

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
RONDÔNIA – (IFRO) CAMPUS PORTO VELHO CALAMA  
ENGENHARIA CIVIL**

**MAIKO WILLIANS DE LIMA NASCIMENTO**

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS NAS PROPRIEDADES DOS  
CONCRETOS PERMEÁVEIS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**PORTO VELHO - RO**

**2025**

**MAIKO WILLIANS DE LIMA NASCIMENTO**

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS NAS PROPRIEDADES DOS  
CONCRETOS PERMEÁVEIS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO),  
como requisito parcial para obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Valéria Costa de  
Oliveira.

Co-orientador: Me. Ayrton Rodrigues Ferreira

**PORTO VELHO – RO**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

Nascimento, Maiko Willians de Lima.

Influência de adições pozolânicas nas propriedades dos concretos permeáveis: uma revisão bibliográfica / Maiko Willians de Lima Nascimento. - Porto Velho, 2025.

47 f. : il.


Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Valeria Costa de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Porto Velho, 2025.

1. Concreto permeável. 2. Adições pozolânicas. 3. Drenagem urbana. 4. Sustentabilidade. 5. Propriedades mecânicas. I. Oliveira, Valeria Costa de (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.


**Bibliotecário(a) Responsável:** Miria Santana Veiga, CRB-11/898

Aprovado em: 04/12/ 2025 pela banca examinadora.

Documento assinado digitalmente  
 **CARLOS DRUMOND DO NASCIMENTO MORAIS**  
Data: 16/12/2025 20:45:56-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Membro da Banca: Carlos Drummond do Nascimento

Documento assinado digitalmente  
 **LIDIA BRUNA TELES GONZAGA**  
Data: 16/12/2025 21:47:14-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Membro da Banca: Lidia Bruna Teles Gonzaga

Documento assinado digitalmente  
 **AYRTON RODRIGUES FERREIRA**  
Data: 16/12/2025 22:11:32-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Co-orientador: Ayrton Rodrigues Ferreira

Documento assinado digitalmente  
 **VALERIA COSTA DE OLIVEIRA**  
Data: 16/12/2025 18:14:41-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador (a): Valéria Costa de Oliveira

## AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO PRIMEIRAMENTE A DEUS, PELA VIDA, PELA FORÇA CONCEDIDA EM CADA ETAPA DESTA CAMINHADA E POR ME SUSTENTAR NOS MOMENTOS DE DIFICULDADE, ILUMINANDO E GUIANDO MEUS PASSOS COM SABEDORIA.

ALÉM DISSO, GOSTARIA DE AGRADECER A MINHA FAMÍLIA, PRINCIPALMENTE AOS MEUS PAIS, MARIA AURILENE E RAIMUNDO NONATO, DEIXO MINHA ETERNA GRATIDÃO. COM MUITO AMOR, CARINHO E DEDICAÇÃO, VOCÊS SEMPRE ACREDITARAM EM MIM, OFERECENDO APOIO INCONDICIONAL E SENDO O ALICERCE QUE SUSTENTOU MEUS SONHOS. TODO ESTE TRABALHO É REFLEXO DO ESFORÇO, DOS CONSELHOS E DOS VALORES QUE ME ENSINARAM AO LONGO DA VIDA.

À MINHA ESPOSA, AGRADEÇO POR SEMPRE ESTAR AO MEU LADO, PELA PACIÊNCIA, PELA COMPREENSÃO E POR ACREDITAR EM MIM ATÉ NOS DIAS EM QUE EU MESMO DUVIDEI. SEU CARINHO, SUA FORÇA E SUA PRESENÇA TORNARAM ESSA JORNADA MAIS LEVE E ME MOTIVARAM A CONTINUAR.

AGRADEÇO TAMBÉM AOS MEUS AMIGOS, PELA PARCERIA E POR COMPARTILHAREM COMIGO MOMENTOS DE ALEGRIA E COMPANHEIRISMO. VOCÊS TORNARAM ESSE CAMINHO MAIS ESPECIAL E SIGNIFICATIVO.

POR FIM, DEIXO MINHA PROFUNDA GRATIDÃO A TODOS QUE, DE ALGUMA FORMA, FIZERAM PARTE DESTA CAMINHADA. CADA GESTO, CADA PALAVRA E CADA APOIO CONTRIBUÍRAM PARA QUE ESTE TRABALHO SE TORNASSE REALIDADE.

AGRADEÇO AINDA À MINHA ORIENTADORA, PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>aa</sup>. VALERIA COSTA DE OLIVEIRA, PELA ORIENTAÇÃO SÓLIDA, PELA DEDICAÇÃO E PELO COMPROMETIMENTO AO LONGO DE TODO O DESENVOLVIMENTO DESTA CAMINHADA. SUA EXPERIÊNCIA, PACIÊNCIA E APOIO FORAM FUNDAMENTAIS PARA QUE ESTE ESTUDO ALCANÇASSE QUALIDADE E CONSISTÊNCIA.

AO MEU CO-ORIENTADOR, ME. AYRTON RODRIGUES FERREIRA, AGRADEÇO PELA PARCERIA, PELAS CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS E PELAS ORIENTAÇÕES SEMPRE CLARAS E EFICIENTES. SUA COLABORAÇÃO FOI ESSENCIAL PARA O AMADURECIMENTO DESTA CAMINHADA.

