os resultados de resistência aos 28 dias podem ser observados na Figura 17. Apesar de usualmente os valores obtidos nos ensaios de tração não apresentarem grandes aumentos, foi possível identificar que a incorporação de aditivo APP gerou aumento nas resistências médias. No aditivo plastificante polifuncional, em ambas as dosagens, o aumento foi mais significativo, apresentando uma média de 3 Mpa, 30% maior que o traço referência. Já os traços com o modificador de viscosidade apresentaram valores próximos ao obtido no traço de referência, em torno de 2 MPa, o traço AMV 0,3% apresentou aumento de 1%, enquanto isso o traço AMV 0,5% apresentou redução de 14% quando comparado ao traço de referência, esses resultados demonstram que a adição nesse caso não foi significativa para gerar melhora nessa propriedade.

Figura 17 - Resistência média à tração dos corpos de prova de concreto permeável



Fonte: A autora.

Com os resultados obtidos é possível concluir que a diminuição da porosidade dos traços com aditivo plastificante polifuncional, geram melhores desempenhos mecânicos. Fato que pode ser explicado pois a matriz cimentícia dessas misturas são mais densas, reduzindo os vazios e aumentando a ligação entre os componentes, o que auxilia no aumento da resistência à tração e compressão.

Por outro lado, observa-se que apesar da resistência à tração e compressão estarem diretamente ligadas, nem sempre o comportamento é linear ou uniforme. No caso do aditivo modificador de viscosidade, apesar da resistência à compressão ter aumentado, sua influência sobre a tração foi limitada. No teor de 0,5% foi possível observar uma redução na resistência. Esses resultados podem ser atribuídos a possíveis efeitos do aditivo na microestrutura, como a formação de uma matriz menos homogênea em níveis de tração, ou a modificação das interações nos pontos de ligação crítica.

4.2.6 Consumo de Cimento

Os consumos reais dos materiais utilizados para confecção dos corpos de prova de concreto permeável foram obtidos através das Equações 10 e 11, e estão descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Consumos reais de material dos traços

Traço	C _{cim} (kg/m ³)	C _{agg} (kg/m ³)	C _{agg} (kg/m ³)
REF	290,5	145,3	1.533,9
APP 0,1%	357,1	178,6	1.540,3
APP 0,3%	345,8	172,9	1.549,2
AMV 0,3%	287,2	143,6	1.553,9
AMV 0,5%	303,9	151,9	1.555,8

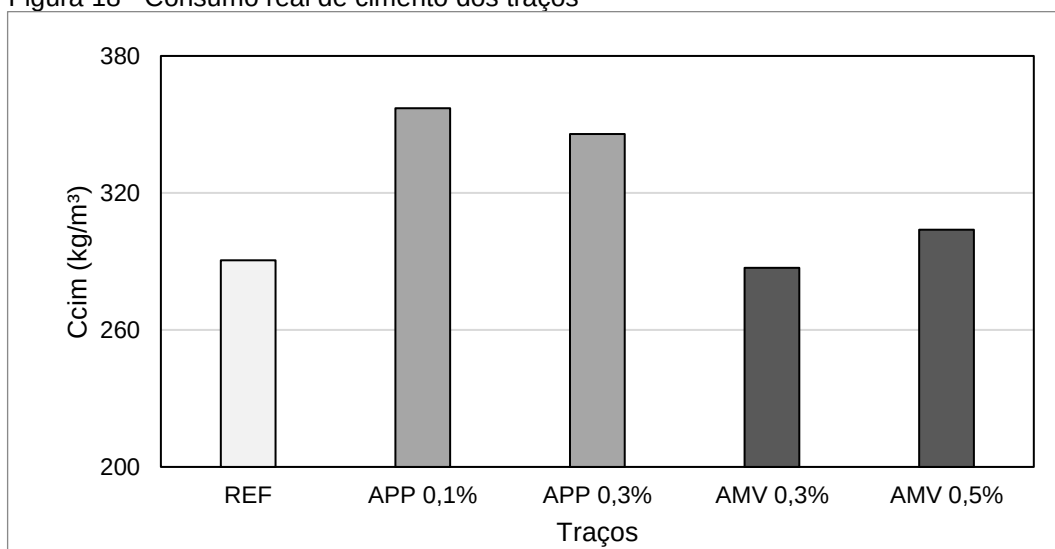
Fonte: A autora, 2024.

Notas: C_{cim} – Consumo de cimento real; C_{agg} – Consumo de agregado miúdo real; C_{agg} – Consumo de agregado graúdo real.

Na Figura 18 é possível compreender que os traços com uso do aditivo plastificante polifuncional apresentaram aumento em torno de 20% no consumo de cimento, para ambas as dosagens. Esse aumento pode estar relacionado ao fato do aditivo melhorar a trabalhabilidade e coesão da mistura.

Já nos traços com aditivo modificador de viscosidade, foi possível perceber que o teor de 0,3% apresentou redução de 1% no consumo de cimento, onde o consumo passou para 287,2 kg/m³. E no teor de 0,5% apresentou um aumento de 4% quando comparado ao traço de referência. Essa variação demonstra que teores mais baixos do aditivo podem otimizar o consumo, enquanto teores mais altos podem levar a um aumento, o que pode ser explicado pela necessidade de ajustes para manter a coesão e trabalhabilidade da mistura.

Figura 18 - Consumo real de cimento dos traços



Fonte: A autora.

