

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

BRYAN EDUARDO MOURA JANSEN  
FELIPE MARCOS CAMACHO

DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO DE CONCRETO POROSO PARA A PRODUÇÃO  
DE LAJOTAS PERMEÁVEIS POR CONTROLE DE POROSIDADE

PONTA GROSSA  
2022

BRYAN EDUARDO MOURA JANSEN  
FELIPE MARCOS CAMACHO

DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO DE CONCRETO POROSO PARA A PRODUÇÃO  
DE LAJOTAS PERMEÁVEIS POR CONTROLE DE POROSIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade  
Estadual de Ponta Grossa.  
Orientador: Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami.

PONTA GROSSA  
2022

## RESUMO

O concreto poroso é um tipo de material utilizado para a produção de pavimentos permeáveis que se caracteriza pela sua alta condutividade hidráulica quando comparado ao concreto convencional, sendo aplicado em locais onde deseja-se reduzir o escoamento superficial e conseqüentemente a incidência de inundações e enchentes. O principal fator limitante na aplicação desse material é a falta de normas consolidadas e padronização dos métodos de dosagem e ensaios dos elementos de concreto poroso, o que dificulta a compreensão de como a porosidade de projeto afetará no desempenho do elemento executado. No presente estudo, foram dosadas misturas com porosidades de 20, 25, 30 e 35%, as quais foram controladas pelo grau de compactação. As amostras moldadas foram analisadas com o objetivo de compreender a influência da variação da porosidade na condutividade hidráulica, resistência à compressão e consumo de cimento na mistura, determinando uma faixa de porosidade que satisfaça as condições de norma para a execução do elemento poroso. Para as porosidades determinadas foram atingidas resistências entre 15,9 e 38,30 MPa, condutividades hidráulicas entre 0,99 e 3,68 cm/s e um consumo de cimento entre 424 e 224 kg/m<sup>3</sup>. Com os resultados obtidos foi possível definir a faixa de porosidade entre 15,5 e 31% como a recomendada para a execução do concreto permeável para que se alcance um desempenho mecânico e hidráulico que satisfaça as normas vigentes.

**Palavras chave:** concreto poroso, pavimento permeável, drenagem urbana, resistência, permeabilidade.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Pavimento permeável aplicado em estacionamento .....	12
Figura 2 – Pavimento permeável aplicado em calçadas.....	12
Figura 3 – Tipos de sistemas de pavimentos permeáveis.....	13
Figura 4 – Pavimentos com reservatórios em nível ou inclinados.....	16
Figura 5 – Pavimentos com reservatórios de escoamento lateral.....	17
Figura 6 – Permeâmetro de carga variável (a) e permeâmetro de carga constante (b) .....	21
Figura 7 - Método da determinação da permeabilidade pela taxa de infiltração .....	21
Figura 8 – Relação de vazios e resistência a compressão.....	23
Figura 9 – Relação peso unitário e resistência a compressão .....	23
Figura 10 – Etapas experimentais para o desenvolvimento do estudo.....	30
Figura 11 – Agregado graúdo utilizado na confecção do concreto .....	31
Figura 12 - Distribuição granulométrica do pedrisco utilizado .....	32
Figura 13 – Teste de drenagem de pasta .....	34
Figura 14 – Lajota de concreto permeável .....	40
Figura 15 - Compactador utilizado na moldagem das amostras .....	40
Figura 16 - Lajota de concreto permeável.....	42
Figura 17 - Ensaio de taxa de infiltração .....	42
Figura 18 - Relação entre porosidade e massa específica no estado fresco .....	45
Figura 19 - Relação entre porosidade massa específica no estado endurecido .....	46
Figura 20 - Relação entre porosidade e taxa de infiltração .....	49
Figura 21 - Relação entre porosidade e resistência à compressão .....	51
Figura 22 - Relação entre consumo de cimento e porosidade.....	52
Figura 23 - Relação entre porosidade, resistência à compressão e consumo de cimento .....	53
Figura 24 - Relação entre porosidade, resistência à compressão e taxa de infiltração .....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Terminologia geralmente aplicada a pavimentos porosos .....	14
Quadro 2 – Resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável .....	25
Quadro 3 - Métodos de dosagem encontrados na literatura .....	28
Quadro 4 – Normas para determinação das propriedades do agregado graúdo .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação para o material de sub-base e/ou base.....	15
Tabela 2 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base .....	15
Tabela 3 - Propriedades físicas obtidas na caracterização do pedrisco .....	32
Tabela 4 - Características do traço piloto de concreto permeável P20, P25, P30 e P35.....	37
Tabela 5 - Resultados do teste de compactação das misturas P20, P25, P30 e P35 .....	39
Tabela 6 – Ensaio realizados para a caracterização dos concretos produzidos e suas respectivas normas.....	41
Tabela 7 - Massa específica no estado fresco .....	44
Tabela 8 - Massa específica no estado endurecido.....	45
Tabela 9 - Porosidade no estado fresco.....	46
Tabela 10 - Porosidade no estado endurecido .....	47
Tabela 11 - Porosidade no estado endurecido. ....	47
Tabela 12 - Taxa de infiltração média para cada porosidade.....	48
Tabela 13 - Resistências mecânicas médias e desvio padrão para P20, P25, P30 e P35.....	50
Tabela 14 - Consumos de cimento para cada porosidade .....	52
Tabela 15 - Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento expressa em bics.....	54

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
1.1	OBJETIVO.....	9
1.1.1.	Objetivo Geral .....	9
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	9
1.2	JUSTIFICATIVA .....	9
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1	PAVIMENTO PERMEÁVEL.....	11
2.1.1.	Estrutura.....	13
2.1.2.	Vantagens e desvantagens do pavimento permeável.....	17
2.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL .....	18
2.2.1.	Porosidade .....	19
2.2.2.	Permeabilidade .....	19
2.2.3.	Resistência mecânica .....	22
2.2.4.	Crítérios de norma .....	24
2.3	MÉTODOS DE DOSAGEM .....	26
2.3.1.	Método do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) .....	26
2.3.2.	Método do American Concrete Institute (ACI) .....	26
2.3.3.	Outros métodos de dosagem .....	27
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>	<b>30</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	31
3.1.1.	Agregado Graúdo .....	31
3.1.2.	Cimento .....	33
3.2	DESENVOLVIMENTO DO TRAÇO .....	33
3.2.1.	Teste de Drenagem de Pasta.....	33
3.2.2.	Determinação do Traço Piloto .....	34
3.2.3.	Teste de Compactação.....	37
3.5	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS .....	41
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>

4.1	MASSA ESPECÍFICA .....	44
4.2	POROSIDADE .....	46
4.3	TAXA DE INFILTRAÇÃO.....	48
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	50
4.5	CONSUMO DE CIMENTO .....	51
4.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE A DOSAGEM .....	54
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto permeável, ou poroso é definido como o concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade (ABNT, 2015). A mistura do concreto poroso é composta por aglomerante, agregado graúdo, água e diferentemente do concreto convencional utiliza pouco ou nenhum agregado miúdo em sua composição (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). A principal aplicação deste material é na execução de pavimentos drenantes onde existe a necessidade de drenar a água que incide sobre o material e direcioná-la para as camadas inferiores do pavimento (MIKAMI, 2022).

A utilização do concreto poroso ainda é pouco difundida na Engenharia, sendo um dos principais motivos a falta de normas que padronizem a sua execução, pois os estudos existentes sobre esse tema apresentam apenas métodos experimentais de dosagem. Diversos fatores influenciam nas propriedades do concreto permeável: granulometria dos agregados, relação água-cimento, relação agregado-cimento, tipo do aglomerante e método de compactação (NGUYEN *et al.*, 2014). Um dos principais desafios na concepção do concreto permeável é aliar a sua permeabilidade com a resistência exigida em norma para aplicação em pavimentos.

A porosidade é uma das propriedades mais importantes do concreto poroso, pois a alteração deste valor influencia diretamente na permeabilidade e na resistência do elemento de concreto permeável. Com o controle dessa alteração de porosidade, é possível definir um valor ótimo que satisfaça os critérios de norma das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto. Em elementos mais porosos, o elevado índice de vazios interconectados gera maior permeabilidade, em contrapartida diminui a resistência mecânica do elemento (IBRAHIM *et al.*, 2014). Em elementos menos porosos, ocorre o inverso, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência mecânica.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver misturas de concreto permeável através do controle de porosidade a fim de produzir peças de pavimentação que apresentem propriedades mecânicas e hidráulicas que satisfaçam os parâmetros determinados pelas seguintes normas: NBR 9781, ASTM C1688, ASTM C1701 e ASTM C1754.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Adaptar a metodologia de dosagem de concreto permeável para a produção de lajotas permeáveis;

Compreender como o aumento da porosidade do concreto permeável prejudica as suas propriedades mecânicas;

Avaliar como o aumento da porosidade auxilia na permeabilidade do concreto permeável;

Analisar a eficiência no consumo de cimento das misturas de concreto permeável em função da porosidade;

Estabelecer a porosidade ótima para produção de peças de pavimentação de concreto permeável.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Com o alto crescimento demográfico nas regiões urbanas, em especial nas grandes cidades, as áreas verdes (permeáveis) foram impermeabilizadas pelo aumento das edificações e pavimentações existentes (COELHO; ROCHA, 2019). Um dos principais problemas encontrados nos centros urbanos é a ineficiência dos sistemas de drenagem quando expostos a grandes precipitações. Aliado a isso, o aumento do escoamento superficial gera uma sobrecarga nas galerias pluviais dando origem a problemas como enchentes e inundações (MARCHIONI; MAYOR; SILVA, 2013). O IBGE realizou um estudo sobre a distribuição da população exposta em áreas de riscos no Brasil, o qual mostrou que a porção Centro-Oeste do Brasil apresenta uma porcentagem de população em situação de risco em relação à

população monitorada de 0,33%. Para a região Norte, a porcentagem é de 3,88%, seguido da região Sul com 6,01%, em segundo lugar a região Sudeste apresentando 9,77% de população e a região com maior porcentagem a Nordeste com 11,37% (IBGE, 2018). Esses dados evidenciam a necessidade de alternativas que reduzam o risco enfrentado pela população de áreas de risco. Uma das soluções em estudo é a utilização do concreto permeável na pavimentação, aumentando assim a capacidade de drenagem e diminuindo o escoamento superficial nas vias e calçadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL

O pavimento é qualquer estrutura construída após a terraplanagem que tem como função suportar e distribuir ao subleito as solicitações de qualquer tipo de tráfego, melhorar as condições de rolamento da via e aumentar sua durabilidade (ABNT, 2015). Em sua maioria são executados pavimentos impermeáveis, que não apresentam capacidade de drenagem das águas pluviais, ocorrendo a formação de escoamento superficial na via que pode sobrecarregar os sistemas de drenagem urbana e provocar eventos de cheia (MARCHIONI; MAYOR; SILVA, 2013). O pavimento permeável apresenta-se como uma alternativa para solucionar essa má interação com a água, podendo auxiliar no escoamento superficial funcionando como um meio de infiltração, detenção e/ou retenção.

Define-se como pavimento permeável, um pavimento que apresenta resistência mecânica necessária para resistir aos esforços solicitados ao mesmo tempo que apresenta porosidade e permeabilidade que permita a rápida infiltração da água por meio de seus vazios (ABNT, 2015). A rápida infiltração da água no pavimento reduz o volume acumulado de água sobre a superfície, gerando um impacto positivo ao meio ambiente (ACIOLI, 2005). Os pavimentos permeáveis apresentam uma interação positiva com a água, a qual é infiltrada em sua estrutura e escoam até as camadas inferiores.

A principal aplicação do pavimento permeável é utilizando-os em meios de drenagem, como estacionamentos, estradas residenciais, calçadas, estruturas hidráulicas, quadra de tênis, estufas, decks de piscinas, camadas de base permeáveis sob pavimentos pesados, entre outros. Entretanto, pode ser utilizado como isolante térmico e acústico, é aplicado em paredes de edifício para auxiliar no controle de temperatura interno e em paredes de barreira acústica quando direcionados para isolamento acústico (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Alguns exemplos de pavimentos permeáveis e suas aplicações podem ser visualizadas na Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 – Pavimento permeável aplicado em estacionamento



FONTE: TENNIS *et al.* (2004).