## RESUMO

A intensificação da impermeabilização das superfícies urbanas tem provocado impactos negativos no ciclo hidrológico, aumentando o risco de alagamentos e comprometendo a eficiência dos sistemas de drenagem. Nesse contexto, o concreto permeável apresenta-se como uma alternativa sustentável, caracterizado por sua matriz porosa capaz de permitir a infiltração da água no solo. Constituído por cimento, agregados graúdos e pouca ou nenhuma fração miúda, esse material desempenha papel fundamental na recarga de aquíferos, na redução de enchentes, na mitigação das ilhas de calor e na diminuição de ruídos. A pesquisa analisou a incorporação de diferentes adições pozolânicas metacaulim, sílica ativa e cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando aprimorar o desempenho mecânico e a permeabilidade do concreto permeável sem comprometer sua função drenante, além de contribuir para a redução do consumo de cimento Portland. O estudo adotou abordagem qualitativa e bibliográfica, por meio de revisão sistemática de artigos publicados entre 2015 e 2025, selecionando trabalhos que apresentaram resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e permeabilidade, com diferentes proporções de adições. Os resultados evidenciam que a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas é técnica e ambientalmente viável. A sílica ativa em teores de 9% a 12% apresentou excelente desempenho mecânico, atingindo 25,3 MPa de resistência à compressão e 5,20 MPa à tração. O metacaulim destacou-se com o maior ganho de resistência, alcançando 41,44 MPa com 15% de substituição, mantendo permeabilidade adequada, como os 7,83 mm/s observados em traços com 5% de adição. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar mostrou-se eficiente mesmo em baixos teores, registrando 22,99 MPa de resistência à compressão com 2% e elevada permeabilidade de 12,6 mm/s com 25%. Todas as adições estudadas demonstraram potencial para melhorar as propriedades do concreto permeável, apresentando resultados superiores às exigências normativas nacionais que estabelecem parâmetros mínimos de resistência à compressão e permeabilidade. Assim, confirma-se a eficácia do uso de adições pozolânicas na produção de pavimentos permeáveis, contribuindo para soluções urbanas mais sustentáveis e eficientes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto permeável. Adições pozolânicas. Drenagem urbana. Sustentabilidade. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The intensification of waterproofing of urban surfaces has caused negative impacts on the hydrological cycle, increasing the risk of flooding and compromising the efficiency of drainage systems. In this context, permeable concrete presents itself as a sustainable alternative, characterized by its porous matrix capable of allowing water infiltration into the soil. Composed of cement, coarse aggregates, and little or no fine fraction, this material plays a fundamental role in aquifer recharge, flood reduction, mitigation of heat islands, and noise reduction. This research analyzed the incorporation of different pozzolanic additions—metakaolin, silica fume, and sugarcane bagasse ash—aiming to improve the mechanical performance and permeability of permeable concrete without compromising its drainage function, in addition to contributing to the reduction of Portland cement consumption. This study adopted a qualitative and bibliographical approach, through a systematic review of articles published between 2015 and 2025, selecting works that presented results of compressive strength, tensile strength by diametral compression, and permeability, with different proportions of additions. The results show that the partial replacement of cement with pozzolanic additions is technically and environmentally viable. Active silica at levels of 9% to 12% showed excellent mechanical performance, reaching 25.3 MPa of compressive strength and 5.20 MPa of tensile strength. Metakaolin stood out with the greatest gain in strength, reaching 41.44 MPa with 15% replacement, maintaining adequate permeability, such as the 7.83 mm/s observed in mixes with 5% addition. Sugarcane bagasse ash proved efficient even at low concentrations, registering a compressive strength of 22.99 MPa at 2% and high permeability of 12.6 mm/s at 25%. All the studied additions demonstrated potential to improve the properties of permeable concrete, presenting results superior to the national normative requirements that establish minimum parameters for compressive strength and permeability. Thus, the effectiveness of using pozzolanic additions in the production of permeable pavements is confirmed, contributing to more sustainable and efficient urban solutions.

**KEYWORDS:** Permeable concrete. Pozzolanic additions. Urban drainage. Sustainability. Mechanical properties.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Propriedades mecânicas dos concretos permeáveis produzidos com adições de sílica ativa em substituição parcial do cimento Portland.....	29
<b>Tabela 2</b> - Propriedades mecânicas do concreto permeável produzidos com adições de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland.....	33
<b>Tabela 3</b> - Propriedades mecânicas do concreto permeável produzidos com adições de cinza do bagaço da cana de açúcar em substituição parcial do cimento Portland.....	38
<b>Tabela 4</b> - Melhores Valores Obtidos para Propriedades de Concretos Permeáveis com Adições Minerais.....	41

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Tipos de cimentos utilizados por autores da área científica.....	16
<b>Quadro 2</b> - Tipos de rochas utilizados por cada um dos autores estudados.....	17
<b>Quadro 3</b> - Resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável. (mm).....	22
<b>Quadro 4</b> - Revisão Bibliográfica dos Parâmetros de Adições Minerais em Estudos Selecionados.....	25
<b>Quadro 5</b> - Parâmetros de dosagem da sílica ativa.....	26
<b>Quadro 6</b> - Parâmetro de dosagem com metacaulim no concreto permeável.....	27
<b>Quadro 7</b> - Parâmetro de dosagem com CBCA no concreto permeável.....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
CBCA	Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
CDD	Classificação Decimal de Dewey
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPI	Cimento Portland I
CPI-RS	Cimento Portland I - Resistente a Sulfatos
CPII E-32	Cimento Portland II E-32
CP II-F-32	Cimento Portland II F-32
CP II-F-40	Cimento Portland II F-40
CP II-Z-32	Cimento Portland II Z 32
CP II-Z-32 RS	Cimento Portland II Z 32 - Resistente a Sulfatos
CPII 40 RS	Cimento Portland III 40 - Resistente a Sulfatos
CP V-ARI	Cimento Portland V - Alta Resistência Inicial
EPA	Environmental Protection Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEF	Método dos Elementos Finitos
MK	Metacaulim
NBR	Metacaulim
OPC	Ordinary Portland Cement (Cimento Portland Comum)
PPC	Cimento Portland Composto
SA	Sílica Ativa
SciELO	Scientific Electronic Library Online
SF	Sílica (Fumo de Sílica)