Além do consumo de cimento é possível avaliar a eficiência no uso de cimento de materiais cimentícios, essa avaliação pode ser feita através de um índice,

denominado de intensidade de consumo de cimento (I_c), e pode ser obtido pela razão entre consumo de cimento por volume unitário de concreto e resistência mecânica medida Damineli *et al.* (2010). Os resultados obtidos para intensidade de consumo de cimento dos traços ensaiados estão demonstrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Intensidade de consumo de cimento

Traço	f_c (MPa)	C_{cim} (kg/m³)	I_c (kg.m⁻³/MPa)
REF	11,52	290,5	25,22
APP 0,1%	21,38	357,1	16,70
APP 0,3%	19,66	345,8	17,59
AMV 0,3%	14,12	287,2	20,34
AMV 0,5%	15,93	303,9	19,08

Fonte: A autora, 2024.

Para todos os traços com aditivo é possível perceber que houve um aprimoramento mecânico em relação ao traço de referência. Sendo que o traço com maior eficiência é o APP 0,1%, pois apresenta o menor valor de I_c , de 16,70 kg.m⁻³/MPa. Segundo Damineli *et al.* (2010) os valores mínimos de intensidade de consumo de cimento para concretos com resistência de 20 MPa, devem ser em torno de 13 kg.m³/MPa.

4.3 CARACTERIZAÇÃO ARGAMASSAS

A fim de caracterizar a argamassa presente no concreto permeável, foram realizados ensaios de resistência à tração e compressão, bem como massa específica seca e saturada, além do ensaio de absorção.

4.3.1 Resistência à Compressão

A fim de caracterizar as argamassas com diferentes aditivos quanto à compressão, sabe-se que as diferentes dosagens de aditivos apresentam algumas variações. O traço de referência foi utilizado como base de comparação com os demais traços, apresentando valores em cerca de 56,97 MPa, conforme demonstrado na Figura 19.

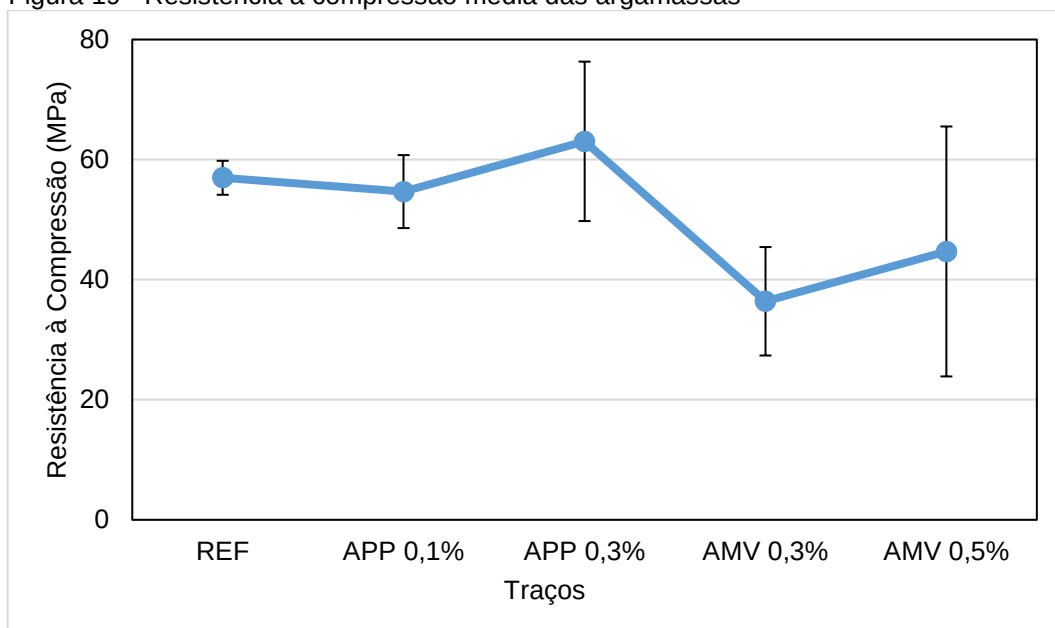
Já os traços com aditivo plastificante polifuncional, na dosagem de 0,3%, apresentaram um aumento significativo na resistência, com valores em torno de 63 MPa. Esse resultado indica que tal adição contribuiu positivamente para o desempenho mecânico da argamassa. Entretanto, quando a dosagem reduziu para 0,1%, foi possível redução de resistência, apresentando valor de 54,67 MPa. Tais

resultados demonstram que o APP pode exercer um papel crucial no aumento da resistência, desde que aplicado em quantidades suficientes.

Por outro lado, nos traços dosados com aditivo modificador de viscosidade (AMV), foi possível perceber a aplicação do aditivo não gerou melhora na resistência e sim queda dela, sendo que na dosagem de 0,3% houve uma redução da resistência para 36 MPa. Os resultados demonstram que esse aditivo, nos teores testados, não apresenta melhora dessa propriedade.

Em resumos, o aditivo plastificante polifuncional quando dosado na quantia de 0,3%, apresentaram bom desempenho à compressão. Apesar dos valores inferiores, obtidos com o AMV, sabe-se que ambos os aditivos quando dosados dentro da faixa ótima de dosagem tendem a maximizar a resistência à compressão das argamassas, conforme pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Resistência à compressão média das argamassas



Fonte: A autora.

Apesar das resistências obtidas nas argamassas, tais resultados não refletem diretamente a influência dos aditivos quando aplicados no concreto. Pois na argamassa, o único traço que apresentou valores superiores a resistência do traço de referência foi o APP 0,3%, enquanto nos concretos todos os teores de aditivo resultaram em resultados de resistência à compressão superiores ao traço de referência.