Figura 2 – Pavimento permeável aplicado em calçadas



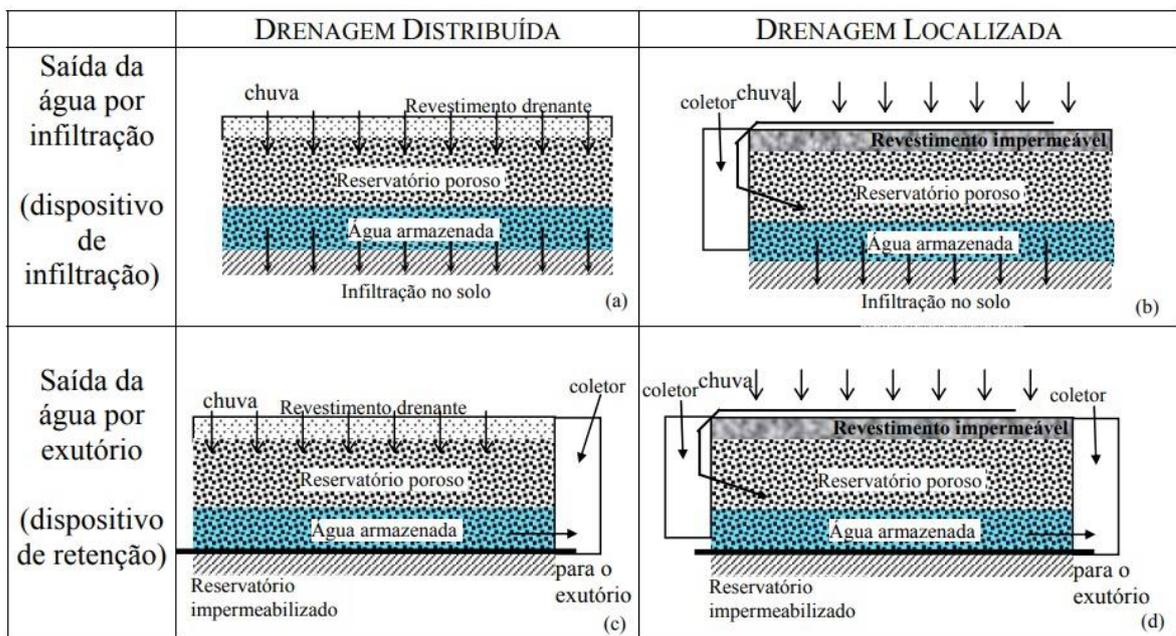
FONTE: TENNIS *et al.* (2004).

Um dos grandes desafios para difundir a aplicação do pavimento permeável é expandir o seu uso, podendo tornar este tipo de material em uma excelente alternativa para os problemas causados pela impermeabilização dos solos nos grandes centros urbanos.

### 2.1.1. Estrutura

Os pavimentos permeáveis podem ser divididos em quatro tipos principais, dependendo do seu revestimento (drenante ou impermeável) e da sua função (infiltração ou armazenamento), conforme está ilustrado na Figura 3. Nos pavimentos de infiltração a água percola pela estrutura e infiltra no solo, já nos pavimentos de armazenamento a água é coletada e destinada ao exutório.

Figura 3 – Tipos de sistemas de pavimentos permeáveis



FONTE: AZZOUT apud ACIOLI (2003).

A estrutura do pavimento permeável é constituída de maneira semelhante ao pavimento convencional podendo possuir diversas camadas dependendo da sua aplicação. Segundo Virgiliis (2009), as camadas presentes em um pavimento podem ser definidas seguindo o Quadro 1.

Quadro 1 - Terminologia geralmente aplicada a pavimentos porosos

<b>Terminologia aplicada a Pavimentos Porosos</b>	
<b>Terminologia</b>	<b>Definição</b>
Camada de base	Camada colocada abaixo da superfície de revestimento para aumenta a espessura do pavimento. Pode ser simplesmente chamada de Base.
Camada Filtrante	Qualquer camada entre outras ou entre o pavimento e o subleito que detenha a migração de partículas para os vazios da camada subjacente.
Geomembrana	Tecido impermeável geralmente plástico ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD) utilizada em sistemas impermeabilizantes.
Geotêxtil	Manta não-tecida de filamentos de polipropileno que possibilita a livre passagem das águas de infiltração para a meio drenante.
Sobrecamada	Camada aplicada sobre qualquer tipo de pavimento preexistente.
Reservatório	Qualquer parte do pavimento com capacidade de estocagem e condutividade de água. O reservatório pode ser sobreposto ou combinado com outras camadas do pavimento. Também chamado de Reservatório de Base, Camada Drenante ou Colchão drenante.
Sub-base	Camada colocada abaixo da Base a fim de aumentar a espessura do pavimento.
Subleito	Solo natural ou reforçado abaixo da estrutura do pavimento, responsável pela absorção em última instância dos carregamentos.
Revestimento	Camada do pavimento que recebe diretamente a carga de tráfego.

FONTE: VIRGILIIS (2009).

Em geral a estrutura do pavimento permeável é composta por quatro camadas: subleito, sub-base, base e revestimento. O revestimento possui a função de transmitir os esforços recebidos às camadas inferiores, devendo também ser resistentes ao desgaste provocado pelo fluxo de veículos e pessoas sobre o pavimento. Podem ser utilizados diversos materiais no revestimento, dependendo dos

requisitos de durabilidade, economia, aparência e facilidade de execução (VIRGILIIS, 2009).

Para a base e a sub-base, a NBR 16416 (ABNT, 2015) determina alguns requisitos de resistência e granulometria do material para executar o pavimento permeável. Os requisitos exigidos pela norma estão apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2 abaixo.

Tabela 1 – Especificação para o material de sub-base e/ou base

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão “Los Angeles”	ABNT NBR NM 51	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32%
Índice de suporte Califórnia (CBR)	ABNT NBR 9895	≥ 80%
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2%

FONTE: NBR 16416 (ABNT, 2015).

Tabela 2 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida em massa %	
	Sub-base	Base
75 mm	0	-
63 mm	0 a 10	-
50 mm	30 a 65	-
37,5 mm	85 a 100	0
25 mm	90 a 100	0 a 5
19 mm	95 a 100	0 a 35
12,5 mm	-	40 a 75
4,75 mm	-	90 a 100
2,36 mm	-	95 a 100

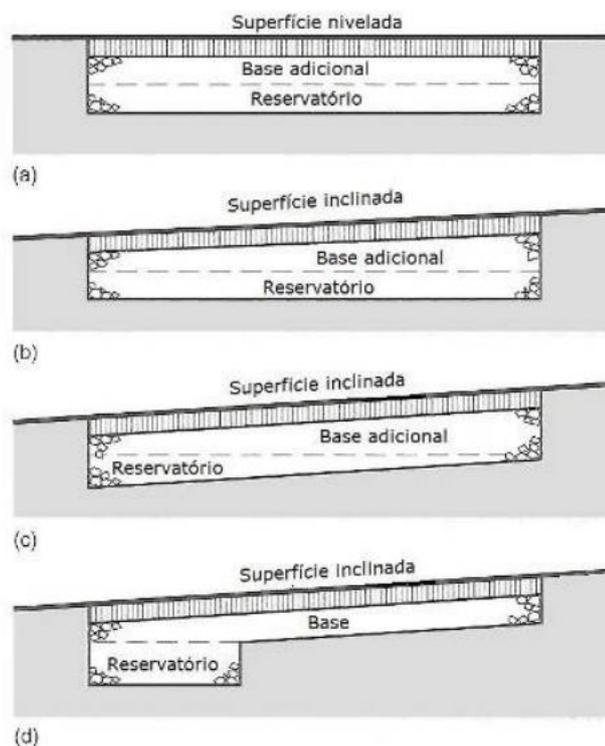
FONTE: NBR 16416 (ABNT, 2015).

O subleito é a camada de solo natural ou reforçado que se encontra abaixo da estrutura do pavimento e tem por função absorver os esforços mecânicos de todas as camadas acima dele. Ainda é possível inserir uma sobrecamada acima da camada de revestimento para auxiliar na drenagem do escoamento superficial, melhorar a visibilidade, aumentar a aderência e diminuir o barulho e o reflexo do sol sobre a superfície do pavimento (VIRGILIIS, 2009).

Os reservatórios são de grande importância no pavimento permeável, pois ele é responsável por encaminhar a água infiltrada diretamente para o subleito ou para um exutório ou saídas, através de tubos de drenagem. A água infiltrada é estocada entre os vazios dos agregados que obedecem a regulamentações específicas para serem considerados reservatórios, como por exemplo a do DNER (Departamento Nacional de Estrada e Rodagem) (VIRGILIIS, 2009). Há diversos tipos de reservatórios que diferem segundo inclinação, além de possuírem ou não saídas de tubos drenantes e a posição em que esses tubos estão em relação ao reservatório.

A Figura 4 possibilita a visualização das variações de configurações de reservatórios de acordo com a inclinação da superfície. Quando a superfície é nivelada, o reservatório também é nivelado (a). Ao passo que quando a superfície é inclinada, o reservatório pode ser nivelado ao adicionar camada de base para compensar essa inclinação (b). Para respeitar a inclinação da superfície, é possível construir um reservatório com caimento, onde a água se postará ao ponto inferior, limitando a capacidade do reservatório (c). Solucionando esse empecilho, é possível construir um reservatório apenas na parte inferior do decaimento, acrescentando altura a esse reservatório, aumentando assim seu volume de armazenamento (d).

Figura 4 – Pavimentos com reservatórios em nível ou inclinados

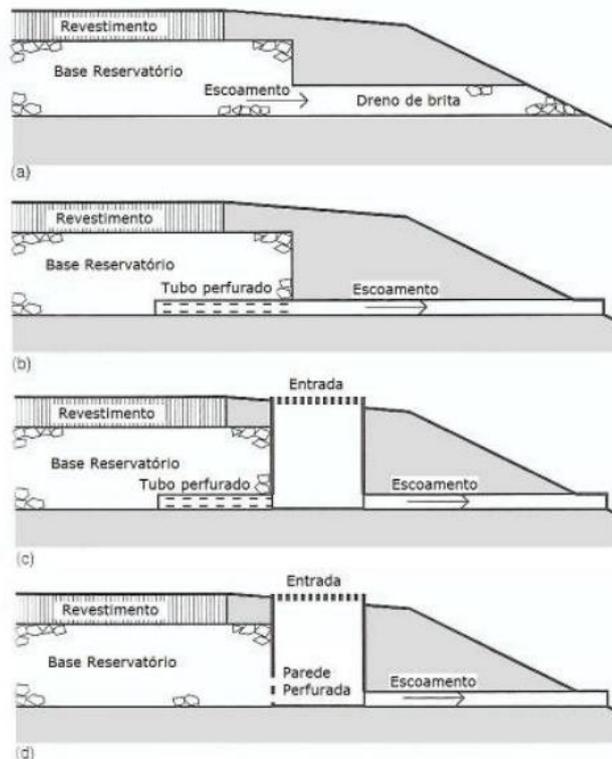


FONTE: VIRGILIIS (2009).

Os reservatórios com saída lateral são utilizados como escape para a água que entra no pavimento, além de atuarem como limitadores de profundidade, não permitindo que a água preencha o reservatório por completo.

Na Figura 5 é possível observar os tipos de saídas inferiores do reservatório, as águas podem ser captadas por drenos granulares (a), tubos perfurados com ou sem entradas que permitam o monitoramento e manutenção do sistema (b) e (c) (VIRGILIIS, 2009). A comunicação do reservatório com o tubo de escoamento pode ser realizada apenas perfurando a parede da entrada de manutenção, como observado no caso (d).

Figura 5 – Pavimentos com reservatórios de escoamento lateral



FONTE: VIRGILIIS (2009).

### 2.1.2. Vantagens e desvantagens do pavimento permeável

A maior vantagem do sistema de pavimentação permeável é justamente sua capacidade de permeabilidade, a qual contribui para redução do escoamento das águas superficiais com potencial em reduzir o risco de inundações repentinas. Por outro lado, a alta porosidade desse pavimento, que é uma das suas principais

vantagens, prejudica o desempenho mecânico, reduzindo a capacidade de alto tráfego sobre o pavimento. Para se obter a melhor eficiência nos dois casos, ou seja, que o pavimento seja suficientemente poroso e resistente aos esforços mínimos de norma, faz-se necessário um estudo profundo sobre as propriedades citadas e suas correlações (IBRAHIM *et al.*, 2014).

Os pavimentos permeáveis contribuem para a sustentabilidade ambiental dos solos e lençóis freáticos graças a sua capacidade de filtração de diferentes tipos de contaminantes, como o cádmio, zinco, cobre e chumbo (BRATTERBO; BOOTH, 2003). Os estudos realizados por Tennis *et al.* (2004) evidenciaram a capacidade de remoção de poluentes, alcançando 82% a 95% de remoção de sólidos suspensos ao ser filtrado pelo pavimento.

Existem também outros benefícios ao utilizar o concreto permeável em pavimentos, a alta porosidade da superfície evita a aquaplanagem dos veículos na via, além de evitar o ofuscamento da visão dos motoristas quando a água refletir a luz solar (IBRAHIM *et al.*, 2014).

## 2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável destaca-se pela sua ótima capacidade de conduzir água por sua estrutura através dos seus poros interconectados, diferentemente do concreto convencional, onde ocorre o escoamento superficial da água. Como sua composição é diferente do concreto convencional, o concreto poroso apresenta particularidades na sua dosagem, produção e caracterização (MIKAMI, 2022).

