

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

ALEXANDRE POOL SKOVRONSKI
MATHEUS ALVES CARNEIRO

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL POR DOSAGEM DE AGREGADO MIÚDO

PONTA GROSSA
2023

ALEXANDRE POOL SKOVRONSKI
MATHEUS ALVES CARNEIRO

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL POR DOSAGEM DE AGREGADO MIÚDO

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

Orientador: Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami

PONTA GROSSA
2023

RESUMO

O concreto permeável é um material poroso, cuja estrutura de vazios interconectados permite a passagem de água por seu interior, sendo destaque entre os pavimentos permeáveis. Um dos grandes problemas que envolvem a produção de concreto permeável é o alto consumo de cimento Portland, trazendo desvantagens no quesito econômico e ambiental. Ainda, quanto ao estudo do material, percebe-se uma escassez quanto a análise da influência do agregado miúdo na produção do concreto. O objetivo do estudo é propor uma dosagem otimizada para os concretos permeáveis através da inclusão de agregado miúdo. Para isso foram confeccionados 4 traços de concreto permeável, sendo moldadas 10 amostras para cada traço, sendo um traço piloto sem adição de areia, e outros 3 traços com relações agregado miúdo/cimento de 0,5, 1,0 e 1,5, respectivamente. Em todos os traços, a porosidade de projeto foi de 20%. As amostras de concreto permeável moldadas foram ensaiadas para determinação da resistência à compressão aos 28 dias, massa específica, porosidade e taxa de infiltração. As amostras demonstraram resistência à compressão entre 31,60 MPa e 39,43 MPa, a taxa de infiltração entre 0,99 cm/s e 1,54 cm/s, a porosidade no estado fresco se manteve próximo de 20% e a porosidade no estado endurecido variou entre 21,87% e 25,25%. Com base nos resultados, é plausível afirmar que a utilização de areia na dosagem de concretos permeáveis reduz o consumo de cimento, sem que exista prejuízos na permeabilidade e ao mesmo tempo exista ganho de resistência, mas apenas até certa proporção dos materiais, se mostrando como algo benéfico para a produção de concretos permeáveis.

Palavras-chave: consumo de cimento, concreto permeável, adição de areia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento de concreto permeável	7
Figura 2 - Peças de concreto com juntas alargadas	12
Figura 3 - Peças de concreto com áreas vazadas	12
Figura 4 - Peças de concreto permeável.....	13
Figura 5 - Placas de concreto permeável.....	13
Figura 6 - Concreto permeável moldado <i>in loco</i>	14
Figura 7 - Aparência típica do concreto permeável	16
Figura 8 - Comparação entre o concreto convencional e o concreto permeável	16
Figura 9 - Resultados dos ensaios: estudo de Filho <i>et al.</i> (2019).....	17
Figura 10 - Fluxograma da metodologia adotada.....	31
Figura 11 - Brita 0 utilizada no concreto permeável	32
Figura 12 - Granulometria do agregado miúdo.....	33
Figura 13 - Granulometria do agregado graúdo	34
Figura 14 - Vibrador mecânico para teste de drenagem da pasta.....	36
Figura 15 - Teste de drenagem de pasta para a/c de 0,30	37
Figura 16 - Teste de drenagem de pasta para a/c de 0,32	37
Figura 17 - Teste de drenagem de pasta para a/c de 0,34	38
Figura 18 - Ensaio para definição do ICp antes do abatimento.....	44
Figura 19 - Ensaio para definição do ICp após o abatimento.....	44
Figura 20 - Molde utilizado para fabricação das peças	47
Figura 21 - Ensaio de infiltração das peças de concreto permeável	49
Figura 22 - Padrão de capeamento com pasta de cimento.....	49
Figura 23 - Porosidade média no estado fresco.....	50
Figura 24 - Grau de compactação efetivo dos traços.....	51
Figura 25 – Massa específica média no estado fresco dos traços	52
Figura 26 - Porosidade média no estado endurecido.....	53
Figura 27 – Massa específica média no estado endurecido	53
Figura 28 - Taxa de infiltração média das misturas.....	54
Figura 29 – Resistência média à compressão dos concretos	55
Figura 30 - Consumo de cimento real dos traços.....	59
Figura 31 - Relação entre o consumo de cimento dos traços com a resistência gerada	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos para permeabilidade de peças de concreto permeável	20
Tabela 2 - Demais requisitos mínimos referentes a peças de concreto permeável ..	21
Tabela 3 - Características das misturas e resultados dos ensaios: estudo de Ibrahim <i>et al.</i> (2014)	23
Tabela 4 - Características das misturas e resultados dos ensaios: estudo de Tavares e Kazmierczak (2016)	24
Tabela 5 - Características das misturas e resultados dos ensaios: estudo de Pieralisi <i>et al.</i> (2020)	25
Tabela 6 - Ensaio para caracterização do agregado miúdo	32
Tabela 7 - Caracterização física do agregado miúdo	33
Tabela 8 - Ensaio para caracterização do agregado graúdo	33
Tabela 9 - Caracterização física do agregado graúdo.....	34
Tabela 10 - Descrições dos parâmetros utilizados no método do Grau de Compactação	35
Tabela 11 - Dados de entrada e traço piloto de referência	40
Tabela 12 - Teste de compactação para o traço piloto de referência.....	42
Tabela 13 - Resultados do ensaio para ajuste de consistência da pasta	45
Tabela 14 - Traços de concreto permeável definidos pelo método do Grau de Compactação	46
Tabela 15 - Ensaio para caracterização das lajotas de concreto permeável no estado endurecido.....	48
Tabela 16 - Consumos reais obtidos.....	58
Tabela 17 - Intensidade de consumo de cimento.....	60
Tabela 18 - Caracterização física das peças de concreto permeável	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	8
1.1.1	Objetivo geral	8
1.1.2	Objetivos específicos	8
1.2	JUSTIFICATIVA	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS DE CONCRETO	11
2.1.1	Tipos de pavimentos permeáveis de concreto	11
2.1.2	Vantagens dos pavimentos permeáveis.....	14
2.2	CONCRETO PERMEÁVEL	15
2.2.1	Resistência mecânica	17
2.2.2	Permeabilidade	18
2.2.3	Dimensão dos poros	19
2.2.4	Durabilidade	19
2.2.5	Requisitos mínimos para peças de concreto permeável.....	20
2.2.6	Eficiência das misturas quanto ao consumo de cimento.....	21
2.2.7	Adição de agregado miúdo	26
2.2.8	Relação água/cimento.....	27
2.2.9	Método de dosagem proposto por Nguyen <i>et al.</i> (2014)	28
2.2.10	Método de dosagem proposto pelo American Concrete Institute (2010)	29
2.2.11	Método de dosagem proposto por Mikami (2022)	29
3	METODOLOGIA	31

3.1	MATERIAIS UTILIZADOS E CARACTERIZAÇÕES	32
3.2	DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	34
3.2.1	Definição da relação água/cimento	35
3.2.2	Definição do traço piloto e teste de compactação	38
3.2.3	Dosagem de aditivo superplastificante.....	42
3.2.4	Definição dos traços de concreto permeável	45
3.3	PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	46
3.3.1	Moldagem dos corpos de prova	46
3.3.2	Cura	47
3.4	CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO PERMEÁVEL.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO.....	50
4.2	POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO ENDURECIDO	52
4.3	TAXA DE INFILTRAÇÃO.....	54
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	55
4.5	CONSUMO DE CIMENTO	57
4.6	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	60
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS.....	64

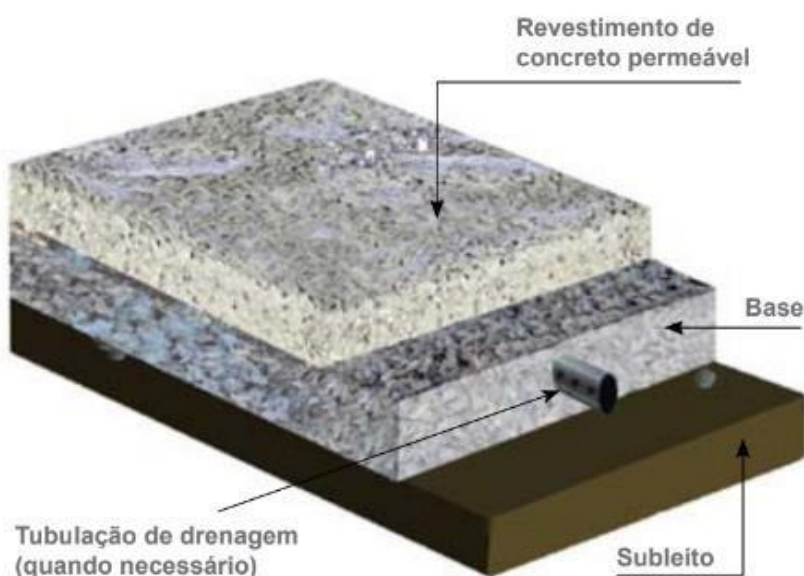
1 INTRODUÇÃO

A NBR 16416 (ABNT, 2015) define o pavimento permeável como um elemento para suporte de tráfegos leves ao mesmo tempo que possui a capacidade de escoar água em seu interior, reduzindo o escoamento superficial sem danificar a estrutura.

Entre todos os materiais para compor os pavimentos permeáveis destaca-se o concreto permeável, sendo o mais utilizado dentre os demais (ACI, 2010). O concreto permeável se apresenta como um material poroso, sendo sua permeabilidade resultante de seus vazios comunicantes, responsáveis pela criação de um canal para o escoamento de líquido em seu interior (CHANDRAPPA, 2016; IBRAHIM, 2014).

Em geral, como mostrado na Figura 1, a estrutura típica de um pavimento de concreto permeável é composta pelo revestimento de concreto permeável em si, que deve garantir capacidade de infiltração da água por sua estrutura, a base, que em geral deve possuir certo coeficiente de vazios que também permita a percolação da água por sua estrutura, e a utilização de drenos, que permitem a captação da água infiltrada no pavimento, sendo condicionados pelo tipo de sistema projetado em função das características do projeto e particularidades do subleito, por exemplo (MARCHIONI *et al.*, 2013).

Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento de concreto permeável



Fonte: Marchioni *et al.*, 2013.

O traço do concreto permeável geralmente é dado em massa de agregado graúdo e cimento (relação g/c), pois costumeiramente não é usado agregado miúdo na composição do material, ficando essas relações em torno de 4,0 a 4,5. (TENNIS *et al.*, 2004). Segundo Debnath e Sarkar (2018), a relação água/cimento é importante para que a pasta possua consistência adequada, de modo que sua fluidez permita uma distribuição uniforme entre os agregados, ao mesmo tempo que não escoe demasiadamente entre os grãos e gere entupimento dos poros do material. Dessa forma, a dosagem é uma etapa crucial para o desenvolvimento desse material, sendo necessário grande precisão em tal processo para que as características básicas do concreto permeável sejam atingidas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Propor a otimização do consumo de cimento Portland de misturas de concreto permeável para a produção de peças de pavimentação por meio da dosagem de agregado miúdo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Testar diferentes teores de agregados miúdos nas misturas de concreto permeável, visando sempre manter a porosidade constante;
- Verificar a influência da adição de areia nas propriedades de permeabilidade e resistência à compressão do concreto permeável;
- Estabelecer uma relação entre a adição de areia incorporada à mistura e a resistência à compressão das peças de concreto permeáveis ensaiadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os centros urbanos possuem uma taxa de impermeabilização do solo elevada em decorrência dos materiais empregados para substituição da geografia natural. Contudo, para que se tenha eficiência quanto a essas ações, é necessário um sistema de drenagem urbano de boa qualidade, preparado para conduzir as

águas pluviais deste cenário urbanizado. Entretanto, esse fato muitas vezes não é planejado corretamente, acarretando desvios hidrológicos do sistema e, conseqüentemente, gerando enchentes e alagamentos para diversas populações (LAMB, 2014).

Uma das alternativas plausíveis para ajudar na solução dos problemas de drenagem urbana são os pavimentos permeáveis, que tem por finalidade promover a infiltração da água precipitada através de sua estrutura ou arranjo, permitindo assim um maior controle sobre as enchentes (MARUYAMA; FRANCO, 2016).

O concreto permeável vem sendo um destaque entre esses pavimentos, com seu uso permitindo a junção entre a drenagem eficiente e o desenvolvimento de algumas infraestruturas urbanas, pois anula o indesejado escoamento superficial e promove o desejado escoamento subsuperficial, contribuindo com uma drenagem urbana mais eficiente (LAMB, 2014).

Para que se atinja, no concreto permeável, propriedades adequadas de porosidade e vazios conectados ao mesmo tempo que seja suprida a demanda resistiva das solicitações do ambiente, é necessária a utilização de uma quantidade elevada de cimento Portland, sendo que o consumo desse material pode variar, em geral, entre 270 a 415kg/m³ para sua confecção (ACI, 2010). Dessa maneira, o alto consumo do componente torna-se um dos principais empecilhos para a implementação dessa tecnologia nas infraestruturas de drenagem urbana (TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016).

O cimento é um insumo gerado pela indústria, com emissão de gás carbônico (CO₂) durante sua produção, contribuindo assim para o efeito estufa (QUEIROZ, 2018). A emissão de CO₂ para a produção de cimento se dá pelo consumo de carvão, sendo que, para produção de uma tonelada de cimento, o valor consumido de carvão gira em torno de 220kg. Então, antes do material ser utilizado para a construção já há uma poluição envolvida (FONSECA, 2020). Em termos de consumo energético, a produção por tonelada de cimento pode chegar em valores de 800 kWh, esses valores mudam por diversos fatores conforme se altera a tecnologia usada nas fábricas ou sua localização, mas a emissão de CO₂ é comum à todas elas (NEVILLE, 2016).

O elevado teor emitido de CO₂ é referente a fase de produção do clínquer, sendo que 63% são decorrentes do processo de calcinação embutido nessa fase,

36% são decorrentes da queima de combustíveis e 1% é decorrente da matriz energética utilizada (VISEDÒ; PECCHIO, 2019).

Consequentemente, nas situações em que o consumo de cimento seja substituído por um elemento que acarrete menores danos ao meio ambiente, também haverá preservação ambiental. Ainda, como já mencionado, o concreto permeável possui um elevado consumo de cimento, então trocar uma parte da sua composição por areia contribuiria com a preservação ambiental.