A diferença nos resultados obtidos pode ser explicada pelo fato de que, embora a argamassa tenha influência na resistência à compressão, a transmissão dos esforços pelos agregados graúdos exerce um papel significativo quando se trata de concreto. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a argamassa nos concretos atua como suporte e elemento de coesão, complementando o papel dos agregados na resistência final do material.

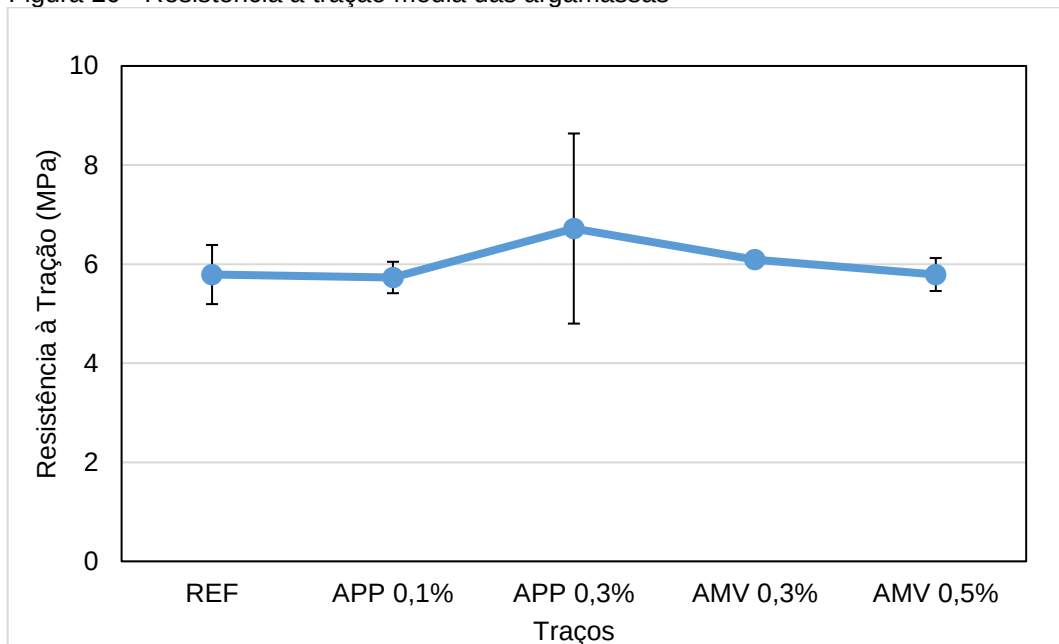
4.3.2 Resistência à tração

As diferentes dosagens de aditivo revelam variações sutis conforme a dosagem e o tipo utilizado. A amostra referência apresentou valores em torno de 5,8 MPa, e serviu de parâmetro para os demais traços.

O traço com APP 0,1% apresentou uma resistência equivalente à do traço de referência. Já o traço com APP 0,3% apresentou o melhor desempenho, com resistência de aproximadamente 6,7 MPa. No entanto, o desvio padrão elevado faz com que esse resultado não se diferencie de forma significativa dos demais.

Enquanto isso, os traços utilizando o AMV não apresentaram mudanças significativas na resistência, permanecendo com valores similares ao do traço referência, portanto nas dosagens testadas não foi suficiente para otimizar o desempenho conforme demonstra a Figura 20.

Figura 20 - Resistência à tração média das argamassas

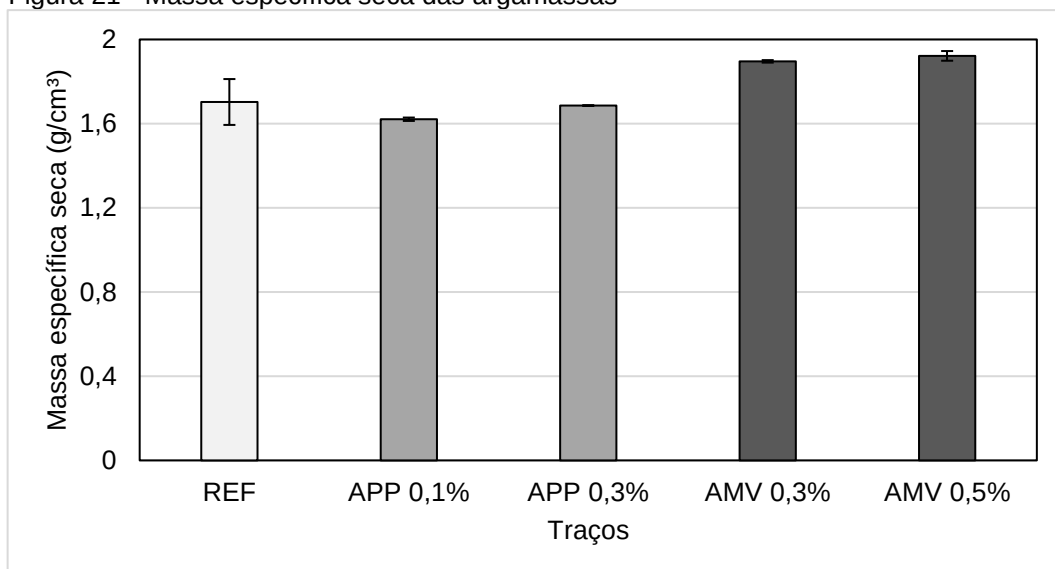


Fonte: A autora.

4.3.3 Massa Específica e Absorção

Ao analisar os resultados obtidos para massa específica seca das misturas, observa-se que os traços com APP apresentaram valores próximos aos do traço de referência, indicando que o aditivo não impactou significativamente essa propriedade. Por outro lado, os traços com AMV registraram valores mais elevados, sugerindo uma possível melhoria na coesão interna dos materiais. Esse aumento pode estar relacionado à densificação da matriz cimentícia promovida pelo aditivo, resultando em uma estrutura mais compacta.