As propriedades do concreto permeável, assim como o concreto convencional, podem ser divididas nos seus dois estados: fresco e endurecido. No estado fresco a mistura de concreto permeável apresenta menor trabalhabilidade e abatimento quando comparada com o concreto tradicional, tal fato é explicado pela menor quantidade de pasta de cimento e de agregado miúdo na mistura (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Já no estado endurecido, o concreto permeável possui três propriedades fundamentais para seu bom desempenho: porosidade, permeabilidade e resistência mecânica. A porosidade e a permeabilidade são propriedades diretamente relacionadas, pois quanto maior o teor de vazios, maior será a permeabilidade, em contrapartida, a resistência a compressão diminui. Um dos maiores desafios na execução e aplicação do concreto permeável, é encontrar uma

dosagem que apresente uma alta taxa de permeabilidade e que mantenha sua resistência mecânica aceitável aos critérios de norma (ACI, 2010).

### 2.2.1. Porosidade

A porosidade é definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total do material. Os vazios podem ser de diferentes tipos e importância para o funcionamento do elemento de drenagem, pois nem todos os vazios são eficazes para a drenagem ou o armazenamento da água (MONTES; VALAVALA; HASELBACH, 2005). A porosidade aberta, também chamada de porosidade efetiva, é a porosidade mais importante entre as existentes, pois é nela que estão presentes os vazios conectados no concreto que desempenham a função de transportar a água pelo seu interior (IBRAHIM *et al.*, 2014).

Geralmente, a porcentagem de vazios efetivos no concreto permeável se encontra na faixa de 15 a 35% (ACI, 2010) e pode ser controlada pelo nível de compactação da mistura e das propriedades do agregado utilizado (IBRAHIM *et al.*, 2014). Os principais métodos para a obtenção da porosidade total são a pesagem hidrostática (ASTM, 2012), no estado endurecido, e a estimativa por relações volumétricas, no estado fresco (ASTM, 2014).

No método de pesagem hidrostática, proposto pela ASTM C1754 (ASTM, 2012), é determinado o volume do corpo de prova de concreto permeável endurecido e logo após o corpo de prova é submerso em água e medido o volume deslocado. O teor de vazios é calculado usando a diferença entre o volume total e o volume deslocado quando submerso.

A ASTM C1688 (ASTM, 2014) propõe um método baseado na relação de massa específica e teórica, onde uma amostra de concreto permeável fresco é consolidada utilizando um soquete Proctor ou um soquete Marshall. A relação entre massa específica e teórica é obtida com base na medida do corpo de prova consolidado, no volume da mistura e na massa dos materiais dosados.

### 2.2.2. Permeabilidade

A percolação da água pelo interior do elemento de concreto permeável, é uma das principais características de sua aplicação. O elevado teor de vazios existente nos

elementos porosos, permite a percolação de água pelo seu interior e desempenha o papel de drenagem dentro deste sistema. Estudos feitos por Meininger (1988), define a porosidade mínima de 15% no concreto para que a permeabilidade do pavimento seja significativa e que este desempenha sua função de drenagem com eficácia. O coeficiente de permeabilidade do concreto permeável varia de 0,2 cm/s a 1,2 cm/s (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004), porém, valores superiores a 2,0 cm/s já foram atingidos em outros estudos.

Além da porosidade, outros parâmetros estão relacionados com a condutividade hidráulica do concreto. As características do agregado utilizado, o tamanho dos seus poros, a conectividade dos vazios, a tortuosidade dos poros e a sua distribuição granulométrica impactam diretamente na permeabilidade atingida (ACI, 2010). Quanto maior a quantidade de agregados finos na mistura, menor será o teor de vazios do pavimento poroso. Por isso, é recomendado o uso de agregados com distribuição uniforme na mistura, afim de atingir a taxa de percolação desejada no elemento endurecido (ACI, 2010).

A condutividade hidráulica pode ser determinada de maneira similar ao método utilizado no estudo de permeabilidade de solos, onde as amostras são submetidas a um permeâmetro de carga variável (ACI, 2010) ou constante (ABNT, 2015).

No permeâmetro de carga variável, são utilizadas amostras cilíndricas submetidas a uma carga de água variável. O coeficiente hidráulico é obtido pelo tempo necessário para a água escoar de um nível inicial até um nível final dentro da coluna de carga (Figura 6). Já nos ensaios com permeâmetro de carga constante, é utilizado um reservatório de nível constante ou um extravasor como nível de referência para a carga aplicada (Figura 6). Neste caso, o coeficiente hidráulico é obtido pela quantidade de água escoada em um intervalo de tempo determinado.

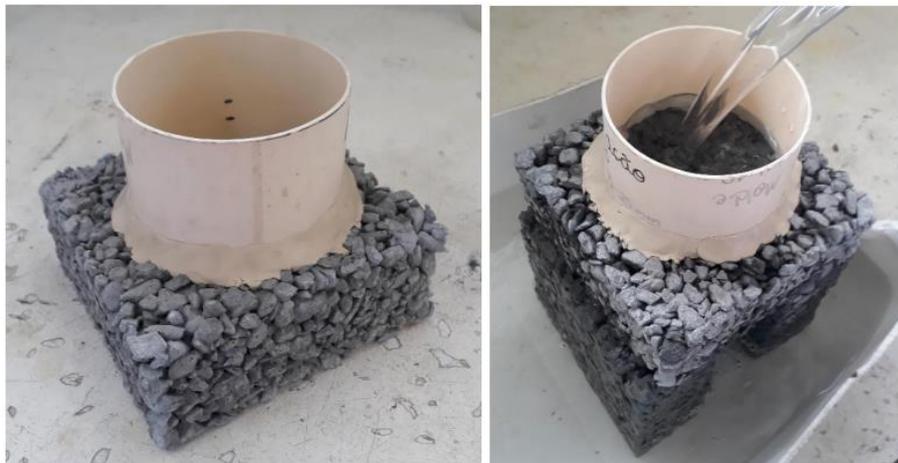
Figura 6 – Permeâmetro de carga variável (a) e permeâmetro de carga constante (b)



Fonte: (a) Neithalath et. al (2010); (b) Ibrahim (2014).

Outra maneira de obter o coeficiente hidráulico do concreto permeável é através do método utilizado na ASTM C1701 (ASTM, 2009), onde é determinada a taxa de infiltração do pavimento. Este método consiste na determinação do tempo necessário para um volume de água pré-estabelecido infiltrar na amostra, sendo o escoamento confinado em um anel de infiltração com medidas conhecidas (Figura 7).

Figura 7 - Método da determinação da permeabilidade pela taxa de infiltração



FONTE: MIKAMI (2022)

### 2.2.3. Resistência mecânica

A resistência mecânica do concreto poroso é uma das suas principais propriedades, sendo necessário atingir a resistência exigida de norma para sua aplicação, o que acaba sendo um fator limitante para a utilização do material. A alta porosidade e permeabilidade exigida dos pavimentos porosos, afetam diretamente na sua resistência mecânica, pois o alto teor de vazios do concreto limita a resistência da sua matriz, sendo mais suscetível a fissuras e rupturas.

A resistência à compressão obtida no concreto permeável normalmente encontra-se na faixa de 3,5 a 28 MPa, o que permite sua aplicação em diversas áreas (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Já a resistência a flexão encontrada no concreto poroso é de 1 a 3,8 MPa, sendo influenciada por diversos fatores, como o grau de compactação, porosidade e a relação agregado/cimento (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Estudos feitos por Meininger (1988) comprovaram que o tamanho do agregado afeta diretamente na resistência a compressão do concreto, pois interfere no teor de vazios do elemento moldado (Figura 8). Mulligan (2005) realizou estudos que relacionaram a influência do esforço de compactação e a resistência a compressão do cilindro (Figura 9). Foi constatado através dos estudos realizados que o aumento do teor de vazios no concreto poroso gera uma diminuição no seu peso específico e também na sua resistência mecânica, portanto para atingir uma alta resistência o teor de vazios é reduzido, prejudicando a sua condutividade hidráulica (ACI, 2010).

Figura 8 – Relação de vazios e resistência a compressão

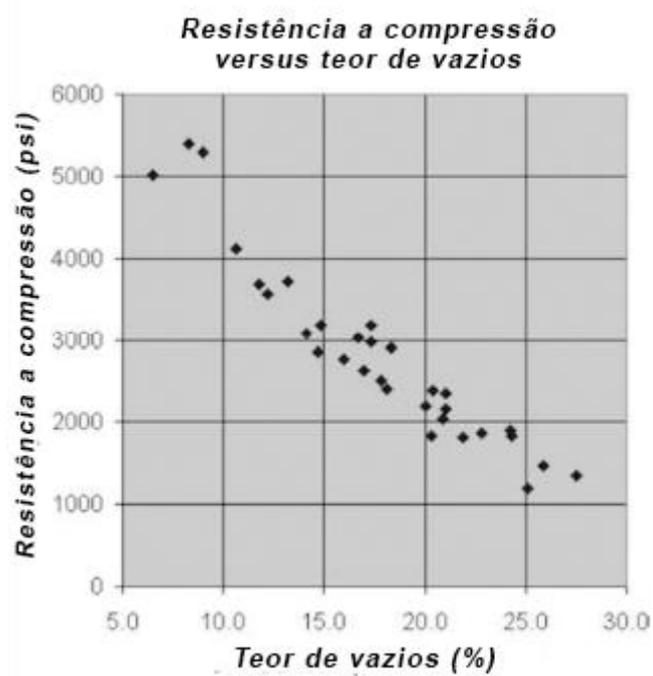
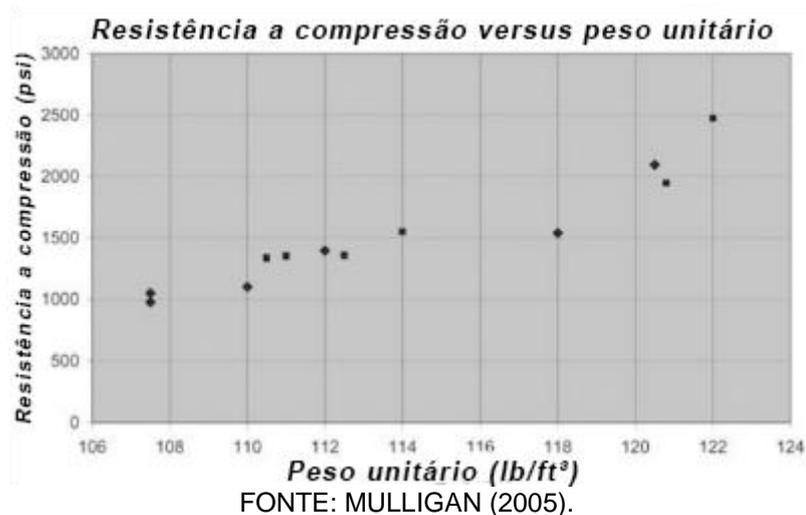


Figura 9 – Relação peso unitário e resistência a compressão



A quantidade e a consistência da pasta de cimento utilizada na mistura é um dos fatores que determina a sua resistência mecânica. O excesso de pasta de cimento na mistura pode preencher os vazios existentes na estrutura do pavimento e diminuir sua porosidade, enquanto a falta de pasta pode gerar uma falha de cobertura dos agregados, diminuindo sua resistência (ACI, 2010). Em relação a consistência, quando a pasta de cimento apresenta aspecto viscoso pode não se espalhar de maneira adequada na mistura e gerar falhas de cobertura, enquanto pastas de

aspecto fluido podem escoar e causar o preenchimento dos vazios existentes na estrutura do pavimento (XIE *et al.*, 2018).

A maior aplicação do concreto poroso depende de uma dosagem que concilie a alta porosidade e o coeficiente hidráulico sem prejudicar a resistência mecânica do pavimento. A padronização dos métodos de dosagem é de extrema importância para que este método seja aplicado em maior escala nos sistemas de drenagem.

#### 2.2.4. Critérios de norma

Para tornar a aplicação do concreto poroso viável, a ABNT (2015) estabelece alguns critérios como o coeficiente de permeabilidade e a resistência mecânica mínima do pavimento. Além dos requisitos da camada de sub-base e/ou base citados anteriormente, em projetos de pavimento intertravado permeável a camada de assentamento e o material de rejuntamento também são normatizados.

Em relação ao coeficiente de permeabilidade, independentemente do tipo de revestimento adotado, o pavimento logo após a sua execução deve apresentar um coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-3}$  m/s (ABNT, 2015).

Já a espessura mínima e a resistência mecânica do concreto poroso possuem os seus critérios definidos de acordo com o tipo de revestimento utilizado e o tipo de solicitação existente no pavimento. Os métodos de ensaio também são diferentes para os tipos de pavimentos existentes conforme demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável

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

FONTE: NBR 16416 (ABNT, 2015).

Os pavimentos solicitados somente ao tráfego de pedestres apresentam espessura mínima de 60 milímetros para todos os tipos de revestimento. Quando solicitados ao tráfego leve, a espessura mínima determinada por norma é de 80 milímetros, exceto para o concreto permeável moldado no local, onde a espessura deve ser de 100 milímetros.