Os vazios interconectados do concreto permeável são a causa de sua capacidade de escoamento interno, sendo necessário para obtenção de tal característica a eliminação ou redução expressiva do agregado miúdo, junto do emprego de baixas relações água/cimento (a/c). Há uma escassez de estudos visando a implementação de agregados miúdos em traços de concreto permeável, e sobre como isso reduziria os danos ambientais gerados em função da diminuição do uso de cimento, acarretando redução dos custos para execução do material, tornando-o mais viável e vantajoso, seja por utilizar camadas mais finas do material ou apenas por reduzir o custo do traço.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS DE CONCRETO

A NBR 16416 (ABNT, 2015) trata o pavimento permeável como um elemento que atende tanto às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, como também permite a percolação e/ou acúmulo temporário de água, almejando diminuir o escoamento superficial. Dessa forma, nota-se uma mistura entre as preocupações do material ser permeável ao mesmo tempo que atenda as solicitações de carga impostas pelo uso.

Segundo a ACI-522R (ACI, 2010) há diversos usos para os pavimentos de concreto permeáveis, tais como: estacionamentos; camadas rígidas de drenagem sob áreas externas de shoppings; pisos de estufa para manter o piso livre de água parada; aplicações de paredes estruturais onde são exigidas características de leveza ou melhor isolamento térmico, ou ambas; pavimentos, paredes e pisos onde se desejam melhores características de absorção acústica; base para ruas, estradas, calçadas e aeroportos; campo de superfície para parques e campos de tênis; decks de piscinas; leitos de lodo da estação de tratamento de esgoto; revestimentos de paredes para poços de água.

Conforme citado, pode-se perceber que grande parte desses usos se incluem dentro dos aspectos de infraestrutura de drenagem e conectam-se com o conceito de drenagem urbana. Os centros urbanos possuem problemas de enchentes gerados justamente pela insuficiência dessas estruturas drenantes, de modo que o sistema não suporte todo o escoamento (CHRISTOFIDIS *et al.*, 2019).

2.1.1 Tipos de pavimentos permeáveis de concreto

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) os pavimentos permeáveis de concreto devem garantir a percolação de toda água precipitada sobre as áreas revestidas pelo pavimento permeável, bem como de toda água precipitada sobre as áreas impermeáveis de contribuição consideradas em projeto. São alguns exemplos de revestimentos permeáveis as peças de concreto com juntas alargadas, as peças de concreto com áreas vazadas, as peças de concreto permeável, as placas de concreto permeável, e o revestimento de concreto permeável moldado *in loco*.

Para peças de concreto com juntas alargadas, a percolação da água que incide sobre o pavimento ocorre através das juntas formadas entre as peças de concreto, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Peças de concreto com juntas alargadas



Fonte: Marchioni e Silva, 2011.

Para as peças de concreto com áreas vazadas, a percolação da água que incide sobre o pavimento ocorre através de áreas vazadas presentes nas próprias peças de concreto, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Peças de concreto com áreas vazadas



Fonte: Virgillis, 2009.

Quanto as peças de concreto permeável, a percolação da água que incide sobre o pavimento ocorre através dos próprios poros do concreto que compõem a peça, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Peças de concreto permeável



Fonte: Adaptado de Coelho e Rocha, 2019

Para as placas de concreto permeável (Figura 5) o funcionamento é idêntico, apenas com variação nas dimensões do componente. Uma peça é definida como um componente que apresenta relação entre comprimento e espessura, chamado índice de forma, menor ou igual a 4. Para as placas, o índice de forma deve ser maior que 4.

Figura 5 - Placas de concreto permeável



Fonte: Adaptado de Castro, 2011.

Para o concreto permeável moldado *in loco*, a percolação da água que incide sobre o pavimento ocorre através dos próprios poros do concreto, que por sua vez é moldado no local de sua utilização, conforme mostrado na Figura 6, diferenciando-o dos outros casos em que se tratava de componentes pré-moldados.

Figura 6 - Concreto permeável moldado *in loco*



Fonte: Marchioni e Silva, 2011.

2.1.2 Vantagens dos pavimentos permeáveis

Segundo Pinto (2011), são algumas vantagens dos pavimentos permeáveis a possibilidade de recarga do lençol freático, a melhoria na qualidade das águas que incidem sobre o pavimento, o amortecimento dos picos de cheia com redução do escoamento superficial, e economia de custos em função da diminuição ou dispensa de demais dispositivos de drenagem urbana, deixando explícita a importância e representatividade do uso de pavimentos permeáveis para questões de sustentabilidade e drenagem urbana em geral.

Marchioni *et al.* (2013) destacam o objetivo da utilização de pavimentos permeáveis como sendo a diminuição do escoamento superficial de uma referida área. Os autores ainda citam a grande efetividade na diminuição do escoamento superficial de áreas revestidas por pavimentos permeáveis bem dimensionados, podendo apresentar condições favoráveis à drenagem urbana superiores à de áreas cobertas por vegetação, mas que possuam parte de seu solo compactado, por exemplo.

Tennis *et al.* (2004) citam que áreas cobertas por pavimentos impermeáveis podem ser contaminadas por substâncias danosas, como óleo automotivo por exemplo, havendo possibilidade de serem carregados para corpos hídricos através do escoamento superficial gerado por precipitações, algo prejudicial ao meio ambiente. Segundo os autores, o uso de pavimentos permeáveis de concreto permite uma espécie de filtragem da água precipitada através de sua captação, permitindo uma redução eficiente da carga de poluentes contida nessas águas e conseqüente melhoria da qualidade da água infiltrada, promovendo também o abastecimento das águas subterrâneas, redução do escoamento superficial e incidência de enchentes. Ainda, os autores citam outro benefício ambiental no uso de pavimentos permeáveis de concreto, a redução dos efeitos de ilhas de calor, que ocorre em função da menor absorção de radiação pelos pavimentos permeáveis de concreto, devido sua coloração mais clara, e do menor armazenamento de calor na estrutura do pavimento, devido sua estrutura porosa, promovendo maior conforto térmico ao ambiente.

2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é definido como um material de estrutura porosa, onde sua composição possibilita a formação de vazios interconectados que permitem a passagem de água por sua estrutura. Em geral, o concreto permeável apresenta porosidade variando entre 15 e 35%, resistência à compressão variando entre 2,8 e 28 MPa, e coeficiente de permeabilidade variando entre 0,14 e 1,22 cm/s, ficando os valores condicionados ao tamanho dos agregados e densidade da mistura (ACI, 2010). A aparência típica do concreto permeável endurecido pode ser vista na Figura 7 .

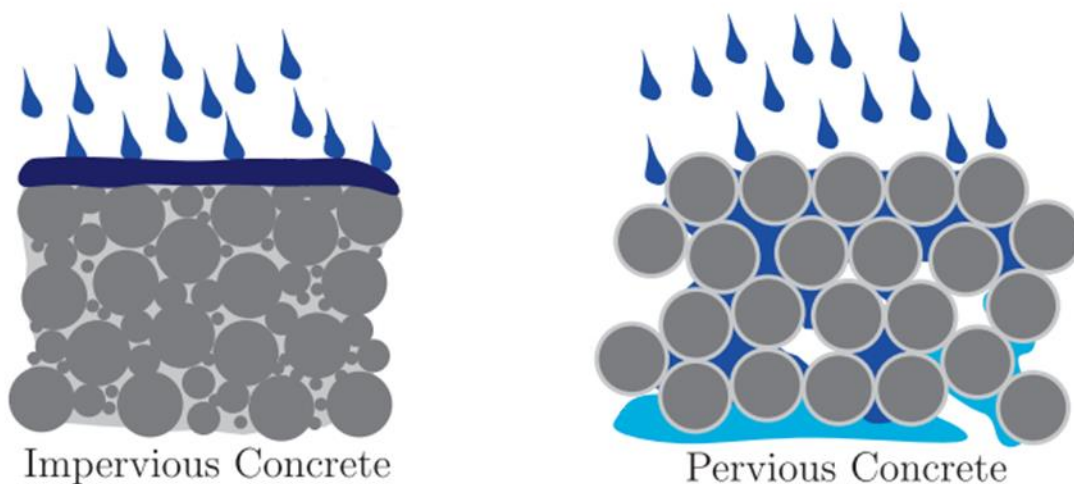
Figura 7 - Aparência típica do concreto permeável



Fonte: Strzoda *et al.*, 2017.

De acordo com a Figura 8 pode-se notar que, em concretos convencionais, sua estrutura apresenta-se de forma compacta, com baixo índice de vazios, resultando dessa maneira em um material de baixa permeabilidade. Em relação ao concreto permeável, suas características referentes à formação de vazios interconectados permitem a infiltração de água por sua estrutura, resultando assim em um material permeável.

Figura 8 - Comparação entre o concreto convencional e o concreto permeável



Fonte: Zhong e Wille, 2015.

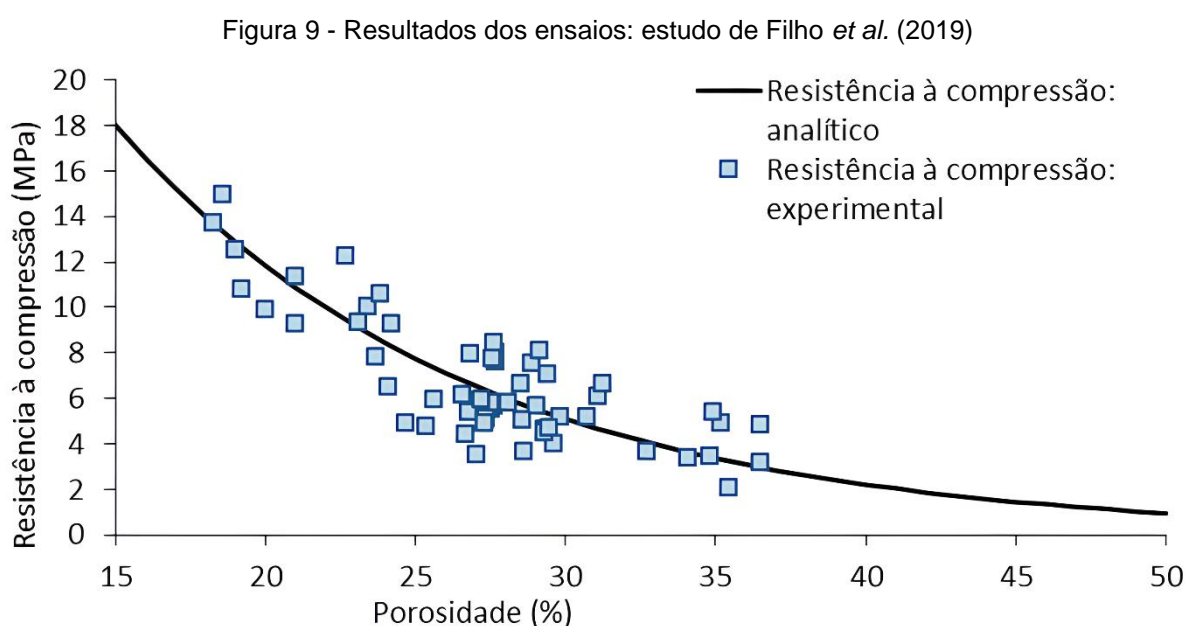
Segundo o relatório ACI-522R (ACI, 2010), o concreto permeável é composto por uma mistura entre cimento Portland, agregado graúdo e água, pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo, e possibilidade de uso de aditivos que

forneçam características importantes ao material, como maior resistência mecânica e maior fluidez para o concreto no estado fresco, por exemplo, sendo os aditivos usados conforme a necessidade perante cada situação. De acordo com Ibrahim *et al.* (2014), em geral, descarta-se o uso de agregado miúdo, comumente a areia, na composição do concreto permeável, implicando em consequências como, por exemplo, a diminuição de sua trabalhabilidade quando comparado aos concretos convencionais.

2.2.1 Resistência mecânica

A resistência à compressão é influenciada pela proporção adotada na mistura e pelo esforço de compactação feito durante a execução, havendo uma relação entre a resistência à compressão e a massa específica do material (ACI, 2010). Ainda, segundo o relatório ACI-522R (ACI, 2010) a propriedade que mais influencia na resistência à compressão do concreto permeável é a porosidade, sendo essa inversamente proporcional a resistência à compressão do material.

Os estudos realizados por Filho *et al.* (2019) corroboram com a ideia da ACI, pois com os resultados obtidos do ensaio sendo comparados graficamente na Figura 9, pode-se notar uma clara tendência de diminuição da resistência à compressão conforme a porosidade é aumentada.



Fonte: Filho *et al.*, 2019

A resistência à compressão do concreto permeável pode variar entre 3,5 e 28 MPa, mas os valores típicos para o material se encontram em torno de 17 MPa (TENNIS *et al.*, 2004).

Segundo o relatório ACI 522-R (ACI, 2010), a resistência à flexão apresenta uma relação direta com a resistência à compressão e, conseqüentemente, a porosidade também influencia de modo significativo e inversamente proporcional, da mesma forma que ocorre com a resistência à compressão. Como descrito no relatório, com a adição de 5% de agregado miúdo nas misturas de concreto permeável as resistências aumentaram, porém comprometendo demasiadamente a porosidade do material, podendo desconectar seus poros, os quais são justamente a causa de sua permeabilidade. A resistência à flexão, em geral, pode variar entre 1,0 e 3,8 MPa, suprimindo a necessidade para grande parte de suas utilizações (TENNIS *et al.*, 2004).

Segundo Xie (2020), a resistência à compressão é intimamente ligada a espessura de pasta de cimento que envolve o agregado, também há uma relação entre a resistência do agregado graúdo com a resistência de modo que quanto mais resistente seja o agregado mais resistente o concreto se torna.

2.2.2 Permeabilidade

A permeabilidade é gerada pelos vazios comunicantes entre os poros, por isso, porosidade e permeabilidade são diretamente proporcionais, especialmente nos casos em que os poros do material estão conectados, pois é nesses casos em que é formada uma passagem, possibilitando o escoamento da água através do material (SALES, 2008).

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) a permeabilidade mínima para um pavimento permeável é de 0,1 cm/s. O NCPTC (2006) afirma que o concreto poderá ser considerado drenante caso a permeabilidade seja superior a 0,0254 cm/s. Segundo Sales (2008), uma porosidade comunicante entre 20% e 29% já fornece uma permeabilidade de 0,1 cm/s.

2.2.3 Dimensão dos poros

O tamanho dos poros é outro fator muito importante para esse material apresentar funcionalidade, pois uma estrutura de poros bem aberta diminui de modo considerável a chance de colmatação desses vazios, o que aumenta a durabilidade do material ao passo que espaça os intervalos de manutenção necessários à estrutura. Conforme há um aumento nas dimensões do agregado graúdo, há também um aumento da porosidade (ACI, 2010).