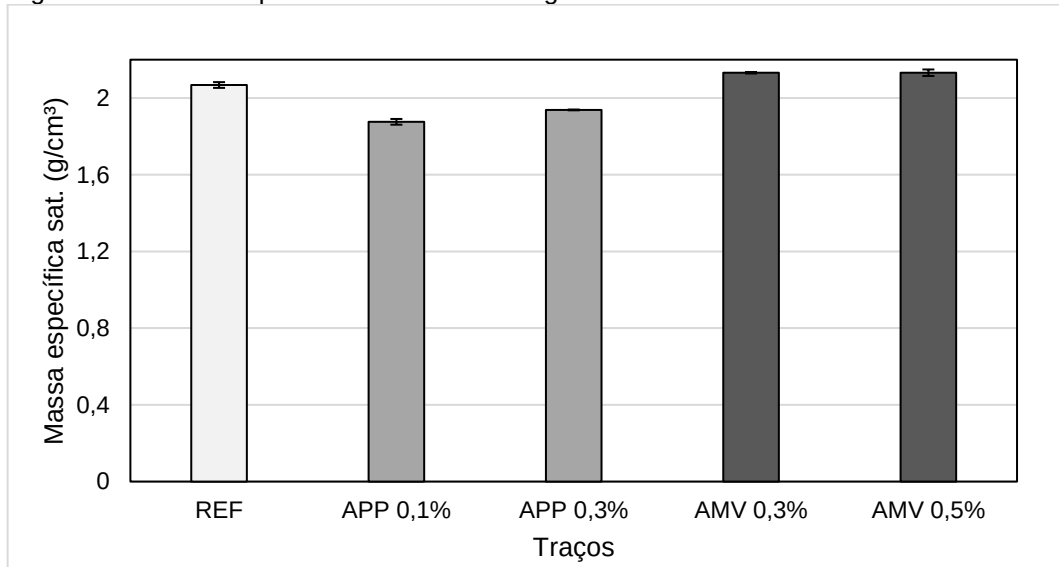
Figura 21 - Massa específica seca das argamassas



Fonte: A autora.

Na massa específica saturada, os valores obtidos foram mais próximos ao traço de referência, reduzindo nos traços com APP em, respectivamente, 4% e 1%, mesmo assim é possível entender que os aditivos de fato influenciam nos traços. Sendo que, nesse caso, o aditivo modificador de viscosidade possui maior influência, pois gerou aumento de cerca de 12% em ambos os teores. Os resultados de massa específica saturada estão ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Massa específica saturada das argamassas

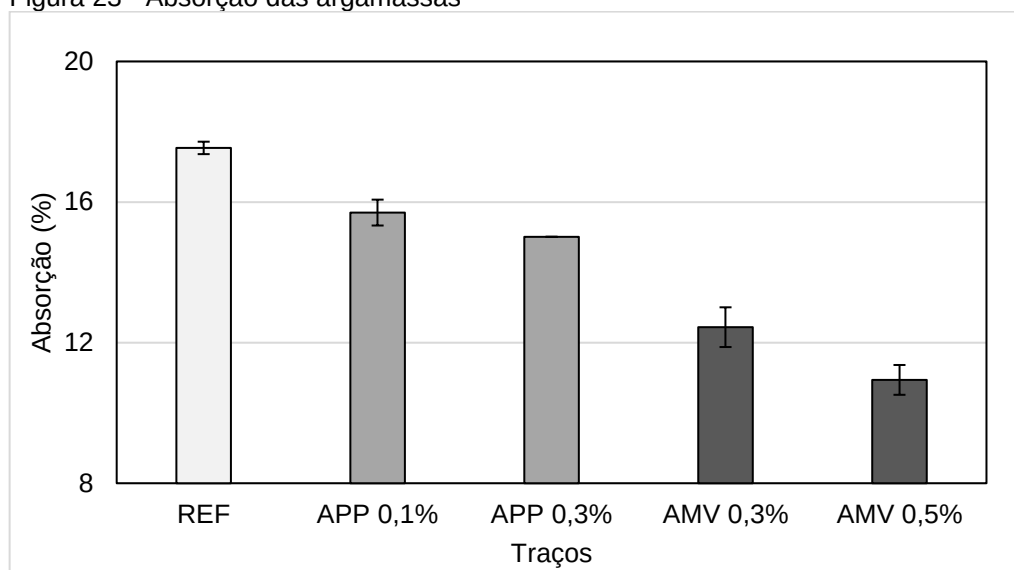


Fonte: A autora.

Do mesmo modo, ao compararmos a absorção, os valores dos traços com aditivos foram inferiores ao traço referência, conforme pode ser avaliado na Figura 24, indicando baixa absorção, principalmente nos traços com AMV, fato esse que influencia diretamente na porosidade. Segundo Bertolini *et al.* (2013) os aditivos plastificantes ajudam a diminuir a relação água/cimento, o que tende a diminuir a porosidade e, conseqüentemente, a absorção. Já o aditivo modificador de viscosidade tem como característica reduzir a absorção de água, pois limita a segregação dos componentes durante a cura. Essas características explicam a baixa absorção dos traços estudados.

Avaliando as características apresentadas na argamassa, é possível entender o motivo pelo qual a porosidade do concreto permeável não apresentou grandes aumentos quando comparado os valores obtidos no estado fresco e no estado endurecido.

Figura 23 - Absorção das argamassas



Fonte: A autora.