Já os ensaios de resistência mecânica variam de acordo com o tipo de pavimento. As peças de concreto de juntas alargadas ou de área vazada e as peças permeáveis são submetidos a ensaios de resistência a compressão, devendo apresentar valores iguais ou superiores a 35 e 20 MPa, respectivamente. As placas de concreto permeável são submetidas ao ensaio de resistência a flexão, devendo apresentar resistência igual ou superior a 2 MPa. No concreto permeável moldado no local, o ensaio realizado é o de resistência à tração na flexão, onde os valores mínimos de norma são de 1 MPa para os pavimentos solicitados ao tráfego de pedestres e de 2 MPa para os pavimentos solicitados ao tráfego leve. Além das propriedades mecânicas, a massa específica do concreto também deve ser ensaiada afim de atingir os valores estabelecidos em projeto, respeitando o valor mínimo de 1600 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM

Além da dificuldade de obter-se uma mistura com bom desempenho hidráulico e uma resistência mecânica adequada, outro fator limitante para a aplicação do concreto poroso é a falta de padrões e métodos consolidados no processo de dosagem da mistura. Estudos realizados anteriormente apresentam modelos estatístico de previsão das propriedades do concreto, porém cada estudo possui suas particularidades em relação ao agregado, método de compactação e equipamentos utilizados, dificultando a padronização do procedimento de dosagem.

### 2.3.1. Método do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)

Este método de dosagem tem como objetivo determinar o índice de vazios da mistura compactada e calcular o volume de pasta de cimento necessário para preencher os vazios existentes e atingir a porosidade determinada em projeto. Um dos fatores que inviabilizam a padronização desse método é o fato do índice de compactação variar em função da energia de compactação empregada e do volume e consistência de pasta. A vantagem deste método é a sua aplicação para qualquer agregado, não sendo restringido pela sua granulometria.

### 2.3.2. Método do American Concrete Institute (ACI)

Inicialmente abordado por Meininger (1988), o American Concrete Institute (ACI) propõe uma metodologia semelhante ao método do NRMCA, utilizando relações volumétricas dos componentes do concreto e que tem como objetivo obter uma mistura com uma determinada porosidade ou massa específica. Neste método, é utilizado a relação “ $b/b_o$ ”, onde “ $b$ ” represente o volume de agregado no concreto e “ $b_o$ ” representa a compactidade do agregado. O parâmetro “ $b/b_o$ ” depende de fatores como o tamanho e distribuição do agregado graúdo e a quantidade de agregado miúdo utilizado na mistura. Um dos fatores que limitam a utilização desse método é a falta de valores para todos os tamanhos de agregados graúdos, pois a ACI 522R (ACI, 2010) fornece valores somente para os agregados nº 8 e nº 67 da ASTM C33 (ASTM, 2018). Além disso, o nível de compactação e o volume de pasta de cimento não são

considerados na escolha de “b/b<sub>o</sub>”, que pode ser adotado ou determinado experimentalmente.

Após determinação da relação “b/b<sub>o</sub>”, o volume de pasta de cimento pode ser determinado através de um ábaco onde a porosidade de projeto e ao nível de compactação empregado são relacionados. A determinação do volume de pasta de cimento é um dos pontos que dificulta a aplicação da metodologia proposta, pois o ábaco fornecido só apresenta valores da distribuição nº 8 da ASTM C33 (ASTM, 2018). Com a definição do volume de pasta e da relação água/cimento as quantidades de cimento e água na mistura podem ser determinadas e as propriedades podem ser verificadas por meio de testes experimentais.

### 2.3.3. Outros métodos de dosagem

Além dos métodos NRMCA e ACI, outras pesquisas propuseram metodologias para dosagem do concreto poroso, com o objetivo de orientar a quantidade de materiais utilizada para atingir as propriedades desejadas. No Quadro 3, estão presentes as demais metodologias de dosagem que ainda estão em fase de desenvolvimento (PIERALISI *et al.*, 2020).

Quadro 3 - Métodos de dosagem encontrados na literatura

Referência	Generalidades do método
NGUYEN et al. (2014)	Este método baseia-se na quantificação da camada de pasta de cimento que reveste o agregado a partir dos pressupostos: a pasta de cimento atua apenas como revestimento; e a pasta não preenche os vazios entre os grãos dos agregados. Este método de dosagem é dividido em três etapas: determinação do volume de agregado gráudo; determinação do volume da pasta de cimento; e determinação da relação água/cimento.
ZHANG et al. (2020)	Este trabalho propôs a otimização da mistura de concreto utilizando o modelo estatístico de metodologia de superfície de resposta (MSR). Com isso foi estabelecida a relação entre as variáveis de mistura e a trabalhabilidade do concreto permeável. A MSR foi usada para dosar a proporção dos materiais do concreto permeável usando agregado reciclado. Do ponto de vista da estrutura interna do concreto permeável, foi identificado que os fatores que afetam sua resistência e porosidade são as propriedades da pasta, a espessura do revestimento da pasta na superfície do agregado e o conteúdo de vazios do agregado. A espessura ideal da pasta, a espessura real do revestimento e o conteúdo vazio são quantificados e otimizados por meio da MSR para encontrar uma curva granulométrica e uma proporção entre materiais.
WANG et al. (2020)	Este estudo apresenta um método que visa estimar a mesoestrutura do concreto permeável baseado em técnicas de processamento de imagens usando arquivos de tomografia computadorizada. Uma vez que a mesoestrutura foi reconstruída, as propriedades no estado endurecido (permeabilidade e resistência à compressão) foram estimadas a partir de modelos empíricos que consideram a porosidade total, a espessura média de pasta e a dimensão média dos agregados. Caso as propriedades forem inferiores das requeridas em projeto, os parâmetros de entrada (espessura de pasta, resistência à compressão da pasta, e propriedade dos agregados) são revistos.
Xie et al. (2020)	Este método consiste na caracterização da estrutura dos vazios internos do concreto permeável a partir do número de contatos entre agregados, da largura dos contatos e da espessura da pasta entre agregados. As estruturas dos vazios de diferentes composições foram correlacionadas com suas respectivas propriedades mecânicas e hidráulicas. A partir das correlações, foram propostas equações empíricas. As equações empíricas foram utilizadas na proposta de um método de dosagem baseado em propriedades requeridas.

FONTE: PIERALISI (2020).

Outro método encontrado na literatura, é o método do grau de compactação proposto por Mikami (2022). Este método, utiliza relações volumétricas entre os componentes do concreto poroso para atingir uma porosidade pré-estabelecida em

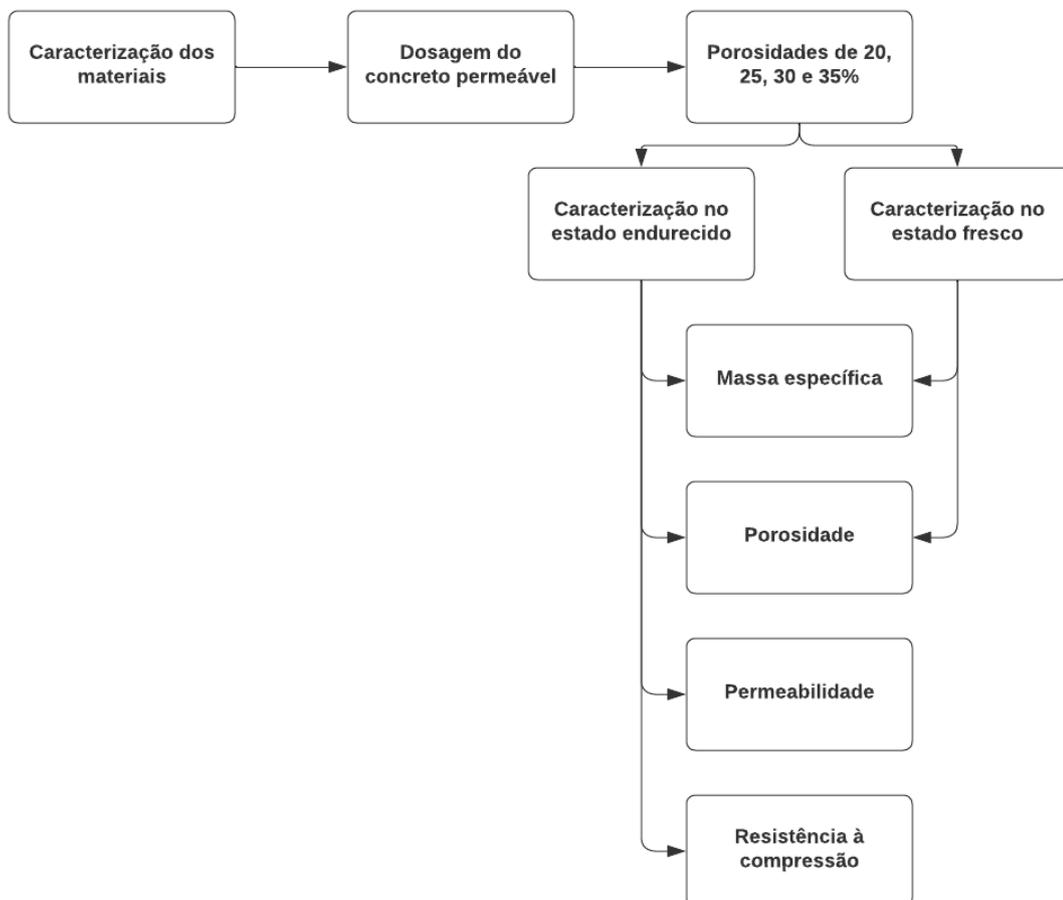
projeto, diferenciando-se dos demais métodos pela possibilidade de utilização de diferentes agregados e energias de compactação.

Para a aplicação prática de peças de concreto permeável, como a produção de elementos pré-moldados, é necessário conhecer a relação entre a porosidade e as demais propriedades compreendendo como a variação da porosidade influenciará no seu desempenho. O conhecimento dessa relação permite um processo de dosagem mais preciso, reduzindo o problema da falta de padronização dos métodos e tornando o processo menos empírico.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

O presente estudo tem por objetivo realizar experimentações de diferentes dosagens para concreto permeável direcionado à produção de peças de pavimentação, respeitando os critérios da norma NBR 16416 (ABNT, 2015). Serão desenvolvidas misturas de concreto permeável com porosidade variável, construindo-se curvas de previsão de resistência e de desempenho hidráulico. Os traços testados respeitarão uma porosidade preestabelecida de 20, 25, 30 e 35%. A partir das misturas desenvolvidas, pretende-se analisar uma porosidade ótima que garanta a permeabilidade e a resistência mínima de norma, viabilizando a produção de peças de pavimentação. Na Figura 10 está ilustrada a sequência de etapas para o desenvolvimento deste estudo.

Figura 10 – Etapas experimentais para o desenvolvimento do estudo



FONTE: OS AUTORES.

Conforme a Figura 10, inicialmente foram caracterizados os materiais constituintes utilizados na produção do concreto permeável. A partir do procedimento de dosagem experimental proposto por Mikami (2022), foram definidas misturas com o objetivo de produzir 4 porosidades distintas. Serão produzidas peças de concreto permeável, sendo estas caracterizadas no estado fresco e endurecido. O detalhamento desta sequência metodológica está descrito a seguir.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1.1. Agregado Graúdo

Para a confecção dos elementos de concreto permeável, foi utilizado um pedrisco fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa (Figura 11).

Figura 11 – Agregado graúdo utilizado na confecção do concreto



FONTE: OS AUTORES.

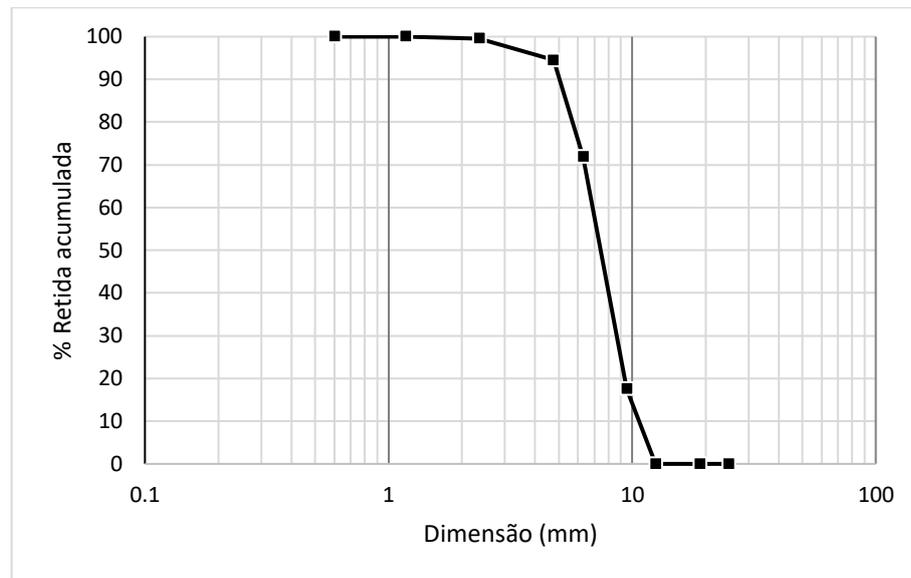
O material foi caracterizado conforme as normas apresentadas no Quadro 4, e sua distribuição granulométrica e características físicas estão representadas na Figura 12 e na Tabela 3, respectivamente.

Quadro 4 – Normas para determinação das propriedades do agregado graúdo

	<b>Grandeza</b>	<b>Norma</b>
<b>Propriedades físicas</b>	Massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Massa unitária no estado solto	NBR 16972 (ABNT, 2021)
	Massa unitária no estado compactado	
	Distribuição granulométrica	NBR 17054 (ABNT, 2022)

FORNE: OS AUTORES.