Segundo Rocha e Coelho (2019), foi constatado um aumento de 5% da porosidade ao variar as dimensões do agregado graúdo de 2,36-4,75 mm para 12,5-19,00 mm. Ainda, para essa mesma variação, foi obtido um aumento de 18% da permeabilidade do material, o que indica que a relação entre porosidade e permeabilidade não é linear. O motivo apontado para esse resultado foi o diâmetro dos poros, pois quanto maiores são os diâmetros, menores serão as perdas de energia.

De acordo com a ACI 522-R (ACI, 2010), os poros interconectados do material são os responsáveis pela sua permeabilidade, com o relatório apontando que 15% de porosidade é o mínimo exigido para que haja conexão entre eles, gerando assim uma permeabilidade razoável.

2.2.4 Durabilidade

A durabilidade do material, dentre outras coisas, também é impactada pelo ambiente em que a infraestrutura foi construída. Por exemplo, temperaturas muito elevadas ou ataques químicos de ácidos ou sulfetos geram grandes desgastes ao material (ACI, 2010).

Os ataques por sulfatos já são um problema para o concreto convencional, sendo ainda pior em relação ao concreto permeável, pois devido a sua granulometria aberta há um contato maior do material com essas composições químicas (TENNIS *et al.*, 2004).

É importante levar em consideração a resistência à abrasão do material, pois o desgaste causado pelo atrito gerado pelo tráfego pode causar danos à estrutura, através do descolamento dos agregados graúdos do cimento, de modo que obstrua os poros, e com eles obstruídos não ocorrerá a passagem de fluidos por sua

estrutura durante sua vida útil, conseqüentemente, destruindo a premissa de um pavimento permeável, e tornando-se um problema do ponto de vista da durabilidade (TENNIS *et al.*, 2004).

2.2.5 Requisitos mínimos para peças de concreto permeável

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), as peças de concreto permeável devem obrigatoriamente cumprir certas especificações relacionadas ao coeficiente de permeabilidade, espessura mínima e resistência mecânica do componente, além de questões quanto a inspeção visual e avaliação dimensional. Quanto aos elementos de concreto permeável, os requisitos são demonstrados na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Requisitos para permeabilidade de peças de concreto permeável

Tipo de Revestimento	Método de ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído (m/s)
	Local de avaliação		
	Laboratório	Em campo	
Peça de concreto permeável	Permeâmetro de carga constante ou anel de infiltração	Anel de infiltração	$> 10^{-3}$
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado <i>in loco</i>			

Fonte: Adaptado de ABNT, 2015.

Com base na Tabela 1, define-se para as peças de concreto permeável o valor mínimo referente ao coeficiente de permeabilidade de 10^{-3} m/s ou 0,1 cm/s. Já com a Tabela 2, define-se os valores referentes a espessura mínima das peças de concreto permeável, sendo de 60 mm para uma solicitação de tráfego de pedestres e 80 mm para uma solicitação de tráfego leve, e o valor mínimo de resistência à compressão, sendo de 20 MPa.

Tabela 2 - Demais requisitos mínimos referentes a peças de concreto permeável

Tipo de Revestimento	Tipo de Solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência Mecânica característica
Peças de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 20 MPa (Resistência à compressão)
	Tráfego leve	80	
Placas de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 2 MPa (Resistência à flexão)
	Tráfego leve	80	
Concreto permeável moldado <i>in loco</i>	Tráfego de pedestres	60	≥ 1 MPa (Resistência à tração na flexão)
	Tráfego leve	100	≥ 2 MPa (Resistência à tração na flexão)

Fonte: Adaptado de ABNT, 2015.

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), a inspeção visual e avaliação dimensional das peças de concreto permeável estão condicionadas ao cumprimento dos seguintes requisitos:

- Apresentação de aspecto homogêneo com arestas regulares e ângulos retos, sem ocorrência de rebarbas, defeitos, delaminação ou descamação do concreto.
- Arestas regulares nas duas faces e nas paredes laterais.
- Apresentação de espessura com medida nominal mínima igual ou superior ao especificado na Tabela 2, podendo ser especificadas em projeto medidas superiores com múltiplos de 20 mm.
- Tolerância dimensional para todas as dimensões de mais ou menos 3 mm em relação às respectivas medidas nominais.

2.2.6 Eficiência das misturas quanto ao consumo de cimento

O trabalho de Ibrahim *et al.* (2014), desenvolvido nos Estados Unidos, estudou as propriedades de 24 misturas de concreto permeável, variando parâmetros referentes ao tamanho do agregado graúdo, relação água cimento, consumo de cimento Portland e volume de agregado graúdo. No estudo em questão, foram utilizados agregados graúdos de calcário de dimensão 4,5, 9,5 e 12,5 mm,

usados de forma individual ou combinados em uma proporção 50/50, cimento Portland tipo I e relação água cimento de 0,30, 0,35 e 0,40.

Na Tabela 3, foram demonstradas as características das misturas que tinham como parâmetro de avaliação o consumo de cimento Portland, avaliando os consumos de 150 kg/m³ e 250 kg/m³, e o volume de agregado graúdo, onde também foram variados os consumos de cimento Portland da mesma maneira citada anteriormente. Para os dois casos de avaliação, a relação água/cimento foi mantida a mesma, com valor de 0,35. Para o caso que o parâmetro de avaliação foi o consumo de cimento Portland, o consumo de agregado graúdo foi de 1800 kg/m³, e para o caso que o parâmetro de avaliação foi o volume de agregado graúdo, seu consumo foi de 1500 kg/m³. Nos dois casos avaliados, o efeito da variação do consumo de cimento Portland pôde ser verificado.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ASTM C496 (ASTM, 2011), através da moldagem de corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, rompidos aos 28 dias de idade. O valor adotado foi obtido através da média entre 3 corpos de prova. O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizado com o uso de um permeâmetro de carga constante e corpo de prova idêntico ao utilizado no ensaio de resistência à compressão.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, demonstrados na Tabela 3, percebe-se que para os pares de misturas que utilizavam o mesmo tamanho de agregado, porém variando o consumo de cimento entre 150 e 250 kg/m³, a resistência à compressão obtida foi maior quando aumentado o consumo de cimento Portland. Contudo, para os maiores valores de consumo de cimento, os valores referentes a porosidade e coeficiente de permeabilidade tiveram certa redução quando comparados as misturas com menores consumos de cimento. Os autores analisaram que, em geral, o aumento da resistência à compressão provoca diminuição na porosidade, e essa, por sua vez, promove diminuição do coeficiente de permeabilidade.

Tabela 3 - Características das misturas e resultados dos ensaios: estudo de Ibrahim *et al.* (2014)

Misturas	Dimensão agregado graúdo (mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Agregado Graúdo (kg/m ³)	a/c	fc (MPa)	K (m/s)	P (%)
PC13	9,5	150	1800	0,35	1,16	0,0224	40
PC14	12,5	150	1800		1,06	0,0282	40
PC15	9,5 + 12,5	150	1800		1,83	0,0243	38
PC16	9,5	250	1800		4,76	0,0163	35
PC17	12,5	250	1800		3,07	0,0241	37
PC18	9,5 + 12,5	250	1800		3,45	0,0202	36
PC19	9,5	150	1500		1,71	0,0211	38
PC20	12,5	150	1500		1,67	0,0275	38
PC21	9,5 + 12,5	150	1500		1,71	0,0218	38
PC22	9,5	250	1500		6,95	0,0150	30
PC23	12,5	250	1500		5,14	0,0158	32
PC24	9,5 + 12,5	250	1500		6,45	0,0184	31

Fonte: Adaptado de Ibrahim *et al.*, 2014.

Notas: a/c – Relação água/cimento; fc – Resistência à compressão; K – Coeficiente de permeabilidade; P – Porosidade.

O estudo de Tavares e Kazmierczak (2016) buscou comparar a influência do uso de agregados reciclados e agregados comuns em concretos permeáveis, analisando propriedades como resistência à compressão e coeficiente de permeabilidade. Pelo fato de terem sido analisadas misturas com diferentes consumos de cimento e agregados graúdos naturais, o estudo reforça a influência do consumo de cimento nas características do concreto permeável endurecido.

No estudo, os autores utilizaram brita de origem basáltica com diâmetro máximo característico de 19 mm, cimento Portland CP IV-32, consumo de agregado graúdo variando entre 1289 e 1628 kg/m³, consumo de cimento variando entre 336 e 539 kg/m³ e relação água/cimento de $0,3 \pm 0,03$. As características das misturas analisadas estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Características das misturas e resultados dos ensaios: estudo de Tavares e Kazmierczak (2016)

Misturas	Consumo de cimento (kg/m ³)	a/c	Agregado Graúdo (kg/m ³)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Coefficiente de permeabilidade (m/s)
AN – 330	336,00	0,32	1628,00	9,32	0,018
AN – 350	350,00	0,32	1400,00	11,91	0,015
AN – 400	398,00	0,33	1307,00	20,42	0,005
AN - 540	539,00	0,30	1289,00	19,43	0

Fonte: Adaptado de Tavares e Kazmierczak, 2016.

Nos ensaios de resistência à compressão, o estudo tomou como base a NBR 5739 (ABNT, 2007), com utilização de corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, rompidos aos 3, 7 e 28 dias de idade. O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizado com o uso de um permeâmetro de carga variável, de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000), e corpo de prova idêntico ao utilizado no ensaio de resistência à compressão.

Com base nos resultados obtidos no estudo em questão, demonstrados na Tabela 4, pode-se perceber que, com aumento do consumo de cimento, houve um acréscimo na resistência à compressão das misturas confeccionadas, sendo o maior valor obtido de 20,42 MPa referente a um consumo de cimento de 398 kg/m³. Ainda, o estudo demonstrou também um decréscimo no coeficiente de permeabilidade em função do aumento do consumo de cimento Portland, tendo seu valor igual a zero para a mistura AN – 540, fato justificado pelos autores devido ao elevado consumo de cimento, nesse caso, de 539 kg/m³, fazendo com que os exemplares dessa mistura não pudessem ser classificados como concreto permeável. O experimento demonstrou que há um limite na relação entre a quantidade de cimento usado e a resistência à compressão atingida, demonstrando que aumentar o consumo desse material não dá garantia de que a sua resistência aumentará.

O estudo de Perialisi *et al.* (2020) objetivou contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia simples de dosagem de concretos permeáveis baseada em suas propriedades finais, como porosidade, permeabilidade e resistência à compressão, além de outros. Dessa maneira, para atingir tal objetivo, os autores avaliaram as propriedades de interesse de 3 composições de concreto

permeável, variando o volume de pasta de cimento, permitindo assim uma avaliação quanto a influência do consumo de cimento Portland em tais propriedades.

No estudo, os autores utilizaram agregado graúdo de origem basáltica com dimensões variando entre 2,36 e 9,5 mm, cimento Portland CP V-ARI, relação agregado/cimento variando entre 2,79 e 3,53, relação pasta/agregados variando entre 0,38 e 0,48, e relação água/cimento de 0,34. Quanto aos ensaios realizados, foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos para cada mistura, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, compactados com auxílio de soquete Proctor. Para ensaio de resistência à compressão, o estudo tomou como base a NBR 5739 (ABNT, 2018), com os corpos de prova rompidos aos 28 dias de idade. O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizado com o uso de um permeâmetro de carga constante. As características das misturas do estudo de Pieralisi *et al.* (2020) podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características das misturas e resultados dos ensaios: estudo de Pieralisi *et al.* (2020)

Misturas	Consumo de cimento (kg/m ³)	Ag/c	a/c	Pa/Ag	Porosidade (%)	Permeabilidade (mm/s)	Resistência à compressão (MPa)
T038	382,26	3,53	0,34	0,38	24,48	4,18	8,16
T043	432,92	3,12		0,43	20,47	3,01	9,58
T048	484,97	2,79		0,48	15,91	1,67	11,34

Fonte: Adaptado de Pieralisi *et al.* (2020).

Notas: Ag/c – Relação agregado/cimento; a/c – Relação água/cimento; Pa/Ag – Relação pasta/agregados.

Com base nos resultados obtidos no estudo em questão, demonstrados na Tabela 5, pôde-se perceber que, com aumento do consumo de cimento, houve um acréscimo na resistência à compressão das misturas confeccionadas e diminuição da porosidade e permeabilidade. O maior valor obtido para resistência à compressão dos corpos de prova teve ocorrência na mistura T048, sendo de 11,34 MPa, com permeabilidade para esse caso de 1,67 mm/s e porosidade de 15,91%, sendo os valores referentes a um consumo de cimento de 484,97 kg/m³.

2.2.7 Adição de agregado miúdo

Em misturas de concreto permeável é comum a exclusão do agregado miúdo, para manter a porosidade do material ao mesmo tempo em que o cimento é o maior contribuinte para o aumento da resistência mecânica. Substituindo a areia pelo cimento no traço, sem o controle da porosidade da mistura de concreto permeável, a tendência é uma redução da permeabilidade e aumento da resistência mecânica à compressão, sendo esses os resultados dos trabalhos de França e Costa (2021), Bonicelli *et al.* (2015) e Manan *et al.* (2020).

As pesquisadoras França e Costa (2021), em seu trabalho, compararam traços de concreto permeável com e sem adição de areia. Os testes nos traços sem incorporação de areia demonstraram porosidade de 30,47%, índice de permeabilidade de 3,46 cm/s e resistência característica à compressão de 11,51 MPa. Porém, incorporando 10% de areia do peso total dos agregados, os resultados se demonstraram benéficos para o material, resultando em uma porosidade de 24,24%, índice de infiltração de 2,28 cm/s e resistência característica à compressão de 14,57 MPa. Nota-se que os valores de resistência à compressão não atingiram o mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), mas o traço com areia se aproximou mais do valor exigido do que o traço sem a areia. Quanto aos índices de permeabilidade obtidos, os valores referentes aos dois casos se mostraram maiores do que o mínimo exigido nesta norma.

O estudo de Bonicelli *et al.* (2015) aborda o tema de adição de areia nos traços de concreto permeável, sendo descritos ensaios realizados com três traços diferentes, com substituição de 5% e de 10% do peso de agregado por areia dentro de cada um dos três traços, totalizando nove traços diferentes. Para realização dos ensaios, foram formadas 360 amostras em formato cilíndrico e placas de 40x20 cm para testes de resistência à abrasão. A conclusão dos autores é de que a adição de areia melhora as respostas do concreto permeável as tensões solicitantes, tanto nos aspectos de tração quanto de rigidez, e atribuem isso a uma cobertura mais espessa de pasta de cimento sobre os agregados. Por outro lado, os valores de permeabilidade foram reduzidos.