4.4 CARACTERIZAÇÃO PASTA

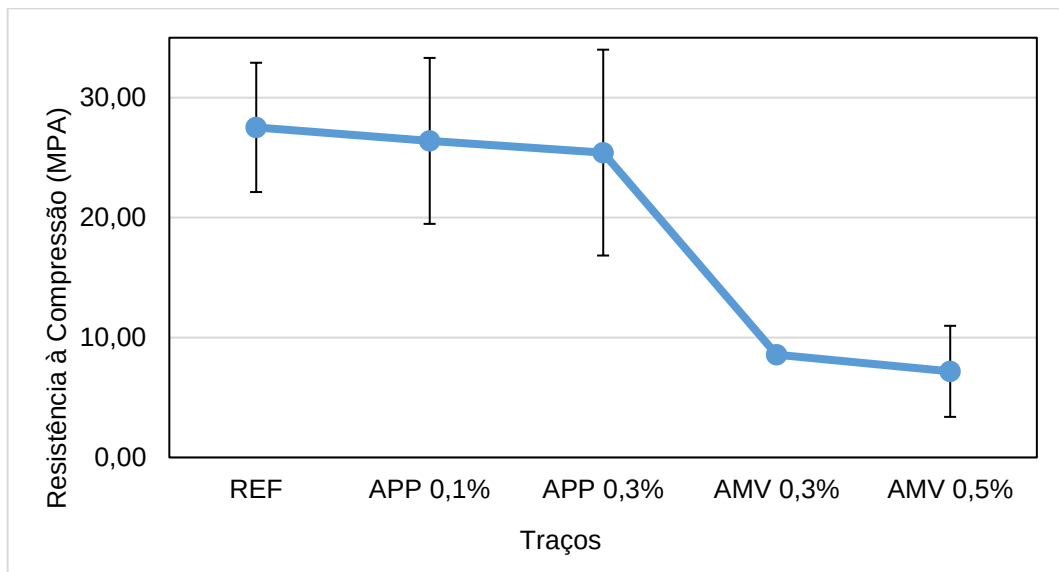
Os ensaios de pasta foram realizados pensando na influência das dosagens de aditivos nas misturas.

4.4.1 Resistência à compressão

Através da Figura 244 é possível observar que as resistências à compressão das pastas com aditivo não conseguiram apresentar valores maiores que a resistência do traço referência. A diferença nos resultados obtidos pode ser explicada pelo fato das pastas de cimento não possuírem agregados, o que torna a microestrutura menos densa, reduzindo a resistência. Os aditivos são utilizados no intuito de aprimorar essa microestrutura, entretanto no trabalho em questão é possível perceber que nas dosagens adotadas eles não foram suficientes para causar essa melhora (Campos; Caetano; Maciel, 2022).

O aditivo plastificante polifuncional apresentou redução de 4% no traço APP 0,1% e redução de 7% no traço de APP 0,3%. Em contra partida a redução obtida para o aditivo modificador de viscosidade foi ainda maior, ficando na faixa de aproximadamente 70%. Tais valores demonstram que as dosagens incrementadas não foram favoráveis para esses traços.

Figura 24 - Resistência à compressão dos corpos de prova de pasta

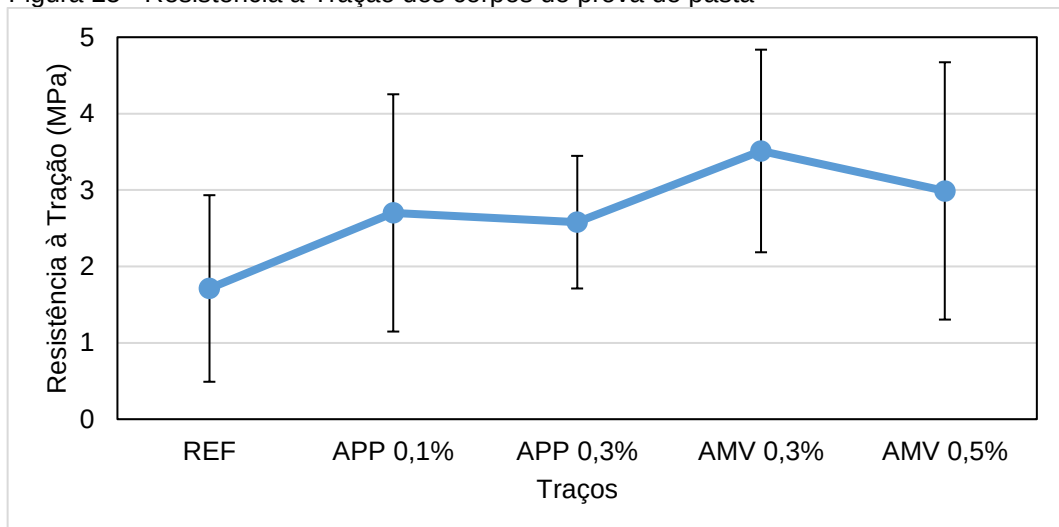


Fonte: A autora.

4.4.2 Resistência à tração

Através da Figura 25 é possível compreender que o uso de ambos os aditivos nas misturas, representaram aumentos na resistência à tração das pastas. Sendo que, para o APP o aumento foi de cerca de 55% e para o AMV 0,3% foi de 105%, sendo nessa análise o melhor traço, e para AMV 0,5% o aumento foi de aproximadamente 70%. Entretanto o desvio padrão elevado dificulta a interpretação adequada da influência que os aditivos exerceram nas misturas.