**LISTA DE SÍMBOLOS**

a/c	Relação água cimento
Dmax	Diâmetro máximo característico
fc	Resistência à compressão axial
Fcd	Resistência à tração por compressão diametral
fck	Resistência característica do concreto à compressão
fct	Resistência à tração por compressão diametral
ft,f	Resistência à tração na flexão
K	Coefficiente de permeabilidade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.1.1. Objetivos Gerais.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1. CONCRETO PERMEÁVEL.....	15
2.2. MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS..	15
2.2.1. Cimento.....	15
2.2.2. Água e as principais relações água-aglomerante empregadas em concretos permeáveis.....	16
2.2.3. Agregado graúdo.....	17
2.2.4. Adições pozolânicas e aditivos.....	19
2.2.5. Vantagens e desvantagens na utilização do concreto permeável.....	20
2.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	21
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
3.1. SELEÇÃO DAS PESQUISAS.....	23
3.2. CENÁRIO DA PESQUISA.....	23
3.3. TRIAGEM E COLETA DE DADOS.....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
4.1. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM SÍLICA ATIVA.....	29
4.2. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM METACAU LIM.....	33
4.3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM CINZA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR.....	37
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana tem resultado em um aumento significativo de áreas pavimentadas com materiais impermeáveis, como ruas, calçadas, praças e estacionamentos. Essas superfícies impedem a infiltração da água no solo, alterando o ciclo natural da água e contribuindo para diversos problemas ambientais nas cidades. De acordo com a prévia do Censo Demográfico de 2022, o Brasil possui uma população de aproximadamente 208 milhões de habitantes. Desse total, cerca de 85% vivem em áreas urbanas (IBGE, 2022). Uma solução para os alagamentos causados pela impermeabilização dos pavimentos é a utilização dos concretos permeáveis.

O concreto permeável é composto basicamente por cimento, agregados graúdos e pouca ou nenhuma presença de agregados miúdos. Essa composição é necessária para garantir a porosidade e a permeabilidade do material. O pavimento permeável é formado por camadas, cada uma com um grau de permeabilidade que permite a passagem da água e do ar. A camada de revestimento recebe a atividade direta do tráfego, devendo resistir ao atrito. Usualmente, são utilizados três tipos de camada de revestimento: concreto permeável, asfalto permeável e blocos intertravados (ABNT, 2015).

Segundo Bonicelli, Arguelles e Pumarejo (2016), a Environmental Protection Agency (EPA) reconhece o concreto permeável como uma das melhores práticas de manejo para a redução do escoamento de águas pluviais. Essa tecnologia é vista como uma solução eficiente no controle de enchentes urbanas e na melhoria da drenagem sustentável.

Em países em desenvolvimento como o Brasil, os problemas de drenagem urbana têm se agravado devido à expansão acelerada e desordenada das cidades, enquanto as soluções convencionais apresentam altos custos e não resolvem completamente os impactos da impermeabilização do solo. Nesse cenário, o concreto permeável se destaca como uma alternativa viável e sustentável, por permitir a infiltração da água no solo, ajudando a reduzir alagamentos e a recarregar o lençol freático. Para garantir seu bom desempenho, é importante entender como os materiais cimentícios, como metacaulim, sílica ativa e cinza do bagaço de cana-de-açúcar, influenciam suas propriedades físicas e mecânicas. Todas as camadas que compõem o sistema do pavimento permeável têm sua importância, com destaque para a camada de revestimento, que além de permitir a infiltração da água, é a responsável por suportar o contato direto com o tráfego e resistir ao atrito gerado. O concreto permeável é comumente utilizado nesse revestimento (ABNT, 2015).

Segundo estudos de Paula et al. (2009), a adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em misturas com cimento Portland aumentou a porosidade das argamassas, resultando em maior absorção de água. Esse efeito é especialmente importante quando se busca desenvolver misturas mais porosas, como é o caso do concreto permeável.

A substituição parcial do cimento por metacaulim tem como objetivo melhorar a resistência mecânica do concreto permeável, formando uma camada adequada de pasta ao redor dos agregados graúdos, sem comprometer de forma significativa sua permeabilidade.

Dessa forma, percebe-se a importância de continuar estudando a influência dos materiais cimentícios nas propriedades do concreto permeável, buscando melhorar seu desempenho e torná-lo uma solução mais sustentável. A utilização de materiais como metacaulim, sílica ativa e cinza do bagaço de cana-de-açúcar ajuda a reduzir o uso do cimento Portland, cuja produção gera impactos ambientais significativos. Por isso, este trabalho se justifica pela necessidade de desenvolver alternativas eficientes, duráveis e com menor impacto ambiental.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivos Gerais

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, a influência das adições pozolânicas (metacaulim, sílica ativa e cinza do bagaço da cana-de-açúcar) nas propriedades mecânicas e na permeabilidade do concreto permeável.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar parâmetros de dosagem e percentuais de substituição do cimento utilizados em estudos envolvendo metacaulim, sílica ativa e cinza do bagaço da cana-de-açúcar.
- Comparar os valores de resistência à compressão, tração e permeabilidade reportados na literatura para diferentes teores de adição.
- Avaliar o potencial de cada adição quanto ao desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta etapa, será realizada uma explicação teórica da pesquisa, centrada no tema concreto permeável.