Por sua vez, os pesquisadores Manan *et al.* (2018) moldaram três corpos de prova de concreto permeável com diversos traços, iniciando com o traço de 1:1,68:2,63, sendo os materiais cimento, agregado miúdo e agregado graúdo,

respectivamente, e reduziram a fração de agregados finos em 10% do valor inicial a cada traço do ensaio. Consequentemente, o traço final foi 1:0:2,63, mantendo a relação a/c de 0,69 ao longo de todos os 10 traços. O primeiro traço, com maior quantidade de agregado miúdo, demonstrou uma resistência de (21,01 MPa aos 28 dias, por outro lado, o último traço, o qual não continha areia, demonstrou uma resistência média de 11,29 MPa aos 28 dias. Em relação a taxa de infiltração, os traços com maiores relações de agregado miúdo se demonstraram impermeáveis até redução de 40% do agregado miúdo, correspondendo ao traço 1:1,008:2,63. Desse traço em diante, o material se demonstrou permeável. A taxa de infiltração do traço 1:0,84:2,63 foi de 0,246 cm/s, e o traço sem agregado miúdo obteve o valor de 0,918 cm/s.

A areia possui a característica higroscópica, e por consequência é sempre interessante ajustar a quantidade de água inserida na execução do concreto para respeitar relação a/c prevista no traço. Outra consequência dessa característica é a situação em que a areia está muito seca e utiliza a água de amassamento presente no traço durante o processo de hidratação do cimento, tornando possível a ocorrência de alterações nas proporções dos materiais utilizados na mistura (BAUER, 2008).

2.2.8 Relação água/cimento

A proporção água/cimento na dosagem é um parâmetro de grande importância, permitindo o correto cobrimento dos agregados pela pasta de cimento. Relações muito baixas promovem má distribuição da pasta de cimento em torno dos agregados, se aglomerando entre as próprias partículas. O pouco fornecimento de água para a pasta também pode afetar as reações de hidratação do cimento do material, pois o aglomerante precisa de uma quantidade de água para atingir algum grau de resistência. Por outro lado, se a relação água/cimento for muito elevada, a pasta perde a adesão com o agregado e escorre para camadas inferiores do material, devido sua alta fluidez, gerando tamponamento excessivo dos poros interconectados e conseqüente redução da permeabilidade (ACI, 2010; DEBNATH; SARKAR, 2018).

De acordo com o relatório ACI-522R (ACI, 2010), os valores rotineiros de relação água/cimento para misturas de concreto permeável ficam em torno de 0,26 e

0,45. Já segundo os autores Debnath e Sarkar (2018), a relação água/cimento das misturas costuma se enquadrar dentro dos parâmetros de 0,25 a 0,40.

2.2.9 Método de dosagem proposto por Nguyen *et al.* (2014)

Com base no estudo de Nguyen *et al.* (2014), o método de dosagem de concretos permeáveis proposto pelos autores apresenta a utilização de um coeficiente “k”, que relaciona o tamanho de cada partícula e a espessura da camada da pasta de cimento que envolve os agregados, um parâmetro “a”, referente a fração de partículas superiores a 80 μm , e um parâmetro “b”, referente à quantidade de água retida no agregado.

Dessa maneira, Nguyen *et al.* (2014) adotaram certas hipóteses em seu estudo referentes a consideração do agregado com formato esférico, a proporcionalidade entre a espessura da camada de pasta que recobre os agregados e suas dimensões, e a composição ideal da mistura sendo satisfeita quando a pasta de cimento que recobre os agregados proporcionar ao concreto devida resistência mecânica, e a composição permitir a formação de vazios livres para passagem de água. Ainda, de acordo com os autores, o cálculo do volume de pasta do concreto pode ser feito em função do coeficiente “k” e da porosidade de projeto assumida. No método de dosagem em questão, a obtenção da relação água/cimento se baseia na escolha de um valor máximo no qual não ocorra escoamento da pasta através dos poros do concreto, sendo definido através de um ensaio com diferentes relações água/cimento, onde uma peneira preenchida com concreto permeável é vibrada por 15 segundos, avaliando, após o tempo de vibração, a ocorrência de escoamento da água através da peneira.

O método de Nguyen *et al.* (2014), apesar de apresentar uma metodologia para definição da relação água/cimento, não é claro sobre a adoção de diferentes valores do coeficiente “k”, sendo, no estudo, estimado através de testes experimentais realizados pelos autores, gerando, dessa forma, certa limitação quanto a repetição do uso desse valor em outras situações.

2.2.10 Método de dosagem proposto pelo American Concrete Institute (2010)

O método de dosagem de concretos permeáveis proposto pelo American Concrete Institute, no relatório ACI-522R (ACI, 2010), é baseado na utilização da relação “ b/b_o ”, onde “ b ” representa o volume dos agregados utilizados na mistura, e “ b_o ” a capacidade desse volume de agregados, e a utilização de ábacos para determinação do volume de pasta de cimento da mistura, a partir de um valor estipulado de porosidade e do nível de compactação empregado.

Dessa maneira, o relatório em questão permite a definição da relação “ b/b_o ” através de valores tabelados, que variam em função da faixa granulométrica dos agregados, e da porcentagem de agregados miúdos adotada. Com a adoção da relação “ b/b_o ” é definido o volume de agregados e, em seguida, através do ábaco disponibilizado, define-se o volume da pasta de cimento, que por sua vez permite a definição do consumo de cimento e água da mistura. Na metodologia em questão não é apresentado nenhum método para definição da relação água/cimento, diferentemente do método proposto por Nguyen *et al.* (2014).

Ainda, a metodologia proposta pelo relatório ACI-522R (ACI, 2010) é limitada a faixas granulométricas específicas, sendo elas a classificação nº 8 e nº 67 da norma ASTM C33. Por conta desse fator, aliado à falta de uma metodologia para determinação da relação água/cimento da mistura, o método proposto pelo relatório em questão apresenta certa limitação quanto ao seu emprego, ficando restrito a materiais que apresentem características semelhantes aos descritos no documento.

2.2.11 Método de dosagem proposto por Mikami (2022)

O método de dosagem intitulado Método do Grau de Compactação, proposto por Mikami (2022), permite relacionar as propriedades dos materiais constituintes de uma mistura de concreto permeável, projetando-as com porosidade controlada. O grau de compactação é definido como a relação entre o estado de compactação do agregado graúdo dentro de uma mistura de concreto permeável, com seu estado de compactação isolado, sendo esse definido pela massa unitária compactada do agregado.

O método de dosagem proposto por Mikami (2022) permite a adequação dos traços de concreto permeável em função do teor de agregado miúdo incorporado à

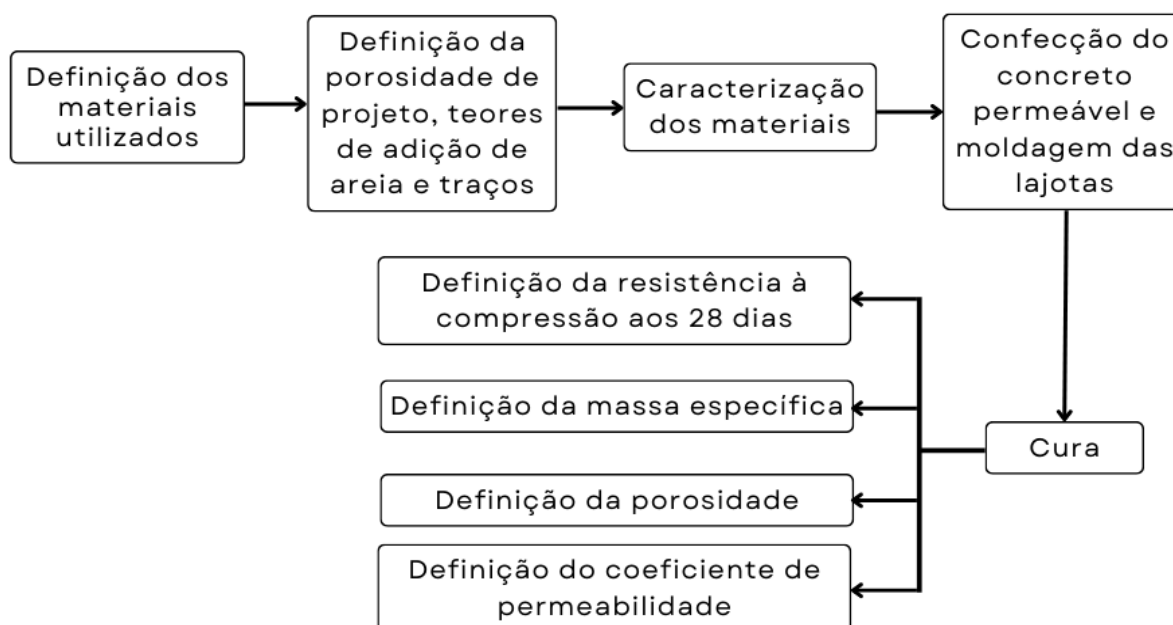
mistura, sendo este considerado parte do volume da pasta, gerando por consequência redução no consumo de cimento Portland. Além disso, o método possibilita a adaptação das misturas de concreto permeável para os agregados disponíveis no local de desenvolvimento da metodologia, não ficando restrito a tipos de materiais específicos.

Ainda, o método do Grau de Compactação traz metodologias para a definição da relação água/cimento das misturas de concreto permeável, por meio de adaptações realizadas no teste de drenagem de pasta proposto por Nguyen et al. (2014), para definição de uma energia de compactação conhecida, permitindo controle da porosidade do material, e testes relacionados a otimização de misturas de concreto permeável, como procedimento para dosagem de aditivo superplastificante, por exemplo.

3 METODOLOGIA

Este estudo foi realizado no Laboratório de Construção Civil do Bloco E, da Universidade Estadual de Ponta Grossa. A proposta abordada na presente metodologia é a produção de ensaios para avaliação do comportamento do concreto permeável quanto a adição de areia. Para isso, foram realizados testes experimentais a partir da confecção de lajotas de concreto permeável, as quais se enquadram como peças por apresentarem índice de forma menor que 4, sendo o primeiro traço idealizado sem adição de areia, e mais três traços confeccionados com adição de areia em diferentes teores, com uma relação agregado miúdo/cimento de 0,5, 1,0 e 1,5. Para todos os traços, a porosidade foi mantida em valores próximos de 20%. Na Figura 10 podem ser verificadas todas as etapas contidas na metodologia adotada do presente trabalho.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Os autores, 2022.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E CARACTERIZAÇÕES

Os materiais utilizados para produção das lajotas de concreto permeável ensaiadas foram o cimento Portland CP II-F-32, brita 0 (Figura 11), também chamada de pedrisco, areia de granulometria fina e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1180.

Figura 11 - Brita 0 utilizada no concreto permeável



Fonte: Os autores, 2022.

O agregado miúdo foi caracterizado quanto suas propriedades físicas através dos ensaios descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo

ENSAIO	REFERÊNCIA NORMATIVA
Densidade	NBR 9776 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Os autores, 2022.

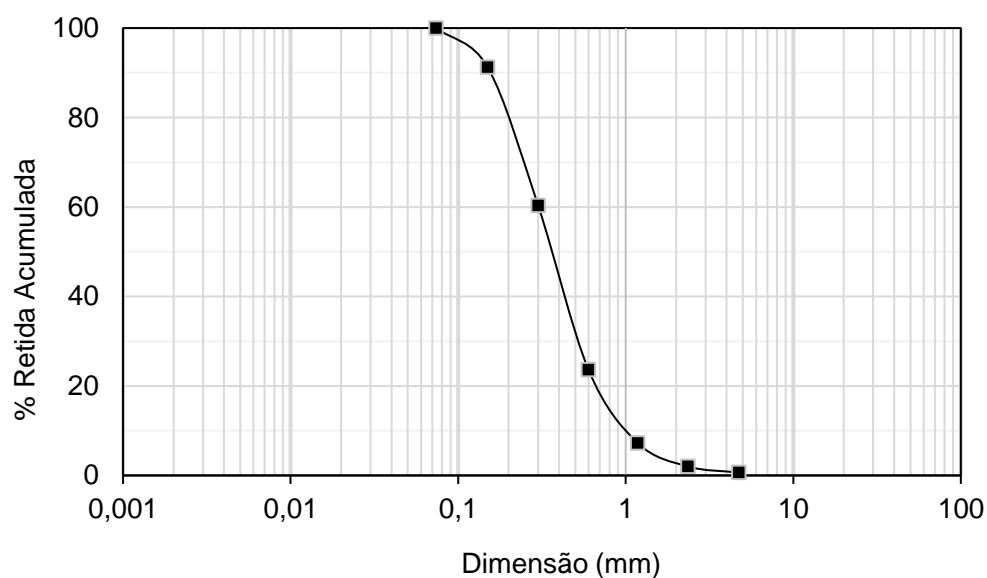
Os resultados obtidos para caracterização do agregado miúdo, no que se refere a massa específica, massa unitária e índice de vazios, estão descritos na Tabela 7, e sua distribuição granulométrica é demonstrada na Figura 12.

Tabela 7 - Caracterização física do agregado miúdo

Densidade (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)		Índice de vazios (%)	
	Estado Solto	Estado compactado	Estado Solto	Estado compactado
2,62	1,60	1,68	38,97	35,79

Fonte: Os autores, 2022.

Figura 12 - Granulometria do agregado miúdo



Fonte: Os autores, 2022.

O agregado graúdo foi caracterizado quanto suas propriedades físicas através dos ensaios descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Ensaios para caracterização do agregado graúdo

ENSAIO	REFERÊNCIA NORMATIVA
Densidade	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Índice de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: Os autores, 2022.

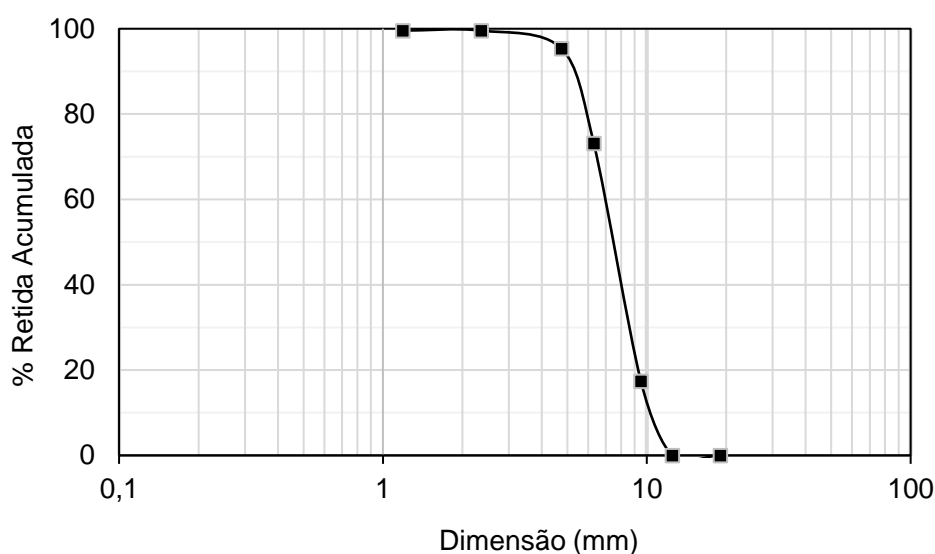
Os resultados obtidos para caracterização do agregado graúdo, no que se refere a massa específica, massa unitária e índice de vazios, estão descritos na Tabela 9. A massa específica foi definida tanto para a condição seca quanto para a condição saturada de superfície seca. A distribuição granulométrica do material pode ser vista na Figura 13.