Figura 25 - Resistência à Tração dos corpos de prova de pasta

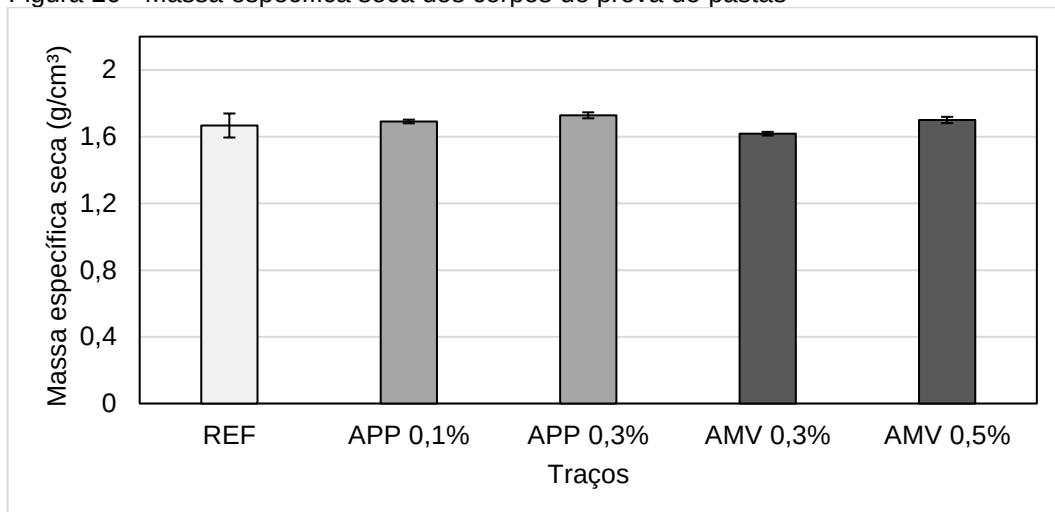


Fonte: A autora.

4.4.3 Massa específica e absorção

Para os resultados obtidos de massa específica seca, é possível perceber que não houve grandes alterações entre os traços, sendo todos os resultados obtidos nos traços ficaram próximos ao traço de referência, como pode ser observado na Figura 27. Portanto a compactação da pasta permaneceu a mesma em todos os traços.

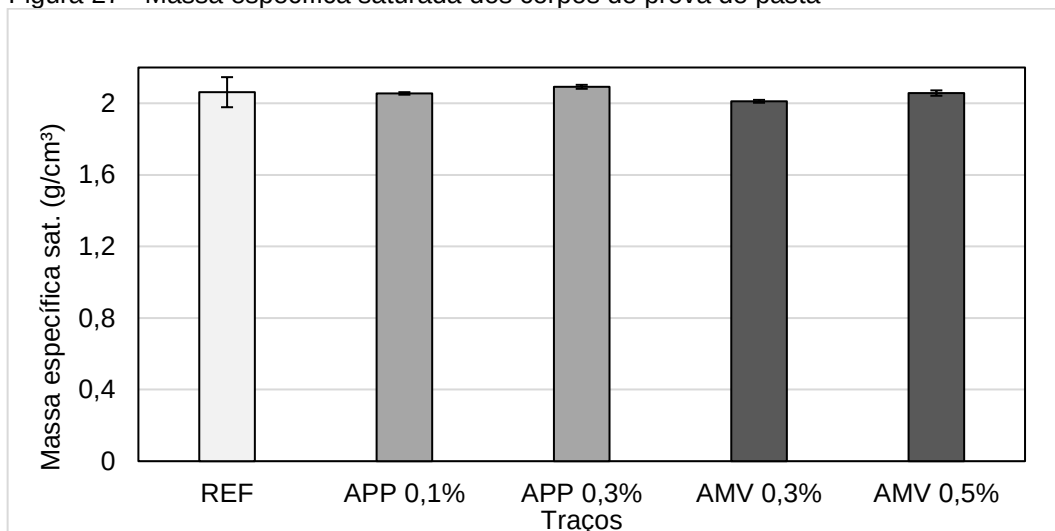
Figura 26 - Massa específica seca dos corpos de prova de pastas



Fonte: A autora.

Os valores obtidos para massa específica saturada da mistura, que podem ser observados na Figura 28. Esses resultados demonstram que de modo geral os aditivos não influenciaram nas misturas, pois todos os traços ficaram com valores próximos ao obtido no traço de referência. Portanto o uso de aditivos não foi significativo para essa propriedade.

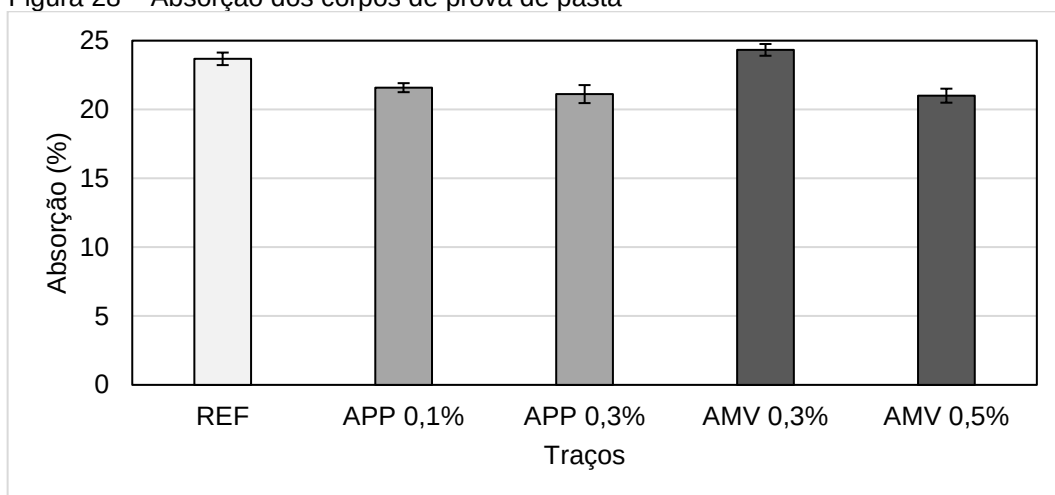
Figura 27 - Massa específica saturada dos corpos de prova de pasta



Fonte: A autora.