### 2.1. CONCRETO PERMEÁVEL

De acordo com o American Concrete Institute (ACI) (2010), por meio do Relatório do Comitê 522, o concreto permeável é definido como um concreto de cimento hidráulico com vazios interconectados em quantidade suficiente para permitir elevada permeabilidade, facilitando o escoamento da água através de sua estrutura.

Diante de seu bom desempenho em termos de capacidade de drenagem, o concreto permeável tem sido adotado como uma solução eficiente para mitigar os impactos da impermeabilização excessiva dos solos, um problema recorrente decorrente do crescimento urbano acelerado (LAMB, 2014).

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o concreto permeável é classificado de acordo com o tipo de uso, podendo ser aplicado em áreas com circulação de pedestres ou veículos leves. Para cada caso, a norma define uma espessura e resistência mínima a compressão de 20 MPa e tração na flexão de 2 MPa, e 6 cm para uso apenas com pedestres e 8 cm para locais com tráfego leve. Já Dellate e Clearly (2006) propuseram sobre a classificação dos concretos permeáveis, considerando tanto a resistência mecânica quanto a capacidade de drenagem.

### 2.2. MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS

O concreto permeável é composto por materiais básicos como cimento, água, brita e, em alguns casos, aditivos. Esses componentes são misturados de forma controlada para formar uma estrutura que permita a passagem da água.

#### 2.2.1. Cimento

O cimento Portland é classificado como um material aglomerante hidráulico, sendo amplamente utilizado na construção civil. Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), sua composição baseia-se principalmente no clínquer, que é produzido por meio da calcinação de uma mistura de calcário, argila e outros aditivos. Essa mistura é submetida a temperaturas elevadas, em torno de 1450 °C.

Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), o cimento Portland é o mais usado na produção do concreto permeável. Junto com a água, ele forma a pasta que envolve os agregados e ajuda a dar mais durabilidade ao material. No Quadro 1, estão listados os principais tipos de

cimento que costumam ser utilizados nos concretos permeáveis, cada um com características que podem afetar na mistura final da mistura.

**Quadro 1** - Tipos de cimentos utilizados por autores da área científica

Tipos de cimentos utilizados	Autores que utilizaram
<b>CPI</b>	<b>Putman e Neptune (2011), Chen et al. (2013), Jimma e Rangaraju (2014), Ibrahim et al. (2014), Zhong e Wille (2015), Torres, Hu e Ramos (2015) Hariyadi e Tamai (2015) Jimma e Rangaraju (2015), Meddah et al. (2017) Mohammed et al. (2018)</b>
<b>CPII Z 32</b>	<b>Mariano (2014); Alves (2016).</b>
<b>CPII E 32</b>	<b>Vidal (2014); Teixeira (2020).</b>
<b>CPII F 32</b>	<b>Trindade e Lopes (2018).</b>
<b>CPII F 40</b>	<b>Gentil (2020).</b>
<b>CPIII 40 RS</b>	<b>Batezini (2013).</b>
<b>CPI-RS</b>	<b>Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014).</b>
<b>CP IV 32</b>	<b>Tavares e Kazmierczak (2016).</b>
<b>CP V-ARI</b>	<b>Lamb (2014); Barbosa e Pereira (2015); Fonseca (2016); Girardi e Finocchiaro (2017); Bizão (2021); Bezerra (2023).</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.2. Água e as principais relações água-aglomerante empregadas em concretos permeáveis

Á água é um elemento importante na produção de qualquer mistura cimentícia, e com o concreto permeável não é muito diferente, durante o processo de mistura, sua principal função é promover a hidratação do cimento.

A quantidade de água tem influência direta nas propriedades do concreto permeável. Quando utilizada em excesso, pode causar o preenchimento dos vazios, comprometendo a permeabilidade. Já em quantidade insuficiente, reduz a coesão e a trabalhabilidade da mistura no estado fresco.

Segundo Costa (2019) a relação água/cimento influencia diretamente a densidade do concreto endurecido, a porosidade e os índices de infiltração e permeabilidade". Já Ferreira (2024, p. 63) afirma que "o valor de a/c igual a 0,34 foi ideal para a composição da pasta,

promovendo maior fluidez e consistência visual". Fontes (2023) cita que "a faixa de 0,26 a 0,45 é recomendada pela ACI (2010) para concretos permeáveis, sendo ajustável conforme os materiais utilizados".

### 2.2.3. Agregado graúdo

O uso de agregado graúdo em concreto permeável é fundamental para garantir a resistência mecânica da mistura. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), o agregado graúdo é definido como um material granular composto por partículas com dimensões superiores a 4,75 mm.

Segundo Yahia e Kabagire (2014), a forma como as partículas dos agregados são classificadas por tamanho influencia diretamente algumas propriedades do concreto permeável. Entre essas propriedades estão o índice de vazios, a trabalhabilidade da mistura, a tendência à segregação dos materiais e a durabilidade do concreto. O Quadro 2 indica os principais tipos de rochas dos agregados graúdos empregados em concretos permeáveis.