Tabela 9 - Caracterização física do agregado graúdo

Densidade (g/cm ³)		Massa unitária (g/cm ³)		Índice de vazios (%)	
Seca	Saturada	Estado Solto	Estado compactado	Estado Solto	Estado compactado
2,96	2,98	1,54	1,66	47,87	44,05

Fonte: Os autores, 2022.

Figura 13 - Granulometria do agregado graúdo



Fonte: Os autores, 2022.

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL

Os diferentes traços de concreto permeável, tanto o traço piloto quanto os traços com adição de areia, foram definidos a partir do método do Grau de Compactação proposto por Mikami (2022). Como já mencionado, o método permite a adequação dos traços de concreto permeável em função do teor de agregado miúdo incorporado à mistura, sendo este considerado parte do volume da pasta. Nos

traços com adição de areia, o incremento do material promove a necessidade de incorporação de mais água a mistura, aumentando assim a relação água/cimento à medida que se aumente o teor de areia incorporado. Contudo, como citado, a relação água/cimento foi mantida constante, sendo seu déficit corrigido com adição de aditivo superplastificante a mistura, para manutenção da consistência da pasta.

Dessa forma, os traços foram definidos mantendo a porosidade fixa em 20%, além da adoção de uma relação água/cimento constante. Os parâmetros utilizados no método de dosagem em questão, bem como suas respectivas descrições, podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Descrições dos parâmetros utilizados no 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 _{agm}	g/cm ³	Massa específica do agregado miúdo
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
M _{uc}	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,ef}	%	Volume de vazios efetivo do agregado graúdo
ρ _{f,est}	g/cm ³	Massa específica estimada no estado fresco

Fonte: Adaptado de Mikami, 2022.

3.2.1 Definição da relação água/cimento

Com base no trabalho de Mikami (2022), a relação água/cimento é definida como um dado de entrada do método proposto, determinada através do teste de drenagem da pasta adaptado de Nguyen *et al.* (2014), o qual se baseia na

consistência ideal da pasta de cimento, ou seja, a pasta deve promover uma cobertura integral e homogênea dos agregados sem que ocorra seu escoamento através dos poros do material.

O primeiro passo para o teste de drenagem da pasta é a adoção de valores iniciais de relação água/cimento e agregado graúdo/cimento. Segundo Nguyen *et al.* (2014), valores usuais partem de 0,28 e 4,0, respectivamente. Em seguida, deve-se realizar uma mistura de concreto permeável suficiente para preencher uma peneira de ensaio de agregados com abertura de 1,18 mm, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). A mistura de concreto permeável, colocada dentro da peneira, deve ser vibrada por 15 segundos em um vibrador mecânico, conforme ilustrado na Figura 14. O teste basicamente consiste na verificação do fundo da peneira, avaliando a ocorrência ou não de escoamento significativo da pasta de cimento. Em caso da não ocorrência de tal escoamento, deve-se realizar um incremento de 0,02 na relação água/cimento, repetindo o teste até que o escoamento ocorra. Por fim, a relação água/cimento adequada para o concreto permeável em questão é definida como o maior valor para o qual não haja escoamento significativo da pasta de cimento no fundo da peneira.

Figura 14 - Vibrador mecânico para teste de drenagem da pasta



Fonte: Os autores, 2022.

No presente trabalho, adotou-se valores iniciais de relação água/cimento e agregado graúdo/cimento de 0,30 e 4,0, respectivamente. Foi utilizado para confecção do concreto permeável 2.000 g de pedrisco e 500 g de cimento Portland.

Para a relação água/cimento adotada inicialmente, de 0,30, não foi constatado escoamento da pasta de cimento, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Teste de drenagem de pasta para a/c de 0,30



Fonte: Os autores, 2022.

Em seguida, realizou-se novamente o teste de drenagem de pasta para a relação água/cimento de 0,32. Para a relação em questão, não foi verificado escoamento significativo da pasta de cimento, como pode-se constatar na Figura 16.

Figura 16 - Teste de drenagem de pasta para a/c de 0,32



Fonte: Os autores, 2022.

Não havendo escoamento significativo para a relação água/cimento de 0,32, realizou-se novamente o teste de drenagem de pasta, dessa vez para a relação água/cimento de 0,34. Para a relação em questão, verificou-se um escoamento

significativo da pasta de cimento no fundo da peneira, como pode ser visto na Figura 17. Dessa maneira, havendo tal escoamento, adotou-se como valor ideal de relação água/cimento o valor de 0,32.

Figura 17 - Teste de drenagem de pasta para a/c de 0,34



Fonte: Os autores, 2022.

3.2.2 Definição do traço piloto e teste de compactação

Após a realização do teste de drenagem da pasta de cimento e consequente definição da relação água/cimento ideal, deve-se realizar a definição do traço piloto de concreto permeável e posterior teste de compactação da mistura, para definição do grau de compactação efetivo ou validação do traço. Inicialmente, deve-se adotar um $G_{c,i}$, e com os dados de caracterização do agregado graúdo, determinar o $V_{v,ef}$ através da Equação 1. Posteriormente, deve-se determinar uma porosidade de projeto P_d e calcular o volume de pasta necessário através da Equação 2.

$$V_{v,ef} = \frac{d_{agg} - MU_c \cdot G_c}{d_{agg}} \quad (1)$$

$$V_p = V_{v,ef} - P_d \quad (2)$$

Posteriormente, com os valores da caracterização dos materiais constituintes, relação água/cimento, $G_{c,i}$ e relação agregado miúdo/cimento, deve-se

calcular os consumos de cimento e agregado graúdo da mistura através das Equações 3 e 4, respectivamente.

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

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

Por fim, para definição do traço piloto, deve-se calcular a relação agregado graúdo/cimento através da Equação 5, e estimar a massa específica do concreto permeável através da Equação 6.

$$g/c = \frac{C_{\text{agg}}}{C_{\text{cim}}} \quad (5)$$

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

No presente trabalho, foi utilizado o valor de grau de compactação inicial $G_{c,i}$ de 0,92, sendo valores usuais aquele contidos na faixa de 0,90 a 0,97. O valor da relação água/cimento utilizado foi definido através do teste de drenagem de pasta, como demonstrado anteriormente, sendo seu valor de 0,32. O valor da porosidade de projeto P_d considerada foi de 20%, e o traço desenvolvido com os materiais já apresentados, sem adição de agregado miúdo. Os dados de entrada do método e o traço piloto obtido através das equações apresentadas estão demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados de entrada e traço piloto de referência

Parâmetro		m/c = 0,0
Grau de compactação inicial	$G_{c,i}$	0,92
Relação água/cimento	a/c	0,32
Volume de vazios efetivo (%)	$V_{v,ef}$	49,62
Porosidade de projeto (%)	P_d	20,00
Volume de pasta (%)	V_p	29,62
Relação agregado miúdo/cimento	m/c	0
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	460,9
Consumo de agregado graúdo (kg/m ³)	C_{agg}	1522,6
Relação agregado graúdo/cimento	g/c	3,30
Traço em massa	-	1:3,30
Massa específica estimada (g/cm ³)	$\rho_{f,est}$	2,132

Fonte: Os autores, 2022.

Para realização do teste de compactação, deve-se misturar uma quantidade suficiente de concreto permeável para preenchimento do molde que será utilizado como padrão para as posteriores moldagens dos corpos de prova. No presente trabalho, foram utilizados 3 kg de pedrisco para confecção do concreto permeável. Em seguida, deve-se medir a massa do molde utilizado, e então preenchê-lo com a mistura de concreto permeável de forma uniforme. O molde deve ser preenchido de tal forma que, após a compactação, a face superior da lajota de concreto permeável esteja nivelada com a face superior do molde.

Em seguida, deve-se medir a massa do molde com concreto permeável, e definir sua massa específica aparente no estado fresco através da Equação 7.

$$\rho_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (7)$$

Posteriormente, deve-se calcular a densidade teórica do concreto permeável com base na ASTM C1688M (ASTM, 2014), através da Equação 8.

$$d_t = \frac{M}{V} \quad (8)$$

Com a definição da densidade teórica e massa específica aparente no estado fresco, pode-se calcular a porosidade do concreto permeável no estado fresco, bem como o consumo real de cimento e agregado graúdo da mistura, através das Equações 9, 10 e 11, respectivamente.

$$P_f = \frac{d_t - \rho_f}{d_t} \quad (9)$$

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

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

Por fim, com os valores do consumo real de agregado graúdo e seu valor de massa unitária, calcula-se o grau de compactação efetivo da mistura, através da Equação 12.

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

Ao final do teste de compactação, deve-se verificar a massa específica aparente e porosidade no estado fresco do concreto permeável, comparando-as aos valores estimados na dosagem do traço piloto. Em caso de diferença significativa na porosidade de projeto e no estado fresco, deve-se adotar o grau de compactação efetivo $G_{\text{c,ef}}$ para correção do traço de concreto permeável, uma vez que, para esses casos, o grau de compactação inicial $G_{\text{c,i}}$ não corresponde ao valor real da mistura de concreto permeável em relação ao agregado utilizado e método de compactação empregado.

Dessa forma, o traço piloto apresentado na Tabela 11 foi submetido ao teste de compactação, como descrito anteriormente, sendo o resultado apresentado abaixo, na Tabela 12.

Tabela 12 - Teste de compactação para o traço piloto de referência

Parâmetro		m/c = 0,0
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,693
Massa específica medida (g/cm ³)	ρ_f	2,232
Porosidade no estado fresco (%)	P_f	16,21
Consumo de cimento real (kg/m ³)	$C_{cim,r}$	482,70
Consumo de agregado graúdo real (kg/m ³)	$C_{agg,r}$	1594,80
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,9636
Traço final	-	1:3,76

Fonte: Os autores, 2022.

Como base no resultado obtido no teste de compactação, pode-se perceber que o grau de compactação efetivo $G_{c,ef}$ e porosidade no estado fresco P_f calculados apresentaram grande diferença aos valores estipulados inicialmente, de 0,92 e 20%, respectivamente, indicando que a mistura apresentou maior compacidade do que o esperado. Dessa forma, o traço foi corrigido com base no grau de compactação efetivo, aplicando-se as equações descritas acima, resultando em um traço de 1:3,76 para a mistura sem adição de agregado miúdo. Os demais traços, que apresentam adição de agregado miúdo à mistura, também foram calculados a partir do grau de compactação efetivo de 0,9636.

3.2.3 Dosagem de aditivo superplastificante

Como mencionado anteriormente, a relação água/cimento foi mantida constante, independente do teor de agregado miúdo adicionado à mistura. É de conhecimento que a incorporação de areia ao traço de concreto permeável promove a necessidade de adição de mais água a mistura, para que se mantenha adequada a consistência da pasta de cimento e o recobrimento dos agregados. Dessa forma, para que fosse possível tal característica, adicionou-se a mistura pequenas porcentagens de aditivo superplastificante.

Para essa adição, realizou-se o ajuste de consistência da pasta de cimento, através da metodologia proposta por Mikami (2022). Segundo o autor, para tal procedimento, deve-se levar em conta algumas premissas básicas, como a existência de um índice de consistência padrão (ICp) da pasta de cimento para cada

tipo de agregado, promovendo o recobrimento adequado dos grãos, a paridade do comportamento reológico de diferentes matrizes cimentícias havendo equivalência do índice de consistência, a possibilidade de correção da relação água/cimento de uma matriz cimentícia, havendo manutenção de sua consistência, e a consideração da incorporação do agregado miúdo a pasta de cimento, como parte de seu volume, devendo a consistência ser verificada na pasta com as adições.

Inicialmente, determinou-se o índice de consistência padrão (ICp) da pasta de cimento do traço piloto (sem adição de areia), utilizando para confecção da pasta 1.000 g de cimento e relação água/cimento de 0,32, conforme obtido no teste de drenagem de pasta. Em seguida, realizou-se mistura mecânica dos componentes da seguinte maneira:

- a) Adicionou-se a água e o cimento Portland na cuba do misturador mecânico e realizou-se mistura lenta por 60 segundos. Nos casos em que foram utilizadas adições de agregado miúdo, a incorporação do mesmo foi realizada lentamente durante os últimos 30 segundos desse intervalo
- b) Em seguida, realizou-se mistura rápida durante 30 segundos.
- c) Na sequência, desligou-se o misturador mecânico por 90 segundos, raspando as laterais da cuba durante os 30 segundos iniciais e promovendo o descanso da mistura durante o tempo restante.
- d) Por fim, realizou-se mistura mecânica por 60 segundos, em velocidade rápida.

Para determinação do índice de consistência padrão (ICp), após as etapas descritas acima, realizou-se o ensaio de abatimento de um molde troncocônico, com o auxílio de uma mesa para índice de consistência, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), sendo o valor representado pelo diâmetro médio da base do tronco de cone após o abatimento, como pode ser visto nas Figura 18 e Figura 19. O valor obtido para o índice de consistência padrão (ICp) foi de 289,50 mm.

Figura 18 - Ensaio para definição do ICp antes do abatimento



Fonte: Os autores, 2022.

Figura 19 - Ensaio para definição do ICp após o abatimento



Fonte: Os autores, 2022.

Com o valor do índice de consistência padrão (ICp) definido, foram adequadas as pastas de cimento referente aos traços com adição de agregado miúdo através da dosagem de aditivo superplastificante. Para isso, para cada relação agregado miúdo/cimento, foram determinados teores iniciais de aditivo para determinação de seus respectivos índices de consistência. Os materiais constituintes da pasta de cimento foram misturados mecanicamente conforme método descrito acima, e o aditivo considerado como parte da relação água/cimento, sendo previamente misturado com a água.