As análises de absorção apresentadas na Figura 28, mostram que o traço de referência e a o traço com 0,3% de aditivo modificador de possuem as maiores porosidades. Fato esse que pode ser visualizado também nas misturas de concreto permeável em que foi possível notar aumento na porosidade total no estado endurecido. As demais misturas possuem estruturas mais densas e compactas, resultando em menor absorção e porosidade. Além disso, o uso do aditivo plastificante polifuncional parece minimiza o volume de vazios, fato que deve ser levado em conta quando se pensa na execução do concreto permeável com tal aditivo.

Figura 28 – Absorção dos corpos de prova de pasta



Fonte: A autora.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após todos os resultados expostos é possível assimilar algumas características dos traços avaliados, como resistência à compressão e tração, porosidade e taxa de infiltração. O resumo dos resultados obtidos pode ser observado na Tabela 16.

Tabela 16 - Caracterização física das peças de concreto permeável

Traço	ρ_f (g/cm ³)	Pf (%)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	k (cm/s)	ρ (g/cm ³)	P (%)
REF	2,080	23,07	11,52	2,39	0,59	2,004	27,96
APP 0,1%	2,201	18,96	21,38	3,06	0,24	2,110	21,88
APP 0,3%	2,182	19,92	19,66	3,17	0,20	2,100	22,39
AMV 0,3%	2,091	22,76	14,12	2,42	0,44	2,032	24,59
AMV 0,5%	2,118	22,01	15,93	2,04	0,42	2,028	24,34

Fonte: A autora, 2024.

Notas: m/c – Relação agregado miúdo/cimento; ρ_f – Massa específica no estado fresco; Pf – Porosidade no estado fresco; f_c – Resistência à compressão; f_t – Resistência a tração; k – Taxa de infiltração; ρ – Massa específica no estado endurecido; P – Porosidade no estado endurecido.

Com os resultados, é possível perceber que a porosidade prevista pelo Grau de Compactação resultou em médias maiores para os ensaios de porosidade no estado endurecido devido a geração de poros na pasta de cimento.

As demais propriedades podem ser explicadas com a ajuda dos dados obtidos através das caracterizações das argamassas que estão representada na Tabela 17.

Tabela 17 - Caracterização física das argamassas

Traços	f_c (MPa)	f_t (MPa)	ρ_s (g/cm³)	ρ_{sat} (g/cm³)	A (%)
REF	56,97	5,79	1,703	2,068	17,54
APP 0,1%	54,67	5,73	1,621	1,876	15,70
APP 0,3%	63,04	6,72	1,686	1,938	15,01
AMV 0,3%	36,40	6,09	1,896	2,132	12,44
AMV 0,5%	44,70	5,79	1,922	2,132	10,94

Fonte: A autora, 2024.

As caracterizações das pastas encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Caracterização física das pastas

Traços	f_c (MPa)	f_t (MPa)	ρ_s (g/cm³)	ρ_{sat} (g/cm³)	A (%)
REF	27,52	1,71	1,667	2,062	23,68
APP 0,1%	26,40	2,70	1,691	2,055	21,59
APP 0,3%	25,42	2,58	1,728	2,092	21,12
AMV 0,3%	8,57	3,51	1,618	2,011	24,33
AMV 0,5%	7,18	2,99	1,700	2,057	21,00

Fonte: A autora, 2024.

Ao observar os valores de absorção obtidos nas pastas e argamassas, é possível entender o motivo pelo qual as porosidades dos traços de concreto apresentaram valores reduzidos, devido aos aditivos utilizados influenciarem na microestrutura do concreto, reduzindo poros, o que resulta em uma matriz mais impermeável, afetando diretamente a permeabilidade e consequentemente gerando melhora nas resistências mecânicas.

Os aditivos incorporados nas misturas desempenham um papel crucial nesse processo, pois melhoram a dispersão das partículas de cimento e reduzem o volume de vazios interligados. Com isso, a água livre na mistura diminui, e a formação de poros residuais é minimizada, gerando uma estrutura interna mais compacta.

Dessa forma, os traços com teores ajustados de aditivos tendem a apresentar uma redução significativa na permeabilidade. Contudo, é importante ressaltar que o desempenho ideal só será alcançado com a determinação precisa das dosagens ótimas de aditivos, considerando as características específicas de cada projeto. Esse ajuste é essencial para equilibrar as propriedades reológicas e mecânicas do concreto, garantindo a eficiência desejada.

5 CONCLUSÃO

Com base no exposto, conclui-se que a incorporação de aditivos nas misturas de concreto permeável, podem auxiliar no aumento das propriedades mecânicas, aumentando os valores de resistência. Entretanto, essa melhora ocorre em detrimento da permeabilidade, que tende a ser reduzida, tanto no estado fresco quanto no endurecido, devido à formação de uma microestrutura mais densa e compacta.

Além disso, com o presente trabalho foi possível entender que o Método do Grau de Compactação é bem aplicado e apresenta resultados coerentes em parâmetros importantes. Além de confirmar que os parâmetros de controle do método previstos no momento da dosagem foram atingidos durante os ensaios das amostras, pois porosidade, massa específica e grau de compactação se mostraram coerentes.