**Quadro 2** - Tipos de rochas utilizados por cada um dos autores estudados

Fonte	Tipo de Rocha	Vantagens	Desvantagens
Ferreira et al (2024)	Basáltica	Boa resistência à compactação, alta aderência da pasta	Pode ter maior absorção de água, exigindo correção no traço
Fontes et al (2023)	Basáltica	Fácil acesso, boa resistência mecânica	Pode conter impurezas que exigem lavagem e secagem
Costa et al (2019)	Calcário, granito, dolomito, reciclado	Calcário: alta resistência; Dolomita: melhor porosidade; Reciclado: sustentável	Calcário: menor permeabilidade; Granito: menor resistência; Reciclado: menor resistência à compressão
Gagliardo et al (2021)	Basáltica	Utilizada como agregado graúdo dimensão máxima característica de 9,5 mm) na produção do concreto permeável analisado	Não especificada nas fontes fornecidas
Liu, H et al (2024)	Granito natural	Possui características favoráveis como alta densidade e baixa absorção de água; foi usado como agregado de referência de qualidade e cumpriu os requisitos de granulometria do projeto.	Apresenta baixa resistência e durabilidade precária, com fraca resistência a ciclos de congelamento e degelo (o que restringe sua aplicação em áreas frias).
Santana et al (2024)	Basáltica	Agregado de fácil acesso e largamente disponível Seu uso resulta em concreto final com alto coeficiente de	O concreto permeável resultante tem baixa resistência, durabilidade precária e risco de obstrução

		<b>permeabilidade e alto índice de vazios</b>	<b>dos poros (problemas que o estudo buscou corrigir)</b>
<b>Andrade et al (2019)</b>	<b>Micaxisto</b>	<b>O uso desta rocha garante a permeabilidade adequada, sendo eficaz para amenizar inundações e drenar a água.</b>	<b>O concreto resultante tem baixa resistência à compressão e é vulnerável ao desgaste por abrasão (problemas inerentes à sua porosidade)</b>
<b>Bazzan et al (2024)</b>	<b>Cascalho</b>	<b>É o esqueleto principal do concreto permeável e cumpriu as normas de qualidade exigidas.</b>	<b>A baixa resistência mecânica é uma limitação do concreto final, sendo necessário o uso de aditivos para melhorias.</b>
<b>Silva et al (2021)</b>	<b>Basáltico</b>	<b>Apresenta uma distribuição granulométrica uniforme, o que é essencial para o desenvolvimento do concreto permeável. Seu uso contribui para o material atingir a permeabilidade mínima exigida pelas normas</b>	<b>Que este estudo buscou melhorar com adições minerais, mostrando a limitação do material de referência.</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos trabalhos analisados, A literatura demonstra que a escolha do tipo de agregado influencia diretamente a permeabilidade, resistência e durabilidade do concreto permeável. Entre os materiais mais utilizados, a rocha basáltica se destaca por sua boa resistência à compactação e aderência da pasta (Ferreira et al., 2024), além de apresentar boa resistência mecânica e ampla disponibilidade, embora possa conter impurezas que exigem lavagem (Fontes et al., 2023). Também é adequada ao esqueleto permeável (Gagliardo et al., 2021), e sua uniformidade granulométrica auxilia no atendimento da permeabilidade mínima, ainda que exija melhorias com adições minerais (Silva et al., 2021).

Outras rochas também apresentam relevância. O granito natural possui alta densidade e baixa absorção, mas apresenta baixa resistência e durabilidade, sobretudo em ciclos de congelamento e degelo (Liu et al., 2024). Estudos comparativos mostram que o calcário tem alta resistência, porém reduz a permeabilidade, enquanto a dolomita melhora a porosidade e os agregados reciclados, apesar do apelo ambiental, apresentam menor resistência (Costa et al., 2019).

Agregados alternativos, como o micaxisto, oferecem boa permeabilidade, mas resultam em concretos com baixa resistência e elevada susceptibilidade ao desgaste (Andrade et al., 2019). O basalto produz concretos com alto índice de vazios, porém com baixa durabilidade e risco de obstrução (Santana et al., 2024). O cascalho, por sua vez, atende às

normas e compõe bem o esqueleto do concreto, mas apresenta baixa resistência mecânica (Bazzan et al., 2024).

Assim, observa-se que cada tipo de rocha apresenta vantagens específicas e limitações próprias, exigindo ajustes no traço ou no tratamento dos agregados para alcançar o equilíbrio desejado entre permeabilidade e desempenho mecânico.

#### **2.2.4. Adições pozolânicas e aditivos**

De acordo com a NBR 13956-1 (ABNT, 2012) a sílica ativa é um material que se forma durante a produção de silício metálico ou de ligas de ferro-silício com cerca de 75% de silício, feitas em fornos elétricos. Nesse processo, é liberado um gás chamado monóxido de silício (SiO), que, ao entrar em contato com o ar em temperatura ambiente, se transforma em partículas de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). Essas partículas bem finas são então capturadas por sistemas de filtragem usados na própria indústria.

A sílica ativa é uma pozolana com alta reatividade, formada basicamente por partículas esféricas extremamente finas, com diâmetro menor que 1 micrômetro (10<sup>-6</sup> metros), compostas de sílica em estado amorfo. Quimicamente, trata-se de um material bastante homogêneo, com alto teor de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), geralmente acima de 85%. Por essas características, seu uso é indicado em compósitos à base de cimento Portland, conforme especificado na NBR 13956 (ABNT, 2012).

Segundo Neville (2016) a sílica ativa pode ser considerada uma adição com propriedades cimentícias, já que ela participa ativamente das reações químicas que ocorrem durante o processo de hidratação do cimento.