Para definição dos teores ótimos de aditivo superplastificante, foram realizados diversos testes para as diferentes relações agregado miúdo/cimento, variando, através de tentativas experimentais, o percentual de aditivo superplastificante incorporado à mistura. Para cada teor de aditivo incorporado, foi realizado o ensaio de abatimento de um corpo de prova troncocônico, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), de maneira igual a executada para definição do IC_p, definindo o índice de consistência (IC) de cada adição. Por fim, os teores ótimos de aditivo superplastificante adotados foram aqueles em que o valor do índice de consistência (IC) de cada teor de aditivo coincidiu com o IC_p ± 5 mm.

Para o traço com relação agregado miúdo/cimento de 0,5, realizou-se a confecção da pasta de cimento com adição de areia incorporada à mistura, relação água/cimento de 0,32, e uso de aditivo superplastificante, sendo utilizado como parte da água adicionada a mistura. Para o traço, obteve-se um índice de consistência (IC) de 292 mm, referente a um teor de aditivo de 0,08%, sendo esse o valor ótimo para o traço, já que a diferença entre o IC_p e IC foi menor que 5 mm. Os resultados referentes ao procedimento para ajuste da consistência da pasta de cimento podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados do ensaio para ajuste de consistência da pasta

m/c	% Superplastificante	IC (mm)	Diferença para IC_p (mm)
0,00	0,00%	289,50*	0,00
0,50	0,08%	292,00	2,50
1,00	0,27%	294,30	4,80
1,50	0,46%	292,00	2,50

Fonte: Os autores, 2022.

Notas: * Índice de consistência padrão do traço de referência

3.2.4 Definição dos traços de concreto permeável

Por fim, foram determinados os traços finais para confecção das peças de concreto permeável através do grau de compactação efetivo calculado no teste de compactação. Com base no método proposto, foram definidos o traço piloto, sem adição de areia, e mais três traços com adição de areia, com relação agregado miúdo/cimento de 0,5, 1,0 e 1,5, respectivamente. Os traços foram definidos adotando-se um grau de compactação de 0,9636 e relação água/cimento de 0,32,

conforme teste de drenagem da pasta de cimento, e os teores de aditivos para correção da consistência definidos através do procedimento descrito no tópico 3.2.3. Os traços de concreto permeável foram definidos através das equações descritas no tópico 3.2.2, e estão demonstrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Traços de concreto permeável definidos pelo método do Grau de Compactação

Parâmetro		m/c = 0,0	m/c = 0,5	m/c = 1,0	m/c = 1,5
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,9636	0,9636	0,9636	0,9636
Relação água/cimento	a/c	0,32	0,32	0,32	0,32
Volume de vazios efetivo (%)	$V_{v,ef}$	47,23	47,23	47,23	47,23
Volume de pasta (%)	V_p	27,23	27,23	27,23	27,23
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	423,70	326,70	265,8	224,1
Consumo de agregado graúdo (kg/m ³)	C_{agg}	1594,80	1594,80	1594,80	1594,80
Consumo de agregado miúdo (kg/m ³)	C_{agm}	0,00	163,30	265,8	336,1
Relação agregado graúdo/cimento	g/c	3,76	4,88	6,00	7,12
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,693	2,737	2,764	2,783
Massa específica estimada (g/cm ³)	$\rho_{f,est}$	2,154	2,189	2,212	2,227
Traço final	-	1:3,76 - 0,32	1:4,88 - 0,32	1:6,00 - 0,32	1:7,12 - 0,32

Fonte: Os autores, 2022.

3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

3.3.1 Moldagem dos corpos de prova

O concreto permeável foi produzido seguindo a sequência de mistura recomendada pela norma ASTM C192 (ASTM, 2019), com o auxílio de uma betoneira. Foram moldadas lajotas de concreto permeável com 15 cm de largura, 15 cm de comprimento e 6 cm de espessura, resultando em um índice de forma de 2,5, caracterizando as lajotas como peças. Ao todo, foram moldadas 10 lajotas por traço

de concreto permeável, resultando assim em 40 lajotas para realização dos ensaios. O molde utilizado para moldagem das peças pode ser visto na Figura 20. Os moldes foram preenchidos com a mistura de concreto permeável de forma uniforme, atentando-se para que seus cantos fossem preenchidos adequadamente.

Figura 20 - Molde utilizado para fabricação das peças



Fonte: Os autores, 2022.

A compactação do concreto permeável foi realizada com o auxílio de uma placa metálica. A energia e forma de compactação empregada durante a moldagem dos corpos de prova de concreto permeável faz com que a porosidade do material seja muito sensível a esses fatores. Dessa maneira, durante a moldagem dos corpos de prova, a porosidade do material, para que haja reprodutibilidade do parâmetro definido em projeto, foi controlada através da massa de concreto permeável no estado fresco, valor obtido através da massa específica do material no estado fresco, definida através da Equação 6.

3.3.2 Cura

A cura das lajotas de concreto permeável foi realizada com a molhagem das peças, através de imersão em tanque de água, seguida de sua colocação em sacos plásticos, os quais foram fechados e guardados até a data dos ensaios para preservação da umidade.

A cura imersa em água para concretos permeáveis não se mostra adequada, com testes experimentais realizados no Laboratório de Construção Civil indicando que, nesses casos, pode haver lixiviação da pasta de cimento do concreto permeável, sendo a metodologia descartada por tal motivo.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO PERMEÁVEL

Ao todo foram moldadas 10 lajotas para cada traço de concreto permeável produzido, sendo destinadas 5 peças para realização do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, e o restante destinadas a realização dos demais ensaios. As lajotas de concreto permeável, no estado fresco, foram caracterizadas quanto suas propriedades físicas através dos ensaios de massa específica e porosidade, ambos descritos na norma ASTM C1688 (ASTM, 2014). No estado endurecido, as lajotas de concreto permeável foram caracterizadas de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 - Ensaio para caracterização das lajotas de concreto permeável no estado endurecido

ENSAIO	REFERÊNCIA NORMATIVA
Massa específica	ASTM C1754 (ASTM, 2012)
Porosidade	
Resistência à compressão	NBR 9781 (ABNT, 2013)
Ensaio de infiltração	Adaptado de NBR 16416 (ABNT,2015)

Fonte: Os autores, 2022.

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), o ensaio de infiltração para determinação do coeficiente de permeabilidade deve ser realizado com a utilização de um anel cilíndrico vazado com diâmetro de 300 ± 10 mm e altura mínima de 50 mm, e 20 litros de água. Contudo, através de testes realizados no Laboratório de Construção Civil, verificou-se que a realização do ensaio utilizando um anel com 100 mm de diâmetro e 2 litros de água produz bons resultados, sendo a adaptação realizada na presente metodologia. O ensaio para determinação das taxas de infiltração das peças de concreto permeável é demonstrado na Figura 21.

Figura 21 - Ensaio de infiltração das peças de concreto permeável



Fonte: Os autores, 2022.

Para realização do ensaio de resistência à compressão, foi realizado nas peças de concreto permeável o capeamento de pasta de cimento nas duas superfícies paralelas entre si e perpendiculares a ação da prensa, para regularização das mesmas, no padrão demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Padrão de capeamento com pasta de cimento



Fonte: Os autores, 2022.

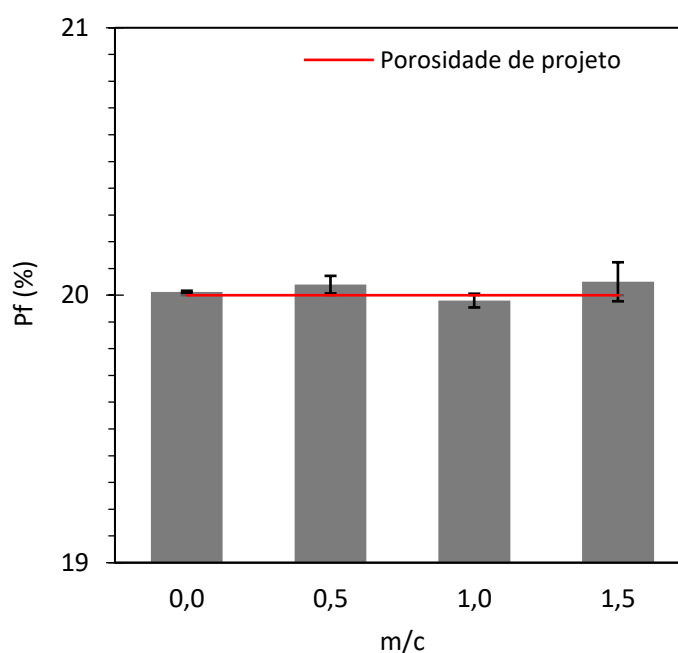
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As lajotas de concreto permeável foram caracterizadas quanto aos ensaios de resistência à compressão, porosidade e taxa de infiltração, permitindo a obtenção de parâmetros e propriedades como a massa específica no estado fresco e endurecido, por exemplo, e a correlação de tais valores com os teores de agregado miúdo incorporados à mistura.

4.1 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO

As porosidades no estado fresco se mantiveram constantes ao longo de todos os traços, indicando êxito quanto ao uso do Método do Grau de Compactação proposto por Mikami (2022). Com base na Figura 23, pode-se perceber que todos os traços ficaram próximos ao valor da porosidade de projeto de 20%, o que difere dos trabalhos de França e Costa (2021), onde a incorporação de areia em 10% de massa dos agregados resultou na queda da porosidade de 30,47% para 24,24% ou então no trabalho de Bonicelli *et al.* (2015), o qual houve a substituição de 5% e de 10% do peso do agregado graúdo por areia e os autores concluíram que as amostras com agregado miúdo se demonstraram menos porosas do que as do traço de referência.

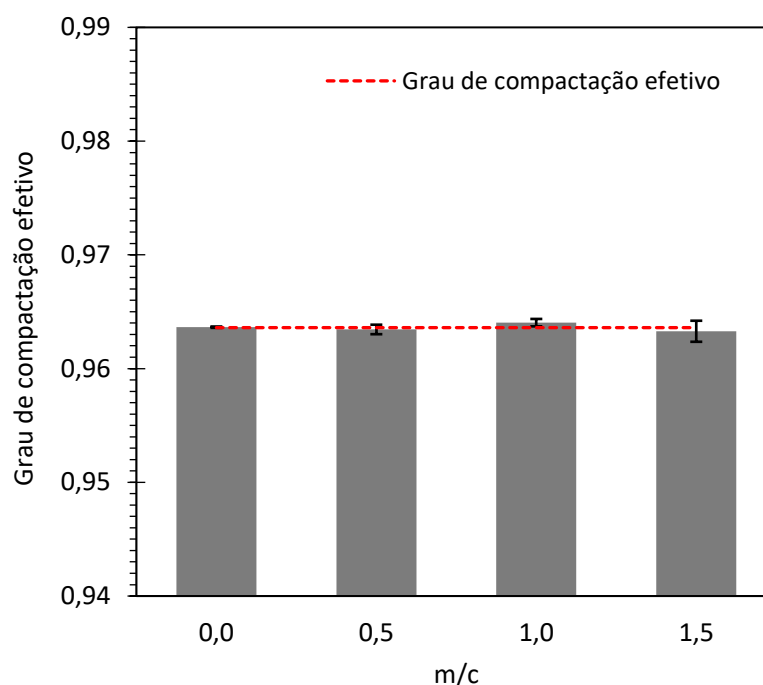
Figura 23 - Porosidade média no estado fresco



Fonte: Os autores, 2022.

O grau de compactação efetivo calculado para as misturas ensaiadas está demonstrado na Figura 24, demonstrando boa aplicabilidade do método do grau de compactação, pois os resultados obtidos estão de acordo com o valor de controle, ficando próximos ao grau de compactação adotado de 0,9636. O grau de compactação influencia diretamente a energia de compactação usada no agregado, sendo que os outros trabalhos consultados da bibliografia, com exceção de Mikami (2022), não abordavam esse assunto em seus ensaios, podendo ser considerado uma inovação trazida pelo método.

Figura 24 - Grau de compactação efetivo dos traços

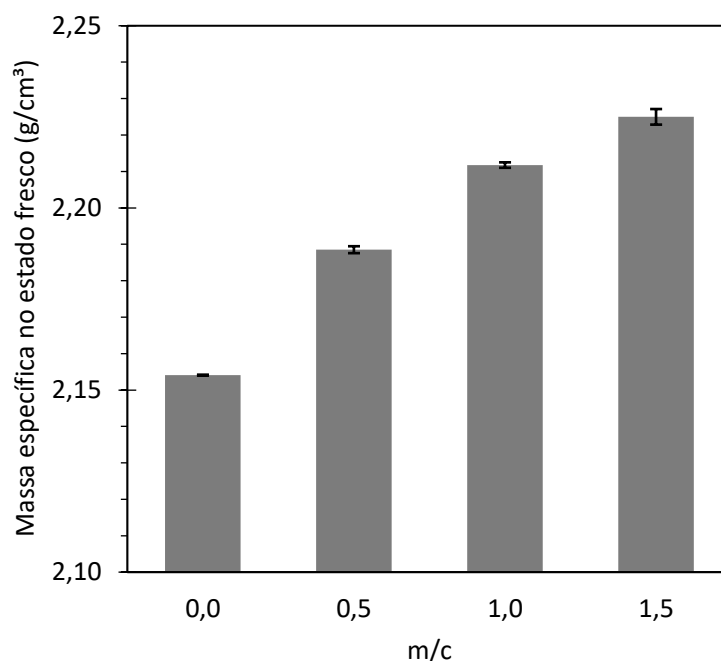


Fonte: Os autores, 2022.

A massa específica no estado fresco demonstrou aumento da média conforme incorporação de areia à mistura. Os resultados podem ser vistos na Figura 25, e quando comparados aos resultados de massa específica no estado endurecido nota-se que também há uma tendência do material aumentar a sua densidade conforme o traço possua maiores quantidades de areia, o que já era sugerido pela densidade teórica, então é possível afirmar que há uma relação existente entre os dados previstos pelo método utilizado e os resultados obtidos dos ensaios. Em decorrência das boas estimativas, tanto da porosidade quanto da massa específica,

propostas pelo método é plausível afirmar que ele apresenta resultados coerentes com a prática.