Ao avaliar as propriedades de pastas e argamassas, foi possível justificar os comportamentos observados nos traços de concreto permeável, como a redução da permeabilidade associada ao aumento da resistência. Esse fenômeno ocorre porque, nas pastas e argamassas, os aditivos desempenham um papel direto na modificação da microestrutura, promovendo a melhor dispersão das partículas de cimento, reduzindo os vazios e aumentando a densidade da matriz. Essa estrutura mais compacta dificulta a passagem de fluidos, resultando em menor permeabilidade e maior resistência.

No entanto, as propriedades conferidas pelos aditivos em pastas e argamassas podem diferir das observadas no concreto devido a fatores específicos de cada material. Esses fatores ressaltam a importância de interpretar os resultados de pastas e argamassas com cautela ao extrapolá-los para concretos permeáveis.

Embora os testes em materiais mais simples sejam úteis para compreender tendências gerais, as particularidades do concreto, como a heterogeneidade e o efeito dos agregados, podem alterar significativamente os resultados. Isso reforça a necessidade de validar as dosagens e os comportamentos dos aditivos diretamente em misturas de concreto para garantir que os objetivos de desempenho sejam atingidos.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10 Report on pervious concrete**. ACI, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10 Report on pervious concrete**. ACI, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688M: Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2014a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701M: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2014b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754 / C1754M, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ARAÚJO, P.R; GOLDENFUM, J. A., TUCCI, C. E. M. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 5. n. 3. p. 21-29, 2000.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 - Agregados para concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222 Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916 Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917 Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972 Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Transportes – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BATEZINI, R. **Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BATEZINI, R. *et al.* Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 177–194, abr. 2021.

CAACKLER, E. T. *et al.* 2006. **Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods**. Federal Highway Administration, Washington, DC, 2006.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2^a Edição. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.42, 2013, p.97-104.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. (2023). **Desastres em 47% dos municípios forçaram mais de 4,2 milhões a deixarem suas casas nos últimos 10 anos**. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/desastres-em-47-dos-municipios-forcaram-mais-de-4-2-milhoes-a-deixarem-suas-casas-nos-ultimos-10-anos>>. Acesso em 15 maio 2024.

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

DEO, O; NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 1, p. 402-412, 2010.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOUI, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 164–175, 2019

EVARISTO, W. F. DE O.; ALMEIDA, V. L. DE; CAPUZZO, V. M. S. Influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, 2021.

FARIAS, M.M; PALMEIRA, E.M. **Agregados para a construção civil**. In: ISAIA, G.C. (Ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência de Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 16.

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

IBRAHIM, A. et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, 2014.

JAHN, L.C. **Influência do tamanho e teor de agregado nas propriedades do concreto permeável**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão.

LAMB. G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. Dissertação (Pós-graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

MCCAIN, G. N.; DEWOOLKAR, M. M. **Porousconcrete pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, TRR 2164, p.66-75, 2010.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O.; MAYOR, A. V. **Conceitos e requisitos para pavimentos de concreto permeável**. Prática Recomendada PR-3. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2013. Disponível em: https://abcp.org.br/wpcontent/uploads/2016/01/PR3_Conceitos_Requisitos_Pav_Concreto_Permeavel.pdf

MARTINS FILHO, S. T. **Congresso brasileiro do concreto**, 61., 2019, Fortaleza, Ceará. Influência da relação pasta/agregado nas propriedades do concreto permeável. Ibracon, 2019. 16 p.

MEININGER, R. C. **No-Fines Pervious Concrete for Paving**. Concrete International, v. 10, n. 8, p. 20–27, 1 ago. 1988.

MIKAMI, R. J. **Dosagem e otimização de misturas de concreto permeável por controle de porosidade pelo método do grau de compactação**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

NGUYEN, V.; Lilly, B.; Castro, C. 2014. The exoskeletal structure and tensile loading behavior of an ant neck joint. **Journal of Biomechanics** 47:497-504. 10.1016/j.biomech.2013.10.053

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, 29 out. 2017.

PARK, S. B; TIA, M. An Experimental Study on the Water-Purification Properties of Porous Concrete. **Cement and Concrete Research**, 34, 177-184, 2004.

POLASTRE, B; SANTOS, L. D. **Concreto Permeável**. Artigo publicado na AUT 221 – Arquitetura, Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2006.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; HASELBACH, L.; ENGLUND, K. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 126, 2016.

SALES, T. L. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.

SANDOVAL, G.F.B. *et al.* **Influência da porcentagem da fração o fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável**. Ciencia y Poder Aéreo, v. 13, n. 2, p. 126-136, 2018.

SANDOVAL, G F B. *et al.* **Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties**. Ibracon Structures and Materials Journal, v. 12, 2019.

SCHWETZ, P. F. *et al.* **Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve**. In: Conference: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção. 2015.

SKOVRONSKI, A. P.; CARNEIRO, M. A. **Otimização De Misturas Para A Produção De Peças De Concreto Permeável Por Dosagem De Agregado Miúdo**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023.

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

TUCCI, C.E.M. Inundações e drenagem urbana. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 45-141, 2003.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias.** 2009. Dissertação (Tese de Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

YANG, J., & JIANG, G. (2003). **Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate.** Cement and Concrete Research.

WEISS, W.J.; BARRETT, T.J.; QIAO, C.; AND TODAK, H. **Toward a Specification for Transport Properties of Concrete Based on the Formation Factor of a Sealed Specimen.** Advances in Civil Engineering Materials, V. 5, No. 1, 2016, pp. 179-194.

WU, HAO; LIU, ZHUO; SUN, BEIBEI; YIN, J. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v. 117, 2016.