De acordo com a NBR 15894-1 (ABNT, 2010) o metacaulim é um produto obtido pela calcinação e moagem de argilominerais cauliníticos, sendo classificado como uma pozolana – um material que reage com hidróxido de cálcio — e que apresenta estrutura predominantemente não cristalina. Segundo Santos et al. (2017), o metacaulim atua como um aditivo com propriedades tixotrópicas, ou seja, ele melhora a capacidade da pasta de cimento de se tornar mais fluida sob agitação e mais consistente em repouso. Além disso, funciona como um modificador de viscosidade, contribuindo para uma mistura mais homogênea e estável.

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância econômica tanto no Brasil quanto em outros países, sendo amplamente utilizada na produção de açúcar, etanol e também na geração de energia elétrica (Silva et al., 2014).

A produção mundial de cana-de-açúcar gira em torno de 1,5 bilhão de toneladas por ano. No Brasil, durante a safra 2011/2012, a produção alcançou cerca de 560,3 milhões de toneladas, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). A produtividade média nesse período foi de 67 toneladas por hectare, em uma área cultivada de aproximadamente 8,36 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2012).

Durante o processo de extração do caldo da cana-de-açúcar, é gerado um grande volume de bagaço. Esse resíduo, no entanto, não é descartado: as próprias usinas aproveitam o bagaço como fonte de combustível para a geração de energia elétrica (REVISTA PESQUISA FAPESP, 1998). Nessa etapa de extração, o bagaço da cana resultante é direcionado para ser utilizado como combustível no setor responsável pela geração de vapor. Esse setor é formado por quatro caldeiras que operam com uma pressão de trabalho de 21 kgf/cm<sup>2</sup>. No interior das caldeiras, mais especificamente na fornalha, ocorre a queima do bagaço, com temperaturas de combustão variando entre 700 °C e 750 °C.

Como resultado desse processo, são geradas as cinzas residuais (Anjos et al., 2012). A cinza gerada a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar é composta, em sua maior parte, por dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Cordeiro et al., 2009). Em teoria, qualquer tipo de cinza seja de origem industrial ou vegetal que apresenta altos teores de sílica pode ser utilizada como adição mineral, desde que esteja no estado amorfo e possua uma granulometria adequada (John et al., 2003).

### **2.2.5. Vantagens e desvantagens na utilização do concreto permeável**

Os benefícios proporcionados pelo uso do concreto permeável são significativos, especialmente sob as perspectivas ambiental e social. Um dos principais aspectos positivos é a capacidade de promover a infiltração das águas pluviais no solo, contribuindo para a recarga dos lençóis freáticos e, simultaneamente, reduzindo o risco de enchentes e o volume de escoamento superficial nas áreas urbanizadas (Ibrahim et al., 2014).

No caso dos pavimentos permeáveis, em ambientes urbanos, a estrutura porosa e a coloração mais clara do concreto em relação ao asfalto, colaboram para a redução do aquecimento do ambiente urbano (Ferguson, 2005).

Apesar da perspectiva ambiental ser muito vantajosa da utilização do concreto permeável, há atributos que podem aumentar a qualidade de vida da população. Entre os principais benefícios do concreto permeável, destacam-se a redução do efeito de ilha de calor

e a diminuição do ruído nas vias, conforme apontado por Yang e Jiang (2003) e Lorenzi et al. (2015).

Narasimha (2013) e Maguesvari, realizaram um estudo que tratava dos principais desafios associados à taxa de permeabilidade em pavimentos permeáveis é a colmatação, que consiste no bloqueio progressivo dos poros por partículas de sujeira, poeira, restos vegetais e outros detritos. Esse processo ocorre naturalmente ao longo do tempo e pode afetar significativamente o desempenho do pavimento, reduzindo sua capacidade de infiltração.

### 2.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

Entre as propriedades mecânicas avaliadas no concreto permeável, destaca-se a resistência à compressão. No Brasil, os limites para esse critério são especificados pela NBR 16416 (ABNT, 2015). A norma brasileira voltada para o concreto permeável define limites específicos de resistência mecânica conforme o tipo de revestimento utilizado. Além disso, ela especifica os métodos de ensaio apropriados, levando em consideração a forma de solicitação, a resistência requerida e a espessura mínima do pavimento, conforme o Quadro 3.

**Quadro 3** - Resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável. (mm)

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima	Resistência mecânica	Método de ensaio
Peças de concreto (áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	$\geq 35$	NBR 9781 (ABNT, 2013)
	Tráfego leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 20$	NBR 15805 (ABNT, 2015)
	Tráfego leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 2$	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Tráfego leve	80		
moldado moldado no local	Tráfego de pedestres	60	$\geq 1$	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Tráfego leve	100	$\geq 2$	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio de compressão axial simples em corpos-de-prova cilíndricos é realizado segundo a ABNT NBR 5739 (2018), consiste na aplicação de uma carga crescente até a ruptura do corpo de prova, determinando a resistência à compressão do concreto. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (também chamado de Ensaio Brasileiro) determina a resistência à tração indireta em corpos-de-prova cilíndricos, pela aplicação de carregamento diametral até a ruptura, sendo um método mais prático e uniforme do que a tração direta ABNT (2011).