Figura 12 - Distribuição granulométrica do pedrisco utilizado



FORNE: OS AUTORES.

Tabela 3 - Propriedades físicas obtidas na caracterização do pedrisco

<b>Massa específica</b>		<b>Massa unitária</b>		<b>Índice de Volume de Vazios</b>	
Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Superfície saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	Estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	Estado solto (%)	Estado compactado (%)
2,96	2,98	1,54	1,65	47,92	44,05

FORNE: OS AUTORES.

### 3.1.2. Cimento

O aglomerante utilizado na mistura foi o cimento CP II-F-32, definido pela NBR 16697 (ABNT, 2018) como um Cimento Portland composto com material carbonático e que possui resistência característica de 32 MPa aos 28 dias. O cimento CP II-F-32 tem como característica uma alta resistência aos 28 dias de cura, pela adição de filer calcário, no teor entre 11 e 25%, e gesso.

## 3.2 DESENVOLVIMENTO DO TRAÇO

Para a produção do concreto permeável foram selecionadas as porosidades de 20, 25, 30 e 35%, respeitando a porosidade mínima de 15% definida por Meininger (1988) para que o pavimento desempenhe sua função de drenagem com eficácia. A determinação do traço foi realizada por meio de um método adaptado do ACI, sendo realizada uma metodologia volumétrica experimental.

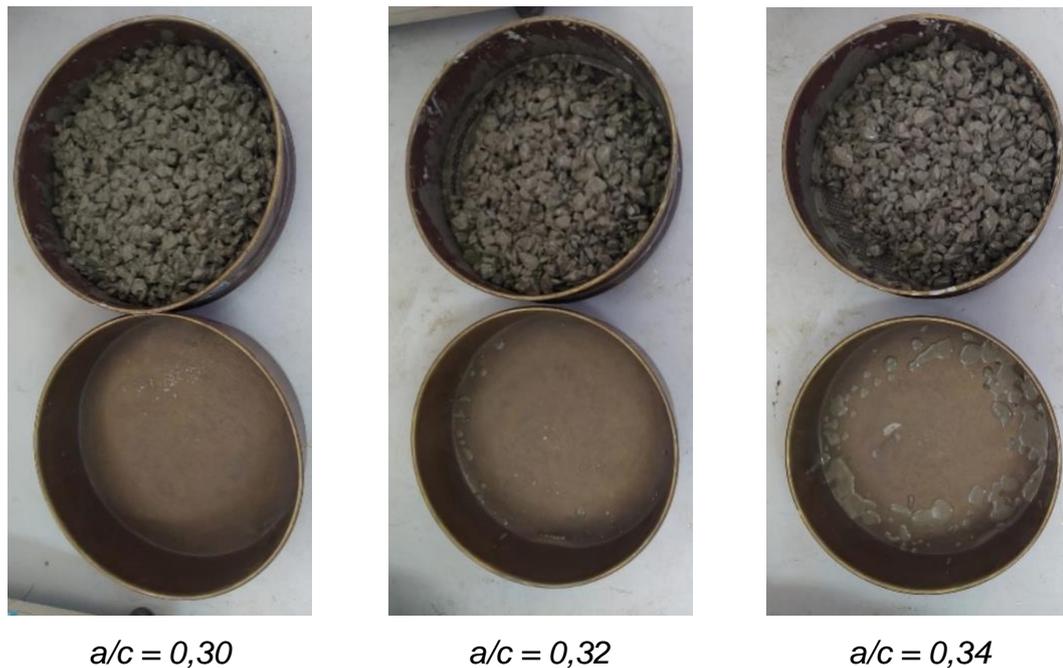
### 3.2.1. Teste de Drenagem de Pasta

Inicialmente foi determinada a relação  $a/c$  seguindo o método de drenagem de pasta de cimento proposto por Nguyen *et al.* (2014), onde foram adotados três valores iniciais para  $a/c$ : 0,30, 0,32 e 0,34. Além dos valores de  $a/c$ , a relação entre agregado graúdo e cimento ( $g/c$ ) também foi adotada seguindo as recomendações de Nguyen, sendo fixado o valor de 4.

Com as relações  $a/c$  e  $g/c$  determinadas, foi dosada uma quantidade de concreto permeável suficiente para preencher uma peneira de 1,18 mm, utilizada no ensaio de agregados regulamentado pela NBR 17054 (ABNT, 2022). Após o preenchimento da peneira, o concreto foi submetido a vibração mecânica por 15 segundos.

Após o processo de vibração, foi analisada a quantidade de pasta presente no fundo da peneira para cada valor de  $a/c$  adotado. A relação de 0,32 foi a que proporcionou a melhor consistência de pasta, conforme representado na Figura 13.

Figura 13 – Teste de drenagem de pasta



FONTE: OS AUTORES.

### 3.2.2. Determinação do Traço Piloto

Para a determinação de um traço piloto foi utilizado o método do grau de compactação no processo de dosagem das misturas. Este método, proposto por Mikami (2022), utiliza relações volumétricas entre os materiais constituintes no concreto permeável, permitindo o uso de diferentes agregados na sua produção. Em um elemento de concreto poroso, os vazios do agregado e da pasta são somados à porosidade de projeto adotada, sendo a soma dessas variáveis o volume de vazios efetivos da mistura. O volume de vazios efetivo depende das características do agregado graúdo utilizado, da consistência da pasta de cimento e da energia de compactação empregada na moldagem das amostras.

O grau de compactação é de extrema importância neste método de dosagem, pois é através deste parâmetro que é relacionado o estado compactado do agregado e o seu comportamento quando utilizado na mistura de concreto permeável (MIKAMI, 2022). Vários fatores influenciam no grau de compactação, como o método e energia de compactação utilizados, a quantidade de pasta na mistura e o tipo do agregado utilizado.

Para a elaboração do traço piloto das misturas, é adotado um grau de compactação inicial ( $G_{c,i}$ ) para cada porosidade, levando em conta o tipo e nível de

compactação utilizados, a distribuição granulométrica do agregado e o volume de pasta da mistura.

Com a obtenção do grau de compactação inicial, massa unitária compactada ( $MU_c$ ) do agregado e a densidade seca do agregado, é calculado o índice de vazios efetivos através da Equação (1).

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

Sendo:

$V_{v,ef}$  – Volume de vazios efetivo (%);

$d_{agg}$  – Densidade aparente do agregado (ASTM C127, 2015), quando utilizado no estado seco;

$d_{agg}$  – Densidade seca do agregado (NBR 16917, 2021b), quando saturado com superfície seca.

O próximo passo para a determinação do traço piloto é obter o volume de pasta de cimento ( $V_p$ ), que é definido como a diferença entre a porosidade de projeto ( $P_d$ ) e o volume de vazios efetivo Equação (2).

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

Sendo:

$V_p$  – Volume de pasta de cimento (%);

$P_d$  – Porosidade de projeto (%).

O volume de pasta é composto pelo volume de cimento, água e agregado miúdo. Neste estudo não é utilizado agregado miúdo, podendo ser calculado o consumo de cimento através da seguinte da Equação (3).

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

Sendo:

$C_{cim}$  – Consumo de cimento por volume unitário de concreto ( $g/cm^3$ );

$d_{cim}$  – Densidade do cimento (g/cm<sup>3</sup>);  
 $a/c$  - Relação em massa água/cimento.

O consumo de agregado ( $C_{agg}$ ) também pode ser obtido através do grau de compactação e da massa unitária compactada, representada pela Equação (4).

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

Sendo:

$C_{agg}$  – Consumo de agregado por volume unitário de concreto (g/cm<sup>3</sup>);

$G_c$  – Grau de compactação do agregado graúdo;

Com o consumo de cimento e agregado determinado para o traço piloto, a relação g/c pode ser calculada através da Equação (5).

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

Utilizando este método, foram determinados os traços pilotos para as quatro porosidades estudadas, fixando a relação a/c em 0,32 para todos os traços. A Tabela 4 apresenta as características de cada mistura realizada.

Tabela 4 - Características do traço piloto de concreto permeável P20, P25, P30 e P35

<b>Parâmetro</b>	<b>P20</b>	<b>P25</b>	<b>P30</b>	<b>P35</b>
Grau de compactação inicial	0,92	0,96	0,97	0,94
Relação água/cimento	0,32	0,32	0,32	0,32
Volume de vazios efetivo (%)	49,62	47,23	47,03	48,70
Volume de pasta (%)	29,62	22,23	17,03	13,70
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	460,9	345,9	265,0	213,2
Consumo de agregado (kg/m <sup>3</sup> )	1522,6	1594,8	1600,7	1550,2
Relação agregado/cimento	3,30	4,61	6,04	7,27
Traço em massa	1:3,30-0,32	1:4,61-0,32	1:6,04-0,32	1:7,27-0,32

FONTE: OS AUTORES.

### 3.2.3. Teste de Compactação

Após a definição do traço de cada porosidade, foi realizado o teste de compactação da mistura proposto por Mikami (2022), com o objetivo de definir a massa específica no concreto fresco, que permite o ajuste do grau de compactação inicial e o traço piloto.

Inicialmente, o concreto dosado foi inserido no molde utilizado neste estudo até que este fosse totalmente preenchido. Foi determinada a massa do molde vazio e a massa do molde contendo o concreto compactado. A massa específica no estado fresco do concreto foi calculada pela relação entre as massas determinadas e o volume do molde, representada pela Equação (6).

$$\rho_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (6)$$

Sendo:

$\rho_f$  – Massa específica no estado fresco (g/cm<sup>3</sup>);

$M_c$  – Massa do molde contendo o concreto (g);

$M_m$  – Massa do molde vazio (g);

$V_m$  – Volume do molde (cm<sup>3</sup>);

A densidade teórica do concreto também foi calculada no teste de compactação, expressa pela Equação (7).

$$d_t = \frac{M}{V} \quad (7)$$

Sendo:

$d_t$  – Densidade teórica do concreto permeável (g/cm<sup>3</sup>);

M – Soma das massas dos componentes do concreto permeável (g);

V – Soma dos volumes de cada componente na mistura (cm<sup>3</sup>).

Após o cálculo da densidade teórica e da massa específica, foi determinada a porosidade no estado fresco conforme a Equação (8).

$$P_f = \frac{d_t - \rho_f}{d_t} \quad (8)$$

Sendo:

$P_f$  – Porosidade no estado fresco (%).

Os consumos reais de cimento ( $C_{cim,r}$ ) e agregado ( $C_{agg,r}$ ) foram calculados com base nas Equações (9) e (10), respectivamente.

$$C_{cim,r} = \frac{\rho_f}{(1 + g/c + a/c)} \quad (9)$$

$$C_{agg,r} = C_{cim,r} \cdot g/c \quad (10)$$

O grau de compactação efetivo ( $G_{c,ef}$ ) foi calculado utilizando a Equação (11) e posteriormente adotado para a determinação do traço final de cada mistura, levando em conta a substituição do grau de compactação inicial.

$$G_{c,ef} = \frac{C_{agg,r}}{MU_c} \quad (11)$$

Com o teste de compactação, foram comparados os valores encontrados para a massa específica aparente e a porosidade com os valores estimados no traço piloto. O grau de compactação foi utilizado para ajustar o traço final das quatro misturas dosadas, com o objetivo de garantir as porosidades desejadas neste estudo. A Tabela 5 apresenta os resultados do teste de compactação e os traços ajustados através do grau de compactação efetivo.

Tabela 5 - Resultados do teste de compactação das misturas P20, P25, P30 e P35

<b>Parâmetro</b>	<b>P20</b>	<b>P25</b>	<b>P30</b>	<b>P35</b>
Densidade teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,69	2,74	2,76	2,81
Massa específica medida (g/cm <sup>3</sup> )	2,23	2,06	1,89	1,81
Porosidade no estado fresco (%)	16,21	24,72	32,21	35,88
Consumo de cimento real (kg/m <sup>3</sup> )	423,7	342,9	291,1	224,0
Consumo de agregado real (kg/m <sup>3</sup> )	1594,8	1600,7	1550,2	1529,3
Grau de compactação efetivo	0,96	0,97	0,94	0,92
Traço final	1:3,76-0,32	1:4,67-0,32	1:5,33-0,32	1:6,83-0,32

FORNE: OS AUTORES.

### 3.3 MOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Pelo fato de não haver um procedimento normalizado para a mistura dos materiais constituinte, foi adotado o mesmo processo utilizado para misturas de concreto convencional, conforme a ASTM C192M (ASTM, 2016). A norma orienta que primeiramente deve-se inserir no misturador mecânico o agregado graúdo e metade da água até total umedecimento do pedrisco. Por seguinte, o cimento é adicionado junto do restante da água e os materiais são misturados por 3 minutos, depois há o descanso por 3 minutos e uma última mistura de 2 minutos.