Figura 25 – Massa específica média no estado fresco dos traços

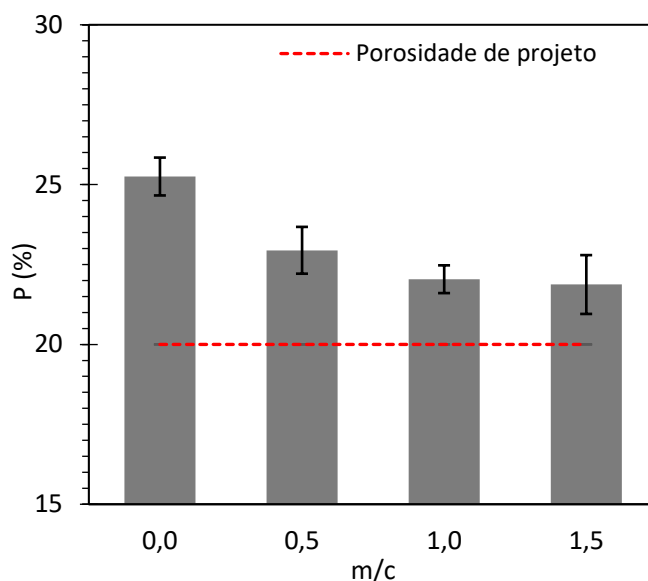


Fonte: Os autores, 2022.

4.2 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO ENDURECIDO

Em relação a porosidade, as amostras com adição de areia não demonstraram diferença significativa em nenhum dos traços, sendo possível, através da Figura 26 constatar tal afirmação. Por outro lado, as amostras do traço de referência apresentaram valores com diferenças significativas perante os demais traços. Contudo, pode-se observar que todos os traços demonstraram valores de porosidade superiores a 20%, a qual era a porosidade de projeto. Tal fato corrobora com o trabalho de Mikami (2022), onde o mesmo aponta que o motivo desse fenômeno acontecer é o surgimento de poros na pasta de cimento, sendo esses poros os responsáveis pelo aumento da porosidade. Como mencionado, a porosidade do traço de referência apresentou porosidade acima dos demais traços, e um dos possíveis motivos para isso seria justamente o maior surgimento de poros na pasta de cimento, visto que esse foi o traço com o maior consumo de cimento e nenhuma adição de areia.

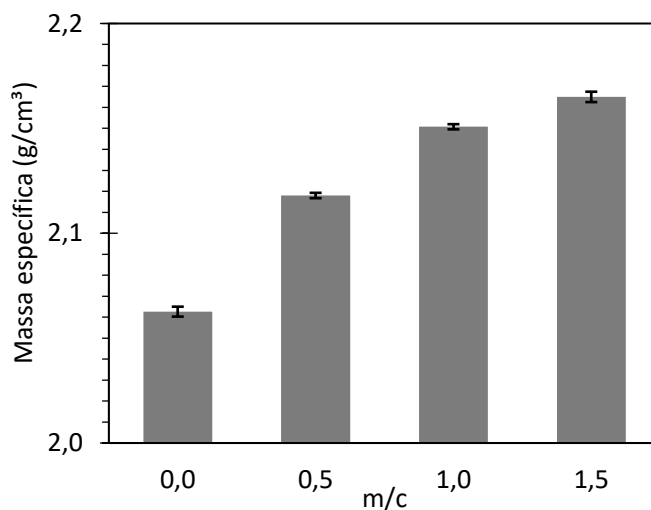
Figura 26 - Porosidade média no estado endurecido



Fonte: Os autores, 2022.

Abordando a questão da massa específica média dos traços ensaiados no estado endurecido, pode-se observar um aumento dos valores em função de maiores inserções de areia a mistura, como demonstrados na Figura 27. Tal fato já era previsto dentro do Método do Grau de Compactação, sendo esses dados vistos na densidade teórica da Tabela 14. Por outro lado, é importante ressaltar que a densidade teórica não considera o volume de vazios, apenas dos materiais utilizados na composição, o que leva a valores maiores de densidade.

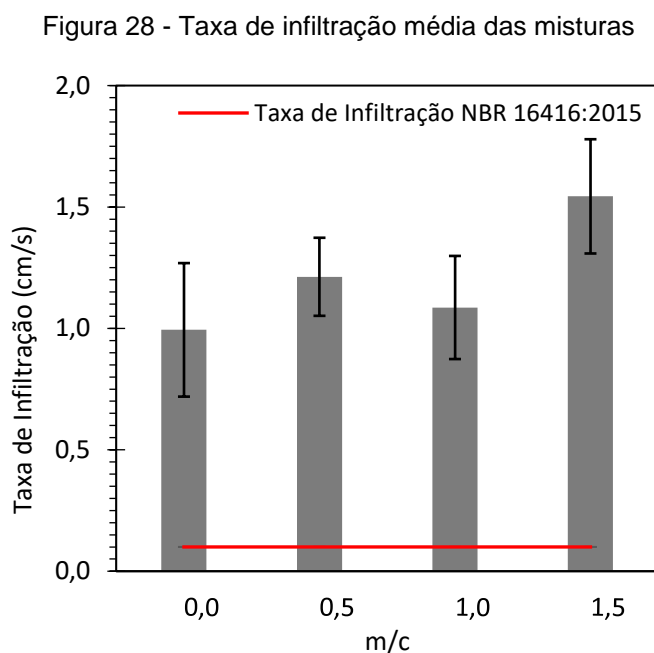
Figura 27 – Massa específica média no estado endurecido



Fonte: Os autores, 2022.

4.3 TAXA DE INFILTRAÇÃO

A taxa de infiltração média obtida para os diversos traços pode ser visualizada na Figura 28.



Com base na Figura 28, pode-se observar que as taxas de infiltração para os traços analisados apresentaram certa variação, mas quando analisados os desvios padrões nota-se que não é possível afirmar que exista uma diferença significativa entre os traços, ficando todos acima de 0,99 cm/s e, conseqüentemente, acima do mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), de 0,1 cm/s.

É possível observar através dos resultados obtidos, que as taxas de infiltração dos traços analisados apresentaram uma pequena variação, como citado anteriormente, mesmo com uma porosidade quase constante, indicando que tal parâmetro não fornece uma relação completamente linear com essa propriedade, já que, segundo Zhong *et al.* (2016), o escoamento da água no interior do material é consequência de diversas características como a conectividade e tortuosidade dos poros, por exemplo.

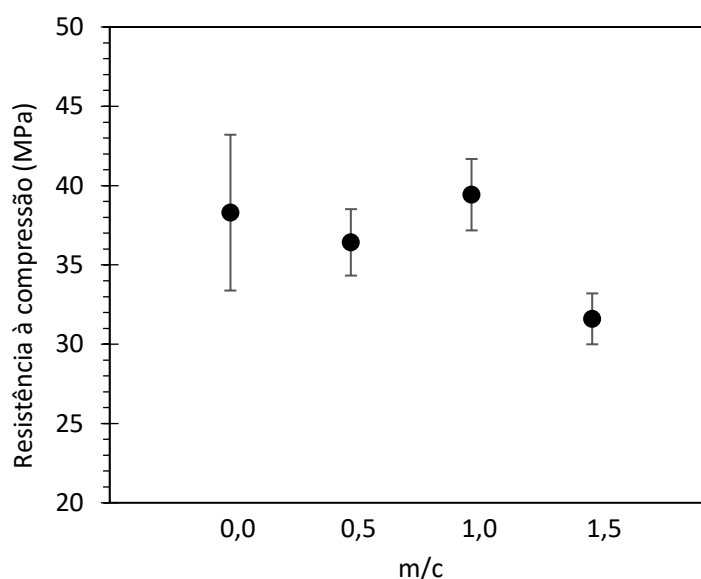
Os trabalhos de Bonicelli *et al.* (2015), Manan *et al.* (2020) e França e Costa (2021) concluíram que, em geral, a incorporação de areia aos traços de concreto permeável promove redução da permeabilidade do material, tornando-os

em alguns casos impermeáveis. Tal fato demonstra que a simples incorporação do agregado miúdo em misturas de concreto permeável, sem um controle adequado da porosidade, não é garantia de bons resultados e consequente aplicabilidade do material. Sendo assim, pode-se observar que a metodologia de dosagem proposta por Mikami (2022) mais uma vez se mostra adequada para a dosagem de concretos permeáveis com adição de areia, permitindo a manutenção das propriedades básicas do material, como porosidade e permeabilidade.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão das peças ensaiadas foi realizado aos 28 dias, e seus resultados podem ser visualizados na Figura 29. Com base nos resultados obtidos, pode-se observar que não houve alteração significativa entre os traços com relação m/c de 0,0, 0,5 e 1,0, mas quando comparado o traço com relação m/c de 1,5 em relação aos demais, nota-se uma queda de valor de resistência à compressão das peças. Com base nos desvios padrões obtidos para cada traço, percebe-se que aqueles com relação m/c de 0,0, 0,5 e 1,0 apresentam sobreposição, indicando que não há diferença significativa entre eles. Por outro lado, o desvio padrão do traço com relação m/c de 0,0 não apresenta grande confiabilidade, pois é muito elevado, indicando grande variabilidade dos resultados das amostras.

Figura 29 – Resistência média à compressão dos concretos



Fonte: Os autores, 2022.

O traço piloto apresentou uma resistência à compressão de 38,30 MPa, e consumo de cimento estimado pelo método de dosagem de 423,70 kg/m³. Para o traço com relação m/c de 0,5, a resistência à compressão foi de 36,42 MPa, e consumo de cimento estimado de 326,70 kg/m³. Quanto ao traço com relação m/c de 1,0, o qual apresentou maior resistência à compressão, de 39,43 MPa, o consumo de cimento estimado pelo método foi de 265,80 kg/m³. Já para o traço com relação m/c de 1,5, o consumo estimado foi de 224,10 kg/m³, e a resistência a compressão de 31,60 MPa. A manutenção da resistência observada em alguns traços com adição de agregado miúdo pode ser atribuída a uma possível redução da água de amassamento das misturas, em função da adição da areia, promovendo uma redução da relação a/c durante o processo de hidratação do material. A consequência desse fenômeno seria uma maior resistência conferida ao material e uma menor trabalhabilidade. A perda de trabalhabilidade foi principalmente observada na fase de compactação das misturas, onde os traços com relações m/c maiores apresentaram maior dificuldade de serem compactados em relação aos traços com relações m/c menores.

Essa manutenção da resistência tende a existir conforme a quantidade de areia inserida aumente e, concomitantemente, haja água suficiente para gerar as reações de hidratação na pasta de cimento. A partir do momento que sobra menos do que uma quantidade mínima exigida de água atuando para as reações de hidratação, o material apresenta valores de resistência menores, podendo essa ser uma das justificativas para a redução da resistência à compressão do traço com m/c de 1,5. Ainda, para esse traço, foi observado uma trabalhabilidade inferior do material em relação aos demais traços com adição de areia, podendo indicar que o ajuste de consistência da pasta não se mostrou adequado para a quantidade de areia utilizada.

Ainda, segundo Xie (2020), a resistência à compressão está ligada tanto à estrutura formada no material, quanto a espessura de pasta envolvendo os materiais. Dessa maneira, há uma possibilidade de que o agregado miúdo conseguiu organizar a estrutura do material de modo que a resistência, porosidade e permeabilidade se mantivessem adequadas mesmo em traços com menores consumos de cimento. Essa ideia se aplica até o traço com relação m/c de 1,0, já que o traço de relação m/c de 1,5 apresenta uma mudança de comportamento, indicando certo limite para a incorporação de areia.

Os valores de resistência à compressão discutidos na literatura indicam um aumento desse valor em função do aumento de areia incorporada à mistura. O trabalho de França e Costa (2021) demonstrou um aumento da resistência à compressão de 11,51 MPa para 14,57 MPa em corpos de prova de concreto permeável, cujo traço apresentou 10% de areia do peso total de agregados incorporado à mistura. Contudo, para essa adição, os valores de porosidade e índice de infiltração apresentaram redução na ordem de 20% e 34%, respectivamente. Já o trabalho de Manan *et al.* (2018) demonstrou que, para o traço 1:1,68:2,63, em relação ao traço 1:0:2,63, a resistência à compressão apresentou aumento na ordem de 86%. Contudo, o traço com maior teor de areia incorporado se demonstrou impermeável. Isto indica que o aumento da resistência à compressão observado em tais trabalhos, em função da incorporação de areia à mistura, podem ser resultado da diminuição da porosidade e consequente taxa de infiltração, já que uma matriz cimentícia mais densa apresenta maior resistência.

Com os resultados obtidos no presente trabalho, observa-se que a manutenção da resistência aferida não é função de uma diminuição da porosidade, visto que essa se manteve entre 21,87% e 25,25% para os traços analisados, não sendo nesse caso uma propriedade significativa. Entretanto, como já citado, nota-se que a massa específica do material no estado endurecido se elevou com o aumento do teor de areia incorporado à mistura, mesmo com tal material substituindo parte do cimento da pasta, indicando que mesmo com a porosidade se mantendo constante, a matriz cimentícia tornou-se mais densa e conseqüentemente mais resistente. Tal fato pode ser uma das justificativas para a manutenção da resistência verificada em peças com relação m/c de 0,5 e 1,0, além das questões de higroscopia da areia como citado.

4.5 CONSUMO DE CIMENTO

Os consumos reais dos materiais utilizados para confecção das peças de concreto permeável foram obtidos através das Equações 10 e 11, e estão demonstrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Consumos reais obtidos

m/c	C _{cim} (kg/m ³)	C _{agm} (kg/m ³)	C _{agg} (kg/m ³)
0,00	423,96	0,00	1594,09
0,50	326,64	163,32	1594,03
1,00	265,84	265,84	1595,02
1,50	223,84	335,76	1593,76

Fonte: Os autores, 2022.

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

Os consumos de cimento de diferentes traços com incorporação de agregado miúdo podem ser previstos em misturas de concreto permeável através do potencial de redução no consumo de cimento R_{cim}, conforme demonstrado nas Equações 13 e 14.

$$R_{cim} = \frac{m/c}{d_{agm} \cdot \left(\frac{1}{d_{cim}} + a/c + \frac{m/c}{d_{agm}} \right)} \quad (13)$$

Sendo:

m/c – relação agregado miúdo/cimento

d_{agm} – densidade do agregado miúdo

d_{cim} – densidade do cimento

a/c – relação água/cimento

$$C_{cim,m/c} = C_{cim,0} \cdot (1 - R_{cim}) \quad (14)$$

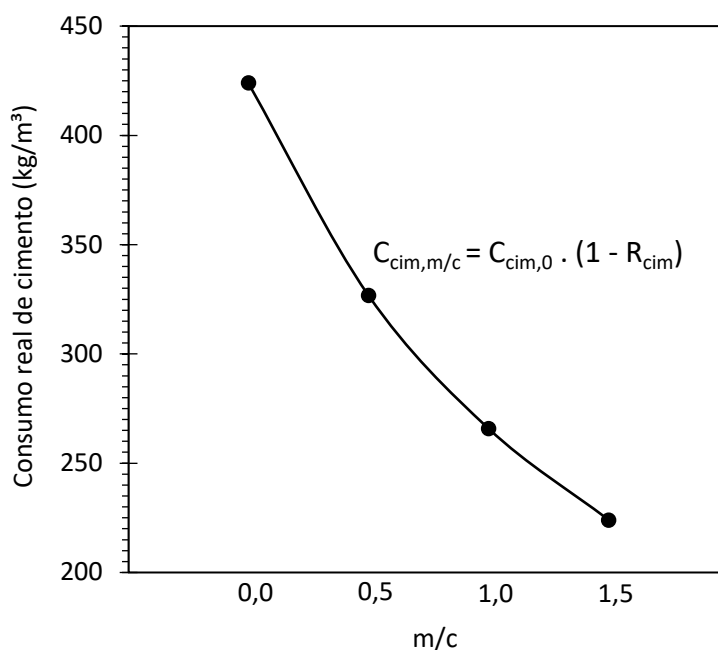
Sendo:

C_{cim,m/c} – consumo de cimento estimado na mistura com teor de agregado miúdo m/c

C_{cim,0} – consumo de cimento da mistura sem adição de agregado miúdo

Os valores referentes ao consumo real de cimento das misturas confeccionadas, descritos na Tabela 16, foram demonstrados na Figura 30, e confrontados com a curva de consumo de cimento obtida através das Equações 13 e 14.