Segundo Oliveira (2017), o concreto permeável é utilizado principalmente na camada de rolamento dos pavimentos. Por isso, essa parte do piso acaba sendo mais afetada pelos esforços de tração que ocorrem por flexão. Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014) e Pils et al. (2019), em seus estudos observaram boas correlações entre os resultados de resistência à tração na flexão obtidos no ensaio de compressão diametral com 0,54 – 2,52 MPa, e ensaio de tração na flexão com 0,70 – 6,35 MPa.

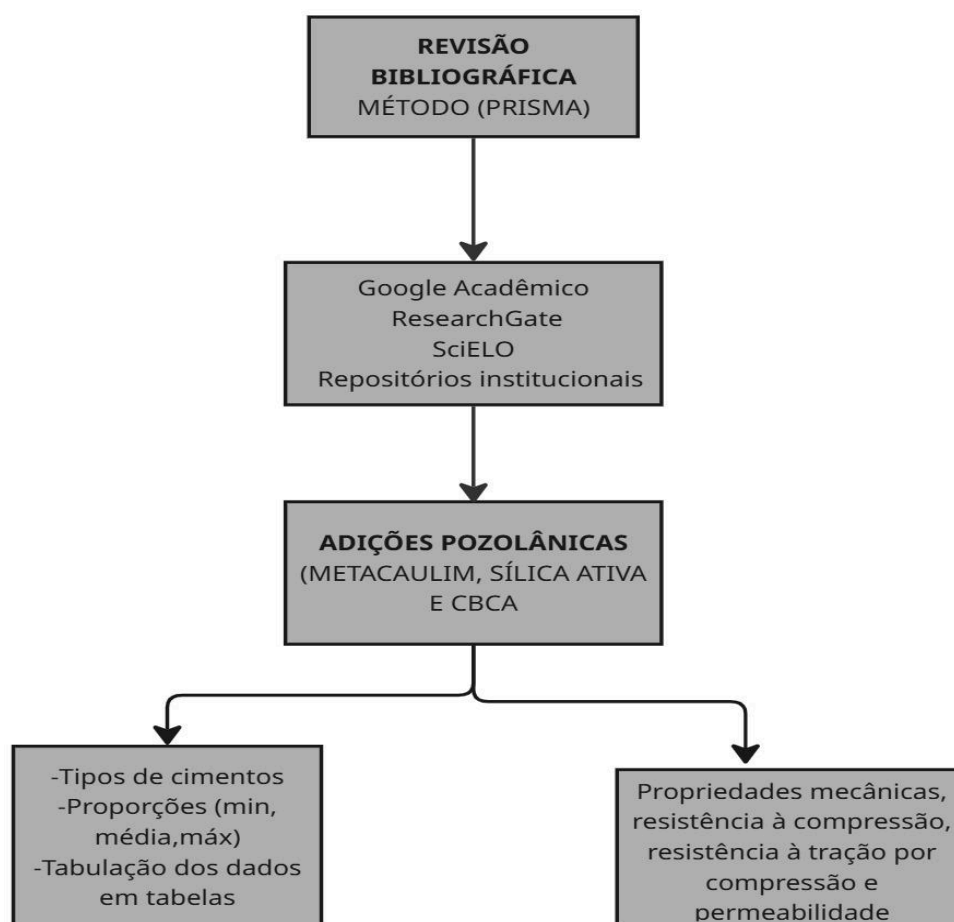
A permeabilidade é uma das propriedades mais relevantes do concreto permeável e pode ser avaliada por métodos descritos em normas como a NBR 16416 (ABNT, 2015), que estabelece os critérios de projeto e desempenho para pavimentos permeáveis que devem ser projetados para permitir a adequada infiltração da água pluvial, sendo que base e subleito atenda aos requisitos de permeabilidade e resistência, garantindo tanto o desempenho hidráulico quanto estrutural.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. SELEÇÃO DAS PESQUISAS

Para analisar a influência das adições pozolânicas de metacaulim, sílica ativa e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, nas propriedades do concreto permeável a essa pesquisa, optou-se pela abordagem bibliográfica de caráter qualitativo. A pesquisa qualitativa é importante para compreender os significados e as interpretações presentes nas obras estudadas.

**Figura 1** – Fluxograma da Metodologia



**Fonte:** Próprio Autor (2025).

#### 3.2. CENÁRIO DA PESQUISA

A pesquisa será realizada a partir da consulta a diversas fontes acadêmicas e científicas, como artigos científicos, trabalhos acadêmicos e teses, disponíveis em bibliotecas

virtuais e repositórios institucionais. A principal ferramenta utilizada será o Google Acadêmico, researchgate, SciELO e repositórios institucionais por oferecer amplo acesso a conteúdos relevantes na área de concreto permeável.

As palavras-chave mais utilizadas durante as buscas são “concreto permeável” e “materiais cimentícios”, “adições pozolânicas, metacaulim, sílica e bagaço da cana de açúcar”, no período de 2015 a 2025. Busca-se cerca de várias referências bibliográficas de acesso aberto. Desta forma, serão analisados os resumos para avaliar a relevância em relação ao tema proposto. Após essa análise, os dados de propriedades mecânicas e permeabilidade serão tabulados e demonstrados em tabelas de modo a fundamentar teoricamente este estudo, por apresentarem abordagens alinhadas aos objetivos da pesquisa.

### 3.3. TRIAGEM E COLETA DE DADOS

A triagem das publicações foi realizada a partir da leitura dos títulos e resumos, com o objetivo de selecionar apenas estudos diretamente relacionados ao concreto permeável com adições pozolânicas. Nessa etapa, foram incluídos exclusivamente trabalhos que apresentavam resultados de ensaios mecânicos, como resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, além de estudos que disponibilizavam valores de permeabilidade. Outro critério adotado foi a exigência de que os artigos apresentassem valores numéricos claros e comparáveis, permitindo a análise conjunta dos resultados.