A moldagem foi realizada em peças prismáticas com dimensões de 15x15x6cm que podem ser visualizadas na Figura 14. A compactação da mistura foi realizada manualmente, com o uso do compactador representado na Figura 15. O controle de porosidade foi realizado estabelecendo um peso ideal para as amostras de cada porosidade. Foi moldado um total de 10 lajotas por traço compactadas para nivelamento da peça, sendo 5 delas submetidas ao ensaio de resistência à

compressão ao final dos 28 dias de cura e as demais utilizadas para determinação da massa específica, porosidade e permeabilidade do concreto no estado endurecido.

Figura 14 – Lajota de concreto permeável



FONTE: OS AUTORES.

Figura 15 - Compactador utilizado na moldagem das amostras



FONTE: OS AUTORES.

### 3.4 PROCESSO DE CURA

O processo de cura foi realizado saturando-se a lajota em água, sendo as peças armazenadas em um saco plástico a fim de reter a umidade por mais tempo.

As lajotas permaneceram no saco plástico até a data correta para ruptura e verificação das suas resistências mecânicas. Essas medidas permitiram a conservação.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

O concreto produzido foi caracterizado no seu estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco, foi determinada a massa específica e a porosidade da mistura. Já no estado endurecido, as propriedades obtidas foram as mesmas do estado fresco, com a adição da permeabilidade e a resistência à compressão. A Tabela 6 apresenta os ensaios realizados para a caracterização nos dois estados e as respectivas normas utilizadas como referência.

Tabela 6 – Ensaios realizados para a caracterização dos concretos produzidos e suas respectivas normas

	Grandeza	Norma
<b>Concreto fresco</b>	Massa específica	ASTM C1688 (ASTM, 2014)
	Porosidade	
<b>Concreto endurecido</b>	Massa específica	ASTM C1754 (ASTM, 2012)
	Porosidade	
	Taxa de infiltração	ASTM C1701 (ASTM, 2009)
	Resistência a compressão	NBR 9781 (ABNT, 2013)

FONTE: OS AUTORES.

Com relação ao ensaio de resistência à compressão, a estrutura porosa das amostras de concreto permeável e sua superfície irregular (BATEZINI, 2013) faz com que as tensões de compressão não sejam distribuídas uniformemente, sendo necessária a regularização das superfícies das amostras.

O capeamento pode ser feito utilizando diversos materiais, como gesso, enxofre, argamassa e Neoprene. O estudo feito por Castro *et al.* (2022), recomenda a utilização de argamassa, por apresentar altas resistências e uma variabilidade menor do que os outros métodos de capeamento. Neste estudo, o capeamento das amostras foi realizado utilizando simples de cimento Portland com relação a/c de 0,3. O aspecto final das amostras capeadas pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Lajota de concreto permeável



FONTE: OS AUTORES.

A permeabilidade das amostras de concreto permeável foi determinada por uma adaptação do método proposto pela ASTM C1701 (ASTM, 2009), onde o diâmetro do anel de infiltração e o volume de água foram reduzidos para permitir a análise das amostras, que apresentam dimensões inferiores ao anel proposto pela norma.

Figura 17 - Ensaio de taxa de infiltração



FONTE: OS AUTORES.

Foi utilizado um anel de infiltração com diâmetro de 10 cm com marcações internas de 15 e 20 mm (Figura 17). O volume de água utilizado para pré-molhagem foi de 1L, enquanto o volume utilizado para a determinação da taxa de infiltração foi de 2L. O cálculo da taxa de infiltração foi realizado pela Equação (12).

$$I = \frac{V}{t \cdot A} \quad (12)$$

Sendo:

$I$  – Taxa de infiltração de água (cm/s);

$V$  – Volume de água utilizado no ensaio (cm<sup>3</sup>);

$t$  – Tempo de escoamento de água (s);

$A$  – Área interna do anel de infiltração (cm<sup>2</sup>).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica no estado fresco foi determinada para as quatro porosidades dosadas neste estudo, utilizando o método proposto pela ASTM C1688 (ASTM, 2014). Os valores médios encontrados variaram de 1824,7 a 2154,1 kg/m<sup>3</sup> para as porosidades de 35 e 20%, respectivamente. Os valores de massa específica média estão apresentados na Tabela 7.

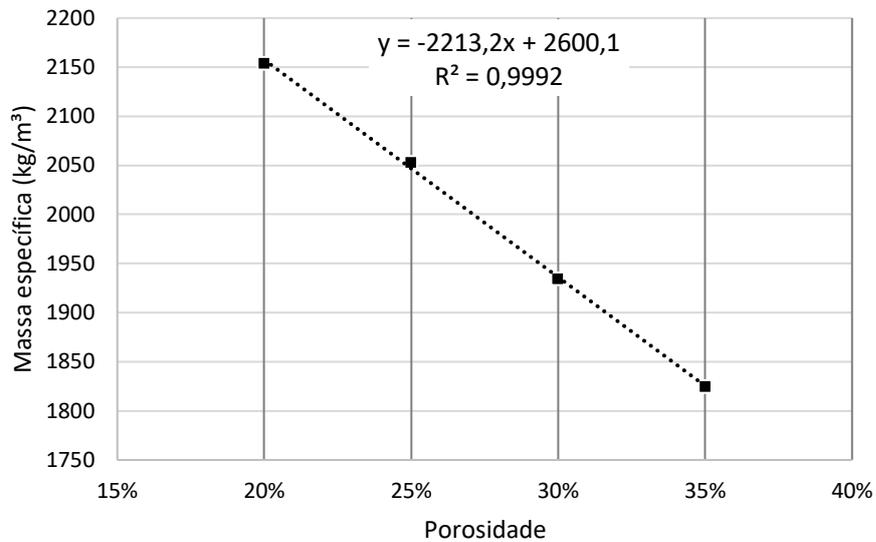
Tabela 7 - Massa específica no estado fresco

Porosidade (%)	Massa específica média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão
20	2154,1	0,13
25	2052,8	1,80
30	1934,2	1,38
35	1824,7	0,36

FONTE: OS AUTORES.

Os valores encontrados satisfazem os requisitos encontrados na literatura. A NBR 16416 (ABNT, 2015), define como valor mínimo de massa específica 1600 kg/m<sup>3</sup>, enquanto Tennis *et al.* (2004) define a margem de 1600 a 2200 kg/m<sup>3</sup> como a recomendada para as amostras de concreto poroso, estando todos os traços dosados dentro dessa margem. Observa-se que a massa específica do concreto no seu estado fresco, apresenta um decréscimo linear conforme a porosidade aumenta (Figura 18). Este fato acontece, pois, o aumento da porosidade aumenta também o índice de vazios da amostra, ocasionando o decréscimo da massa específica das amostras moldadas.

Figura 18 - Relação entre porosidade e massa específica no estado fresco



FONTE: OS AUTORES.

A massa específica foi determinada também no estado endurecido das lajotas para todos os traços dosados, seguindo o método proposto pela ASTM C1754 (ASTM, 2012) que se baseia na pesagem hidrostática das amostras. Os valores médios para a massa específica no estado endurecido variaram de 1768,4 a 2062,7 kg/m<sup>3</sup> para as porosidades de 35 a 20%, respectivamente. Os valores encontrados estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa específica no estado endurecido.

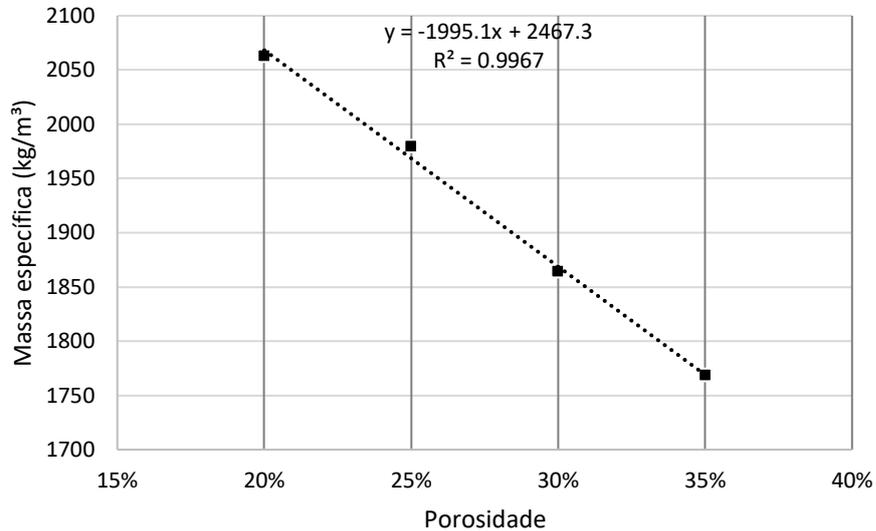
Porosidade (%)	Massa específica média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )
20	2062,7	2,36
25	1979,2	4,02
30	1874,3	3,93
35	1768,4	4,08

FONTE: OS AUTORES.

Os requisitos de norma para a massa específica no estado endurecido são os mesmos do estado fresco, estando os valores encontrados dentro dos limites estabelecidos. Percebe-se que a relação entre massa específica e porosidade

também é linear no estado endurecido, havendo o decréscimo da massa específica conforme a porosidade é aumentada. Esta relação está apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Relação entre porosidade massa específica no estado endurecido



FONTE: OS AUTORES.

## 4.2 POROSIDADE

A porosidade no estado fresco foi obtida para as quatro misturas dosadas através das diretrizes definidas pela ASTM C1688 (ASTM, 2014), onde o cálculo da porosidade é realizado pela relação da massa específica e da densidade teórica de cada traço. Os resultados obtidos para cada porosidade estão representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Porosidade no estado fresco

Traço	Massa específica média (g/cm³)	Densidade teórica (g/cm³)	Porosidade (%)
P20	2,154	2,693	20,01
P25	2,053	2,738	25,03
P30	1,934	2,763	30,00
P35	1,825	2,808	35,02

FONTE: OS AUTORES.

Os valores encontrados para cada traço aproximaram-se das porosidades definidas no estudo, apresentando uma diferença mínima que não afetou nos

resultados obtidos para as demais propriedades. A porosidade no estado fresco é a forma utilizada para controlar a produção das amostras, garantindo que as misturas produzidas estejam de acordo com os traços definidos em projeto.

No estado endurecido, a porosidade para cada traço foi obtida através da ASTM C1754 (ASTM, 2012), onde através da pesagem hidrostática do material é calculada a porosidade total da lajota moldada. Os valores médios de porosidade no estado endurecido ( $P_e$ ) variaram de 25,25 a 37,57% (Tabela 10), referentes aos traços de 20 e 35%, respectivamente.

Tabela 10 - Porosidade no estado endurecido

<b>Traço</b>	<b><math>P_e</math> (%)</b>
P20	25,25
P25	29,55
P30	33,73
P35	37,57

FONTE: OS AUTORES.

Os valores de porosidade total no estado endurecido apresentaram valores maiores que os índices de vazios previamente estabelecidos. Este fato ocorre, pois, na determinação da porosidade total, além da porosidade efetiva e de pasta, são consideradas as porosidades dos agregados e os vazios que não são conectados entre si (NGUYEN *et al.*, 2014). A variação entre o índice de vazios inicialmente determinados e as porosidades no estado endurecido variaram entre 2,57 e 5,25%, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Porosidade no estado endurecido.

<b>Traço</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b><math>P_e</math> (%)</b>	<b>Diferença (%)</b>
P20	20	25,25	5,25
P25	25	29,55	4,55
P30	30	33,73	3,73
P35	35	37,57	2,57

FONTE: OS AUTORES.

A melhor maneira para controlar a porosidade de projeto e garantir que as propriedades obtidas sejam coerentes é através do controle da porosidade no estado

fresco, pois erros no processo de moldagem das amostras podem comprometer o valor de porosidade encontrado no estado endurecido.

### 4.3 TAXA DE INFILTRAÇÃO

A análise da taxa de infiltração das lajotas confeccionadas foi regida pela NBR 16416 (ABNT, 2015), onde há a determinação da infiltração mínima como sendo 0,1 cm/s. Desta maneira, todas as amostras apresentaram valores superiores ao mínimo exigido pela norma.

A Tabela 12 apresenta os resultados médios da taxa de infiltração para as quatro porosidades analisadas com desvio padrão pouco significativo entre as amostras de cada porosidade. Em geral, todos os resultados se encontram acima do mínimo exigido por norma e dentro da faixa de valores apresentados no estudo de revisão de Zhong e Wille (2015), que variam de 0,025 até 4,770 cm/s.