Figura 30 - Consumo de cimento real dos traços



Fonte: Os autores, 2022.

Pode-se perceber, através da Figura 30, que a curva de consumo de cimento se mostra representativa para os resultados obtidos dos traços ensaiados, indicando aplicabilidade da metodologia.

O cálculo da intensidade de consumo de cimento (I_c), é um valor que representa a quantidade de cimento consumido em cada traço para cada 1 MPa de resistência, podendo estabelecer o traço mais eficiente através desse recurso, representado pelo menor valor de I_c . A intensidade de consumo de cimento pode ser obtida através da Equação 15, permitindo relacionar o consumo de cimento de determinada mistura com seu respectivo valor de resistência mecânica.

$$I_c = \frac{C_{cim}}{f_c} \quad (15)$$

Sendo:

C_{cim} – consumo real de cimento

F_c – resistência à compressão

Os dados obtidos para intensidade de consumo de cimento dos traços ensaiados são demonstrados na Tabela 17. Com base nos resultados, pode-se

observar que, em geral, com a inclusão de areia e conseqüente diminuição do consumo de cimento, a resistência das peças de concreto permeável se manteve próxima até a relação m/c de 1,0. Para a relação m/c de 1,5, a resistência à compressão foi a mais baixa dentre os traços, ficando em torno de 31,60 MPa. Contudo, o traço em questão apresentou eficiência mecânica superior ao traço de referência.

Tabela 17 - Intensidade de consumo de cimento

m/c	f _c (MPa)	C _{cim} (kg/m ³)	I _c (kg/m ³ .MPa)
0,00	38,30	423,70	11,06
0,50	36,42	326,70	8,97
1,00	39,43	265,80	6,74
1,50	31,60	224,10	7,09

Fonte: Os autores, 2022.

Para todos os traços com adição de areia ensaiados, em relação ao traço de referência, pode-se dizer que houve um aprimoramento mecânico das misturas com aumento da eficiência quanto ao consumo de cimento. Ainda, através do cálculo da intensidade de consumo de cimento, observa-se que o traço com relação m/c de 1,0 apresenta maior eficiência que os demais, com I_c de 6,74 kg.m⁻³.MPa⁻¹, sendo esse o menor valor dentre todos. Segundo os autores Daminieli *et al.* (2010) valores mínimos de intensidade de consumo de cimento para concretos convencionais de 60 MPa ficam em torno de 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹, e para concretos de 20 MPa, em torno de 13 kg.m⁻³.MPa⁻¹. Segundo os autores, à medida que a resistência do concreto diminui, o valor de I_c aumenta progressivamente. De acordo com o trabalho de Mikami (2022), para concretos permeáveis com 20% de porosidade e relação m/c de 0,2, o valor de I_c ficou em torno de 17,5 kg.m⁻³.MPa⁻¹, e para concretos permeáveis com 20% de porosidade e relação m/c de 0,4, em torno de 16,2 kg.m⁻³.MPa⁻¹.

4.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir do exposto é possível assimilar algumas características do material ensaiado, como a resistência à compressão, a porosidade e a taxa de infiltração. O resumo dos resultados obtidos pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18 - Caracterização física das peças de concreto permeável

m/c	ρ_f (g/cm³)	P_f (%)	f_c (MPa)	k (cm/s)	ρ (g/cm³)	P (%)
0,00	2,15	20,01	38,30	0,99	2,06	25,25
0,50	2,19	20,04	36,42	1,21	2,12	22,95
1,00	2,21	19,98	39,43	1,09	2,15	22,04
1,50	2,23	20,05	31,60	1,54	2,17	21,87

Fonte: Os autores, 2022.

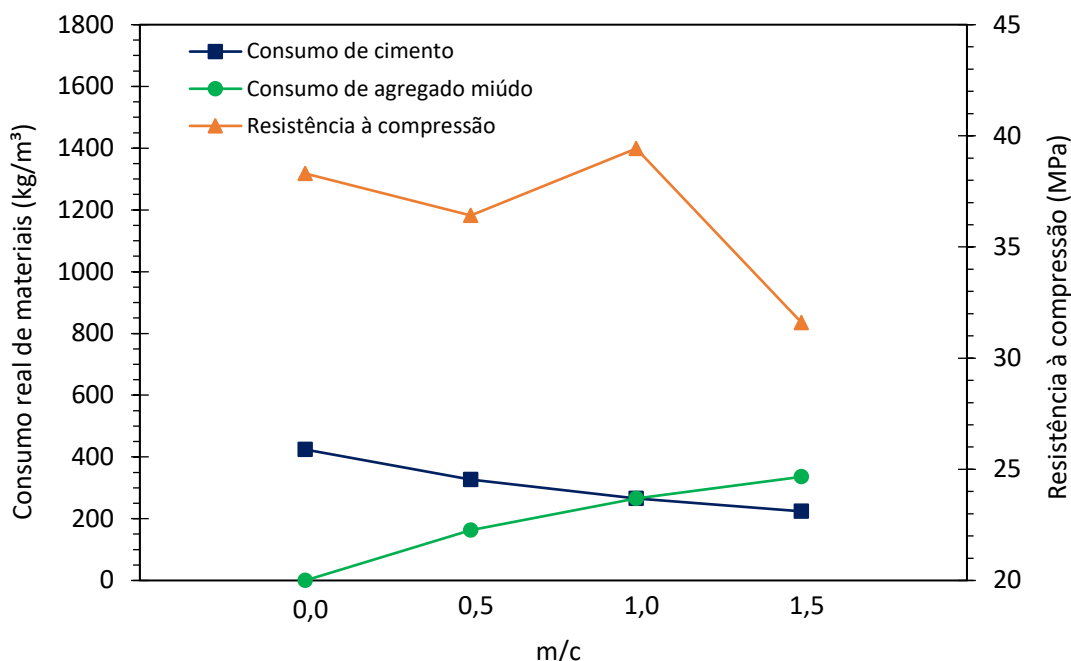
Notas: m/c – Relação agregado miúdo/cimento; ρ_f – Massa específica no estado fresco; P_f – Porosidade no estado fresco; f_c – Resistência à compressão; k – Taxa de infiltração; ρ – Massa específica no estado endurecido; P – Porosidade no estado endurecido.

Nota-se que a porosidade prevista no método do Grau de Compactação resultou em médias maiores para os ensaios de porosidade no estado endurecido, devido a geração de poros na pasta de cimento. Ainda, a porosidade no estado fresco foi mantida constante ao longo de todos os traços ensaiados, independentemente da quantidade de areia incorporada, indicando que o material não interferiu em tal propriedade, e que o método empregado se mostra adequado para dosagem de concretos permeáveis com adição de agregado miúdo. Através da Tabela 18 também é possível notar suscintos aumentos na massa específica das peças de concreto permeável conforme aumento dos teores de areia incorporados à mistura, indicando que tal adição gera uma matriz cimentícia mais densa.

A taxa de infiltração se demonstrou adequada em todas as peças ensaiadas, ficando acima do valor exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015) de 0,1 cm/s. As lajotas de concreto sem adição de areia ficaram abaixo dos valores obtidos para os demais traços, mas em nenhum momento os valores fugiram do desvio padrão obtido nos outros traços.

Com base na Figura 31, pode-se perceber que a resistência à compressão das peças de concreto permeável não é função do consumo de cimento das misturas, sendo possível, dessa forma, a manutenção da resistência simultaneamente a diminuição do consumo de cimento.

Figura 31 - Relação entre o consumo de cimento dos traços com a resistência gerada



Fonte: Os autores, 2022.

Para os traços analisados, em relação ao traço de referência m/c - 0,0, as reduções do consumo de cimento foram de 23%, 37% e 47% para as relações m/c de 0,5, 1,0 e 1,5, respectivamente. Em relação ao traço de referência, por exemplo, o traço com relação m/c de 1,0 apresentou redução de 37% no consumo de cimento (265,84 kg/m³), porém mantendo os valores de resistência semelhantes àquele traço.

Sendo assim, para os traços com adição de agregado miúdo, havendo aumento ou apenas a manutenção das propriedades mecânicas e hidráulicas do material, qualquer relação m/c adotada se mostra vantajosa, visto que haverá redução do consumo de cimento Portland e conseqüente redução do custo final da mistura. Para todos os traços com adição de areia, constatou-se o aprimoramento do material em relação ao traço de referência, indicando um grande benefício no uso da areia na dosagem de concretos permeáveis.

5 CONCLUSÃO

Com base no exposto, conclui-se que a dosagem de agregado miúdo em misturas de concreto permeável pode ser benéfica para o material, promovendo redução do consumo de cimento Portland e mantendo valores adequados de resistência e permeabilidade. A redução do consumo de cimento promove benefícios quanto a questão ambiental e econômica, visto que, além de ser o material mais caro em misturas de concreto, ainda promove a emissão de grandes taxas de CO₂ durante sua produção. Dessa forma, qualquer redução no consumo desse material se apresenta como um fator vantajoso.

Ainda, há a contribuição do presente trabalho em abordar o Método do Grau de Compactação e mostrar como ele é bem aplicado e incita resultados coerentes em parâmetros importantes, permitindo a dosagem de areia em misturas de concreto permeável. Os parâmetros de controle do método previstos no momento da dosagem foram atingidos durante os ensaios das amostras, onde a porosidade, o grau de compactação e a massa específica se mostraram coerentes.

Por fim, de acordo com os resultados obtidos, foi possível demonstrar como a definição de concreto permeável conter a ideia de exclusão do agregado miúdo é errônea, devendo ser considerado apenas um material com a premissa de ser poroso, mas não necessariamente desprezando a adição de agregado miúdo. Dessa forma, espera-se que novas pesquisas continuem abordando tal assunto, abandonando a ideia de exclusão do agregado miúdo em concretos permeáveis.

REFERÊNCIAS

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

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 C496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.** 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete.** 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete.** 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

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 – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

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 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

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

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

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção Civil: novos materiais para construção civil Vol.1.** 5ª Ed. Rio de Janeiro, 488p. 2008.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102-110, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>.

CASTRO, T. Q. **Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis.** 2011. Dissertação (Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, J. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research finding and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262-274, 2016.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPCÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde Debate**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 3, p. 94-108, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S307>.

COELHO, M. W. F.; ROCHA, C. A. A. Influência do tamanho do agregado na permeabilidade e na resistência do concreto permeável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61, 2019, Fortaleza. **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto.** Fortaleza: IBRACON, 2019.

DAMINELI, B. L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

DEBENATH, B.; SARKAR, P. P.; Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-art review. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 12, 2018.

FILHO, M.; PIERALISI, R.; DELGADO, J. M. A. Influência da relação pasta agregado no concreto permeável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61, 2019, Fortaleza. **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto.** Fortaleza: IBRACON, 2019.

FONSECA, E. L. A. **Redução da quantidade de cimento em concreto permeável utilizando o método do empacotamento compressível**. Projeto de conclusão de curso. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, Niterói, 2020.

FRANÇA, A. P. M.; COSTA, F. B. P. Evaluating the effect of recycled concrete aggregate and sand in pervious concrete paving blocks. **Road Materials and Pavement Design**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2020680>.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>.

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.

MANAN, A.; AHMAD, M.; AHMAD, F.; BASIT, A.; KHAN, M. N. A. **Experimental Investigation of Compressive Strength and Infiltration Rate of Pervious Concrete by Fully Reduction of Sand**. Civil Engineering Journal, v. 4, n. 4, April, 2018.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas**. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Cartilha_Pav_Intertravado_Permeavel_v1.pdf.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O. **Conceitos e requisitos para pavimentos intertravado permeável**. Prática Recomendada PR-2. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/PR2_Conceitos_requisitos_pav_permeavel.pdf.

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/wp-content/uploads/2016/01/PR3_Conceitos_Requisitos_Pav_Concreto_Permeavel.pdf

MARUYAMA, C. M.; FRANCO, M. A. R. Pavimentos permeáveis e infraestrutura verde. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 4, n. 9, p. 73-86, 2016. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/cidades_verdes/article/view/1384/1406.

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 dos Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

NCPTC. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. NATIONAL CONCRETE PAVEMENT TECHNOLOGY CENTER. Iowa Department of Transportation. Iowa Concrete Paving Association, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

PIERALISI, R.; SANDOVAL, G. F. B.; SEGURA-CASTILLO, L.; BARBOSA, M. N. C.; ASSUNÇÃO, S. T. Contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de dosagem para concreto permeável baseada no desempenho. **Journal of Urban Technology and Sustainability**. v. 03, n. 01; 2020.

PINTO, L. L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

QUEIROZ, V. S. **Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO2 na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC3 e o cimento Portland composto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

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.

STRZODA, F. A. *et al.* Concreto permeável como alternativa para pavimentos retroportuários. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 9, n. 2, p. 155-164, 2017. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11274/209209209725>.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75-90, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000100006>.

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

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

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões**. SNIC. Rio de Janeiro, p. 64. 2019.

XIE, X.; ZHANG, T.; WANG, C.; YANG, Y.; BOGUSH, A.; KHAYRULINA, E.; HUANG, Z.; WEI, J.; YU, Q. Mixture proportion design of pervious concrete based on the

relationships between fundamental properties and skeleton structures. **Cement and Concrete Composites**. v. 113, p. 1-16, 2020.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 51-60, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>.

ZHONG, R. et al. Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1158-1168, 2016.