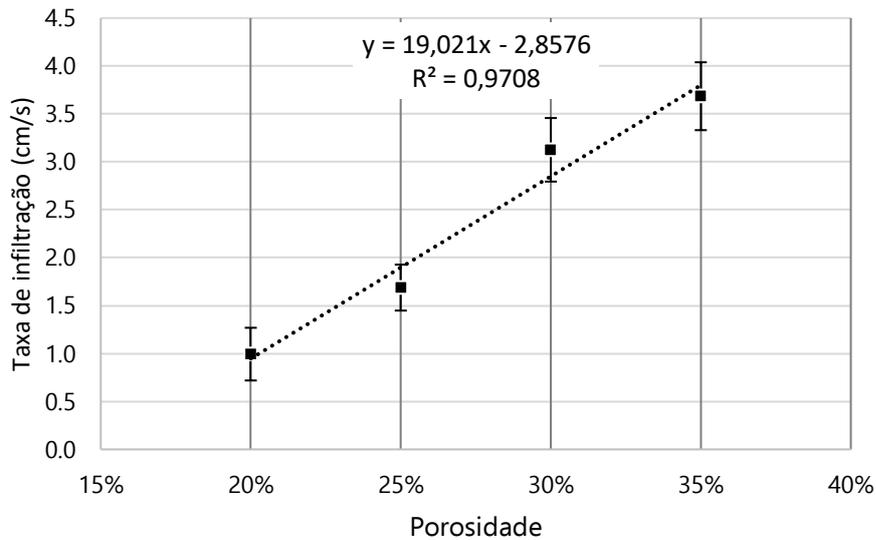
Tabela 12 - Taxa de infiltração média para cada porosidade

<b>POROSIDADE</b>	<b>TAXA DE INFILTRAÇÃO (cm/s)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>
20%	0,99	0,27
25%	1,69	0,24
30%	3,13	0,33
35%	3,68	0,35

FONTE: OS AUTORES.

Na Figura 20 é possível confirmar a influência da porosidade na permeabilidade do concreto permeável, onde quanto maior for a porosidade, mais elevado será a permeabilidade das lajotas.

Figura 20 - Relação entre porosidade e taxa de infiltração



FONTE: OS AUTORES.

Os resultados obtidos na literatura se assemelham aos encontrados no presente estudo, entretanto possuem uma menor variação de resultados em relação às porosidades. No estudo de Ramos *et al.* (2021), os resultados variam de 0,824 a 2,180 cm/s para porosidades entre 15 e 30%, respectivamente. Esta variação pode ter sido ocasionada no processo de dosagem do concreto, seja pela variação da energia aplicada na compactação ou pela quantidade de concreto colocado no molde.

Analisando a porosidade de um concreto permeável para uma taxa de infiltração mínima de norma, ou seja, 0,1 cm/s, obtem-se uma porosidade de 15,5% que seria o resultado suficiente para atender o valor mínimo de taxa de infiltração. Entretanto, valores muito baixos de porosidade e taxa de infiltração podem causar o fenômeno da colmatação, o qual, em um determinado espaço de tempo, reduz a capacidade de infiltração do concreto, prejudicando seu desempenho hidráulico. Portanto, é preferível a dosagem de concretos com o maior valor de taxa de infiltração possível, desde que o volume de vazios do elemento moldado não prejudique o seu desempenho mecânico ao ponto de apresentar uma resistência menor que a estabelecida por norma.

#### 4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para a aferição das resistências, foram rompidas cinco lajotas para cada uma das quatro porosidades distintas. Com isso, se obteve 20 valores de resistência que estão dispostas, em forma de média, na Tabela 13. As lajotas com 20% de porosidade apresentaram os melhores resultados de resistência, tendo um pico médio de 38,30 MPa, muito superior ao mínimo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013) de 20 MPa. Para as amostras com 25 e 30% de porosidade, as resistências tiveram um resultado satisfatório em relação a NBR 9781 (ABNT, 2013). Toda via, para as amostras com 20% de porosidade, foi obtido desvio padrão de 4,90, o que mostra uma discrepância nos resultados aferidos na prensa. As possíveis causas de tal resultado são o capeamento mal confeccionado que afetou o rompimento na prensa hidráulica, ou até mesmo o adensamento irregular do concreto na forma.

Para as lajotas de 35% de porosidade, nenhuma unidade alcançou o mínimo exigido por norma. Portanto, descarta-se essa porosidade de qualquer aplicação em obras que utilizariam o concreto permeável com 35% de porosidade.

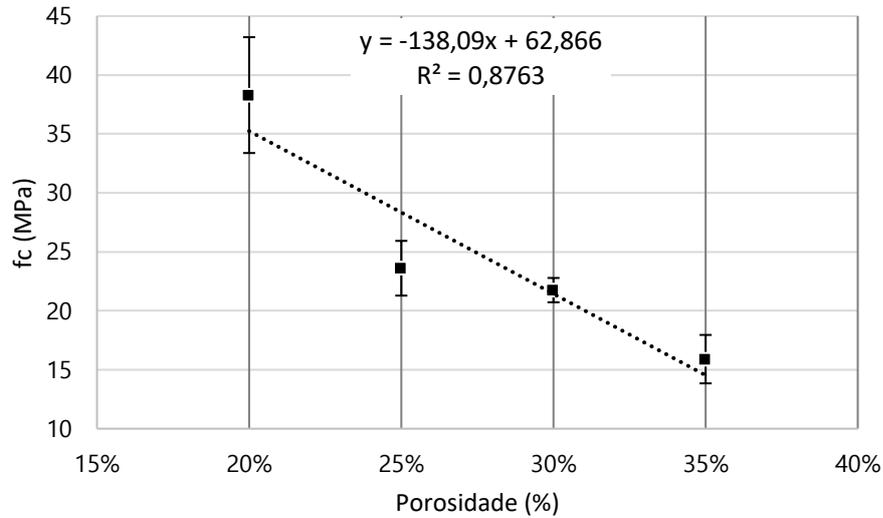
Tabela 13 - Resistências mecânicas médias e desvio padrão para P20, P25, P30 e P35

<b>POROSIDADE</b>	<b>RESISTÊNCIA (MPa)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>
20%	38,30	4,90
25%	23,61	2,32
30%	21,76	1,03
35%	15,90	2,05

FONTE: OS AUTORES.

O gráfico que relaciona a média das resistências de cada porosidade com a porosidade das lajotas pode ser visualizado na Figura 21. A análise do gráfico permite a visualização de que o aumento da porosidade reduz a resistência à compressão do concreto poroso. É possível explicar essa diminuição de resistência pelo fato de que o concreto com mais porosidade possui mais vazios, prejudicando a resistência das lajotas e enfraquecendo sua matriz cimentícia. Em geral, concretos menos porosos possuem um volume de pasta de cimento maior que concretos mais porosos, porém, ocorre a redução da porosidade e prejudica o desempenho hidráulico da lajota.

Figura 21 - Relação entre porosidade e resistência à compressão



FONTE: OS AUTORES.

Os resultados apresentados foram superiores aos encontrados na literatura, onde o estudo de Ramos *et al.* (2021) evidenciou valores que variam de 13,6 até 21,6 MPa para porosidades de 15 até 30%, respectivamente. Para o menor valor de resistência possível (20 MPa), respeitando a norma, a porosidade apresentada é de 31% e representa o maior valor de taxa de infiltração, 3,04 cm/s, com um consumo de cimento igual a 274,86 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.5 CONSUMO DE CIMENTO

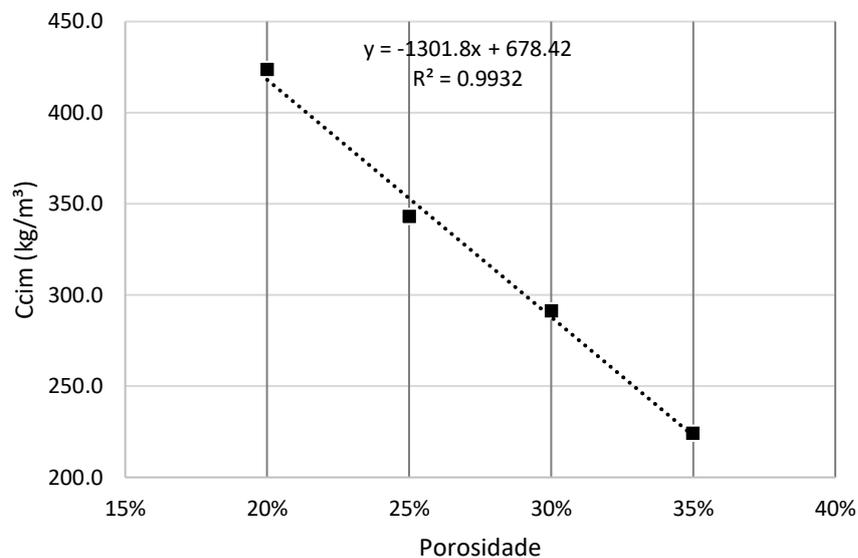
O consumo de cimento é um fator muito relevante na produção de peças de concreto permeável, pois é o consumo de cimento que dita a viabilidade da aplicação do concreto. Para a confecção de amostras com menores valores de porosidade, o consumo de cimento é maior, proporcionando maiores valores de resistência à compressão. A Tabela 14 mostra os consumos de cimento estimado, calculado e o real para as quatro porosidades dosadas neste estudo. Analisando os resultados obtidos, é possível estimar o consumo de cimento para diferentes porosidades seguindo a Figura 22.

Tabela 14 - Consumos de cimento para cada porosidade

POROSIDADE	Ccim (kg/m <sup>3</sup> )	Ccim calculado (kg/m <sup>3</sup> )	Ccim,r (kg/m <sup>3</sup> )
20%	423,7	418,06	424,02
25%	342,9	352,97	342,74
30%	291,1	287,88	290,83
35%	224,0	222,79	223,93

FONTE: OS AUTORES.

Figura 22 - Relação entre consumo de cimento e porosidade.



FONTE: OS AUTORES.

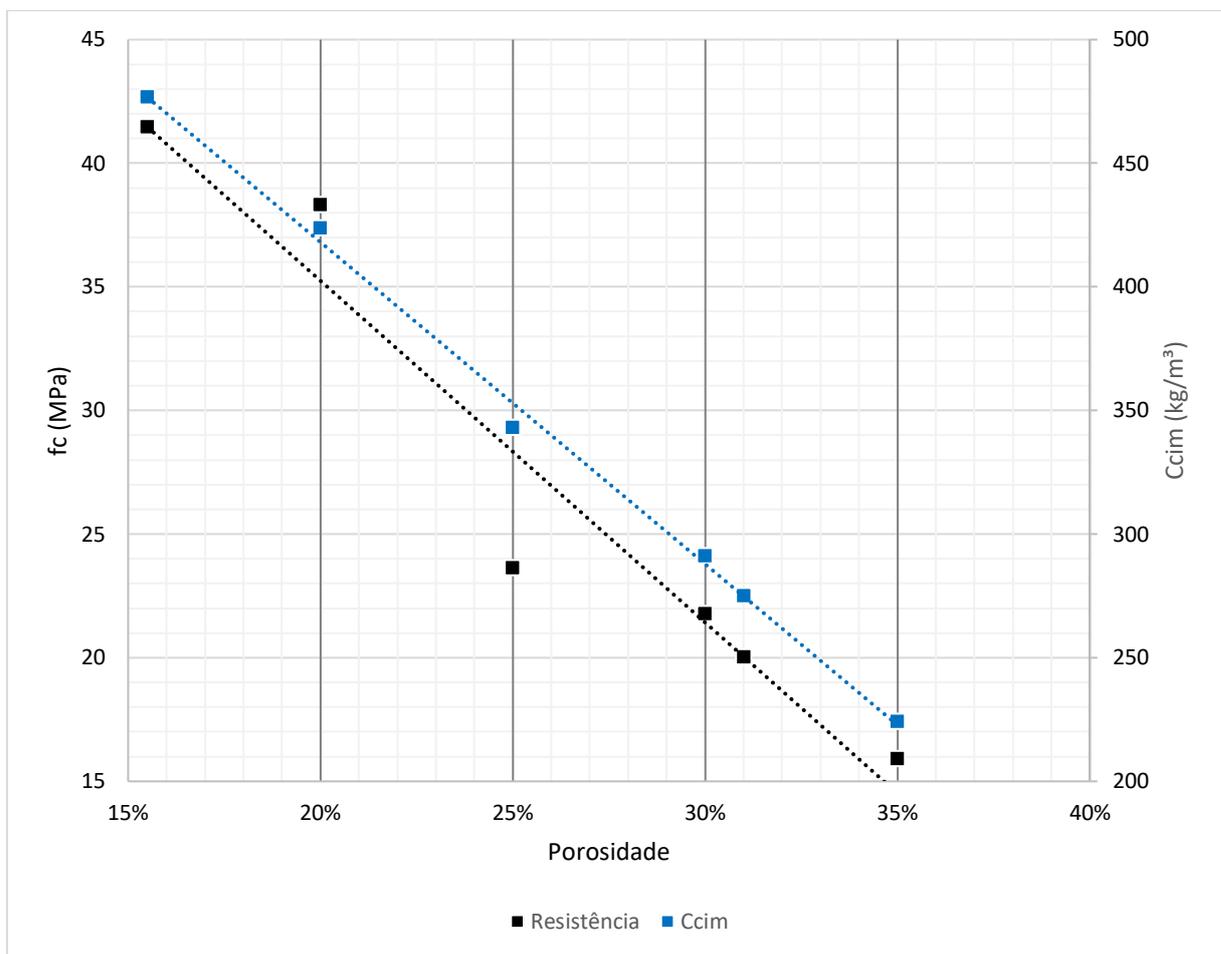
Existe uma relação direta entre a porosidade e consumo de cimento, isso porque à proporção que a porosidade é reduzida, maior será o consumo de cimento para suportar o volume de pasta exigido pela mistura. Juntamente a isso, a resistência mecânica também é afetada, visto que quanto maior for a quantidade de cimento no traço, maior será a resistência do concreto à compressão.

Os resultados apresentados se assemelham aos encontrados na literatura. O estudo regido por Mikami (2022) expôs valores similares, reforçando a exatidão do método apresentado. Os resultados do estudo citado variaram de 431,1 até 264 kg/m<sup>3</sup> para porosidades de 20% até 30%, respectivamente.

À medida que um concreto é mais resistente à esforços mecânicos, maior será seu consumo de cimento (Figura 23), com isso, o menor consumo de cimento ocorre com o valor mínimo de norma para resistência à compressão. Para uma resistência à

compressão de 20 MPa, o consumo de cimento apresentado é de 274,86 kg/m<sup>3</sup>. Tal consumo de cimento pode ser um fator limitante na aplicação do concreto permeável, por conta disso é propenso utilizar mais fatores que evidenciam o consumo de cimento do concreto, um desses índices é a o índice que mede intensidade de consumo de cimento. Esse índice, chamado de Binder intensity ( $b_{ics}$ ), tem por objetivo medir a quantidade de ligante necessária para fornecer uma unidade de resistência e assim estabelecer a eficiência da pasta de cimento (DAMINELI *et al.*, 2010).

Figura 23 - Relação entre porosidade, resistência à compressão e consumo de cimento



FONTE: OS AUTORES.

Na Tabela 15, há a relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento que resultam em um valor de eficiência da pasta de cimento ( $b_{ics}$ ). Em geral, a pasta de cimento é mais eficiente quando apresenta valores de  $b_{ics}$  menores, por necessitarem de menores quantidades de cimento para determinado valor de resistência à compressão. Pode-se observar nos resultados que a relação não se

comporta de maneira linear, podendo apresentar melhor eficiência da pasta de cimento para maiores resultados de resistência à compressão. Uma análise mais criteriosa a respeito da eficiência da pasta de cimento ( $b_{ics}$ ) é muito relevante para o fator econômico na aplicação do concreto poroso, visto que o custo monetário desse material pode limitar seu uso em possíveis obras.

Tabela 15 - Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento expressa em bics

<b>POROSIDADE</b>	<b>RESISTÊNCIA (MPa)</b>	<b>Ccim (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Bics (kg/m<sup>3</sup>.MPa)</b>
20%	38,30	423,70	11,06
25%	23,61	342,90	14,52
30%	21,76	291,10	13,38
35%	15,90	224,00	14,09

FONTES: OS AUTORES.

A indústria cimentícia gera aproximadamente 5% das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> do planeta em sua produção (DAMINELI *et al.*, 2010), com isso o aspecto ambiental se torna um fator muito relevante na produção de peças de concreto permeável, principalmente pela sua elevada necessidade de pasta de cimento.

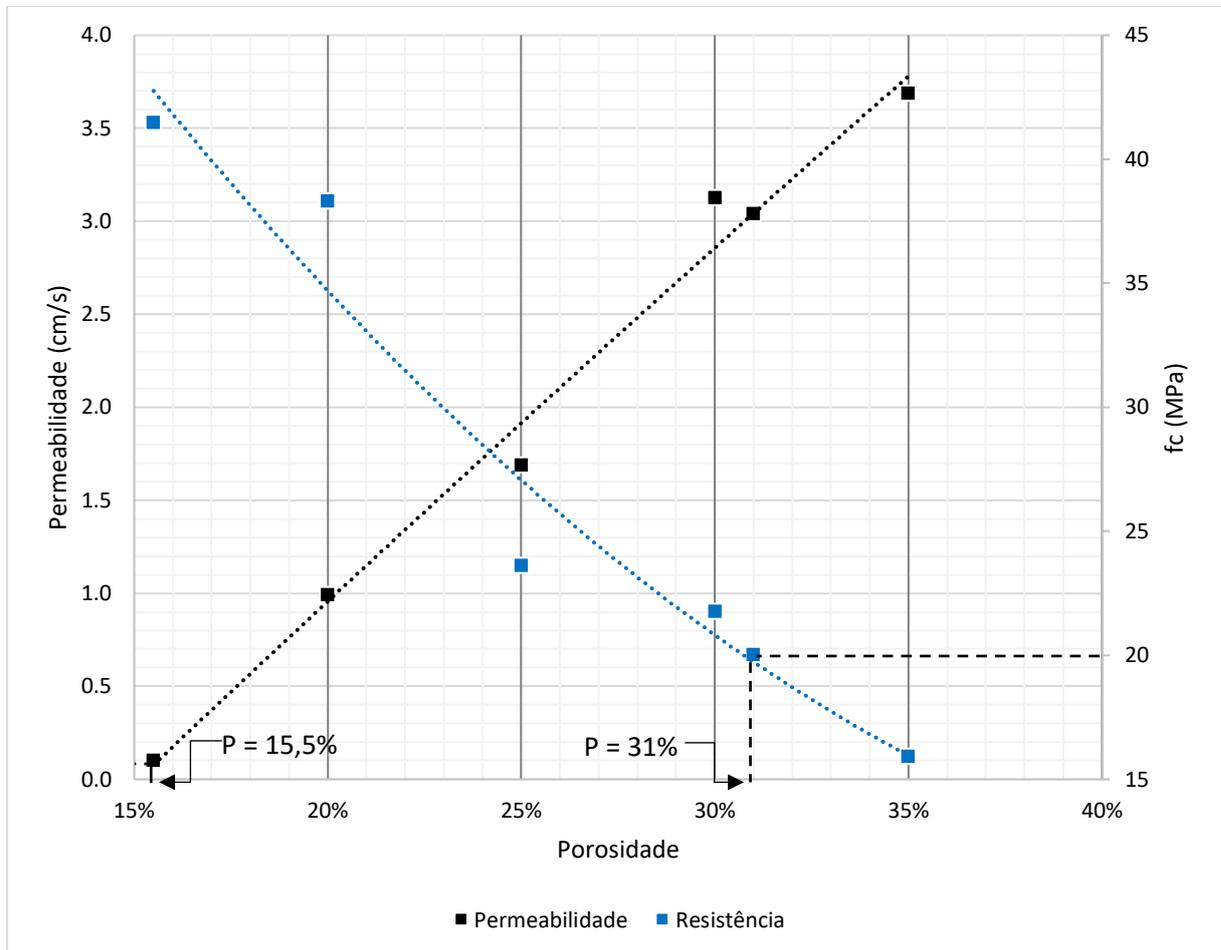
A melhoria na eficiência da pasta de cimento é imprescindível para a questão ambiental na produção do cimento e também no fator econômico da aplicação do concreto poroso. Soluções que reduzam a necessidade de pasta de cimento para atingirem valores suficientes de resistência à compressão se fazem essenciais para o bom desenvolvimento do concreto permeável. Sendo assim, o índice bics, medido em kg/m<sup>3</sup>/MPa, expressa o consumo de cimento necessário para atingir 1 MPa de resistência à compressão do concreto poroso. Quanto menor o valor bics, mais eficiente será o concreto em relação à essas duas propriedades em questão.

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DOSAGEM

Após análise das propriedades, foi definida uma faixa de valores para porosidade que satisfaça as normas vigentes quanto à resistência à compressão e taxa de infiltração. Através da Figura 24, pode-se definir as porosidades entre 15,5 e 31% como sendo os valores ideais para a execução deste material. Essa faixa de

valores de porosidade respeitam todos os critérios mínimos de norma de permeabilidade e resistência à compressão.

Figura 24 - Relação entre porosidade, resistência à compressão e taxa de infiltração



FONTE: OS AUTORES.

O consumo de cimento para a faixa de porosidade determinada varia entre 274,86 e 476,64 kg/m<sup>3</sup>, com um índice de eficiência da pasta de cimento variando entre 11,50 e 13,74 kg/m<sup>3</sup>.MPa, conforme Figura 24. Quanto ao consumo de cimento é preferível a utilização de porosidades elevadas na mistura, por diminuir o consumo deste material e viabilizar a aplicação do concreto permeável, reduzindo os impactos ambientais e econômicos da sua execução.

Em situações em que a resistência à compressão não atinja o mínimo exigido por norma, é necessário avaliar maneiras de otimizar a mistura, melhorando essa propriedade. A relação água/cimento pode ser alterada para atingir uma consistência de pasta adequada, garantindo que todos os agregados sejam envoltos pela pasta de cimento evitando falhas na matriz cimentícia. É necessário garantir que a

compactação da mistura seja feita uniformemente no processo de moldagem, para garantir que os resultados obtidos sejam representativos para a porosidade de projeto. Outra possível causa que resulta em resistências baixas é o processo de capeamento, que quando feito de maneira irregular impede que as tensões de compressão sejam distribuídas uniformemente no elemento moldado.

Foi possível observar que a variação da porosidade afetou, de maneira significativa, as demais propriedades dos elementos analisados. O aumento da porosidade melhorou o desempenho hidráulico e reduziu o consumo de cimento da mistura, porém prejudicou a resistência à compressão das amostras. Com os resultados obtidos, comprovou-se que o controle de porosidade é uma das variáveis que mais impactam no desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável.

De maneira geral, o método do grau de compactação proposto por Mikami (2022) permitiu a dosagem das misturas sem grandes dificuldades. Uma possível melhoria ao método é o ajuste da relação água/cimento para porosidades elevadas, pois no traço de 35% de porosidade, a mistura apresentou baixa coesão o que pode prejudicar o processo de moldagem. Outro fator importante para a determinação do fator água/cimento é a absorção da água presente na mistura pelo agregado graúdo, devendo esta ser descontada na quantidade final de água no concreto.

## 5. CONCLUSÃO

As propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável são diretamente influenciadas pela alteração da porosidade da mistura. Nesse estudo as porosidades que apresentaram uma resistência média que satisfaça as exigências de norma foram os traços de 20, 25 e 30% de porosidade. Desta maneira, apenas a porosidade de 35% não atendeu os critérios mínimos estabelecidos quanto a resistência à compressão, não sendo recomendada a sua aplicação em pavimentos permeáveis.

O ensaio de taxa de infiltração apresentou valores superiores ao mínimo exigido por norma. O menor valor médio encontrado foi de 0,35 cm/s correspondente ao traço com 20% de porosidade, sendo maior que o mínimo exigido pela norma, que equivale a 0,1 cm/s. Como esperado, o coeficiente de permeabilidade apresentou um aumento significativo conforme foi elevado o valor da porosidade.

Foi constatado um consumo elevado de cimento para a produção das amostras de concreto permeável. O consumo de cimento tende a reduzir com o aumento da porosidade do concreto permeável, pois a quantidade de pasta de cimento é reduzida para melhorar o desempenho hidráulico das amostras.

Após a análise das amostras e suas propriedades, pode-se definir o traço ideal que atinja a resistência mínima de norma com maior coeficiente de permeabilidade possível

. A porosidade de 31% é a maior porosidade que pode ser utilizada para atender todos os requisitos de norma, apresentando um valor de resistência à compressão igual a 20 MPa, uma taxa de infiltração igual a 3,04 cm/s e um consumo de cimento igual a 274,86 kg/m<sup>3</sup>.

Com os resultados obtidos foi comprovado que o aumento da porosidade é diretamente proporcional à sua permeabilidade e inversamente proporcional a sua resistência à compressão.

O método proposto do grau de compactação, que tem como procedimento sistemático o controle da porosidade e do fator a/c para administrar as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, apresentou-se excelente para a produção de lajotas de concreto permeável para porosidades distintas. Dito isso, o método possui muito potencial para uso prático em obras que utilizem concreto poroso para reduzir o escoamento superficial da água.

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. **ASTM C192M: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**. West Conshohocken: ASTM, 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1688M: Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2014a.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1701M: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2014b.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1754M: Standard Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2012b.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 16416 Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

\_\_\_\_\_. **NBR 16917 Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

\_\_\_\_\_. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

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

BAUER, R. J. F. **Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica**. **II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, Salvador, 1997.

BRATTERBO, B. O.; BOOTH, D. B. Long-term Storm Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems. **Water Research**. v. 37, n. 18, 2003.

CASTRO, S. B.; ARAÚJO, R. C.; CARASEK, H. Influência da técnica de capeamento na resistência à compressão do concreto permeável. **XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. v. 19, 2022.

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, 2016.

COELHO, M.; ROCHA, C. Influência do tamanho do agregado na permeabilidade do agregado e na resistência do concreto permeável. **Anais do Congresso Brasileiro do Concreto**, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

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

MARCHIONI, M.; MAYOR, A.; SILVA, C. **Conceitos e requisitos para pavimentos de concreto permeável**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2011.

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

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

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, n. 8, 2010.

NGUYEN, D. H. et al. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, 2014.

PIERALISI, R. *et al.* Contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de dosagem para concreto permeável baseada no desempenho. **Journal of Urban Technology and Sustainability**, v. 3, n. 1, 2020.

RAMOS, M. O.; PINHEIRO, I. G.; DE SOUSA JUNIOR, L. G. Influência da porosidade na condutividade térmica, resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, 2021.

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 (Tese de Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

XIE, X. et al. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 168, 2018.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, 2015.