Após essa filtragem inicial, deu-se início à coleta de dados, na qual foram extraídas informações específicas dos estudos selecionados. Foram coletados os tipos de adições empregadas (metacaulim, sílica ativa e cinza do bagaço da cana-de-açúcar), suas proporções utilizadas (mínima, média e máxima), os tipos de cimento adotados e os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e de permeabilidade. Esses dados foram posteriormente organizados em tabelas, possibilitando uma comparação estruturada e contribuindo para a interpretação dos efeitos das diferentes adições pozolânicas sobre as propriedades do concreto permeável.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das referências bibliográficas analisadas dados os parâmetros de percentuais de substituição de cimento Portland por adições pozolânicas e as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e permeabilidade à água dos concretos permeáveis. O Quadro 4 mostra as referências bibliográficas selecionadas para análise e discussão dos resultados.

**Quadro 4 - Revisão Bibliográfica dos Parâmetros de Adições Minerais em Estudos Selecionados**

Referências bibliográficas	Adição e percentuais	Tipos de cimentos utilizados	Tipo de rocha e D <sub>máx</sub> do agregado graúdo
Ferreira (2024)	Metacaulim (5%, 10%, 15%)	CPII F 40	Basáltica: 6,3mm e 9,5 mm
Fontes (2022)	CBCA (5%,10%)	CP II-F 32	Basáltica: 9,5mm
Costas et al. (2019)	Sílica (8%)	CP V-ARI	Basáltica:12,5 mm
Gagliardo (2021)	Sílica ativa (10%)	CP V-ARI	Basáltica: 9,5mm
Liu, H (2018)	Sílica ativa (3, 6, 9, 12%)	CP P.O 42.5.	Granito natural: 4,75 e 9,5mm
Santana (2024)	Sílica ativa (10%)	CPII F 32	Basáltica: 4,75mm e 12,5mm
Andrade (2019)	Metacaulim (5,10,15%)	CP V-ARI	Micaxisto: 12,5 mm
Andrade (2019)	Sílica (5,10,15%)	CP V-ARI	Micaxisto: 12,5 mm
Bazzan (2024)	CBCA (2%, 4%, 6%)	CPI	Cascalho: 12mm e 9,5mm
Silva et al. (2021)	CBCA (10%,15%,25%)	CP V-ARI	Basáltico: 12,5mm
SINGH S, B et al (2022)	Metacaulim (5%, 10%,15%, 20%)	OPC	Não indentificada 12,5mm e 20mm
Supit et al (2019)	Metacaulim 10%	PPC	Culino 20mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira geral, os estudos analisados apresentam tendências claras no comportamento das adições pozolânicas. As pesquisas envolvendo sílica ativa mostram convergência para um teor ótimo em torno de 10%, o qual proporciona aumento significativo da resistência sem comprometer a permeabilidade. Para o metacaulim, observa-se comportamento ascendente até aproximadamente 15%, conforme apontado por Singh et al. (2022), evidenciando maior reatividade e capacidade de refinamento microestrutural. Já a

cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) tende a favorecer a permeabilidade em teores mais elevados, enquanto apresenta incrementos mecânicos mais modestos. Esses comportamentos reforçam que cada adição atua de maneira distinta sobre a matriz cimentícia, influenciando tanto a resistência quanto o desempenho hidráulico de acordo com seu teor e características físico-químicas de acordo com o Quadro 4.

O Quadro 5, consolida as principais condições experimentais, reunindo informações referentes aos tipos de cimento empregados, aos percentuais de substituição, às características mineralógicas dos agregados e às faixas de granulometria observadas nos diferentes estudos sobre concreto permeável que utilizaram sílica ativa como adição mineral.

**Quadro 5 - Parâmetros de dosagem da sílica ativa**

Referências bibliográficas	Tipos de cimentos utilizados	Tipo de rocha e D <sub>máx</sub> do agregado graúdo	Adições e percentuais
<b>Gagliardo (2021)</b>	<b>CP V-ARI</b>	<b>Basáltica 9,5mm</b>	<b>10%</b>
<b>Costas et al. (2019)</b>	<b>CP V-ARI</b>	<b>Basáltica 12,5mm</b>	<b>8%</b>
<b>Liu, H (2018)</b>	<b>CP P.O 42.5.</b>	<b>Granito natural 4,75 e 9,5mm</b>	<b>3%, 6%, 9%, 12%</b>
<b>Santana (2024)</b>	<b>CPII F-32</b>	<b>Basáltica 4,75mm e 12,5mm</b>	<b>10%</b>
<b>Andrade (2019)</b>	<b>CP V-ARI</b>	<b>Micaxisto 12,5 mm</b>	<b>5%, 10%, 15%</b>

Fonte: Elaborado pelo o próprio autor (2025)

Observou-se que diferentes tipos de cimento de cimentos na composição de concretos permeáveis, destacando-se CP V-ARI, empregados conforme os objetivos experimentais em cada pesquisa. Os percentuais de substituição parcial do cimento por sílica ativa variam entre 3% e 15%, contemplando teores como 3%, 6%, 9%, 10%, 12% e 15% e 8%. Aponta-se que o teor de 10% foi o mais recorrente entre os estudos, indicando sua ampla aplicação na investigação da sílica ativa sobre o desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável.

Quanto à granulometria, o diâmetro máximo característico dos agregados (D<sub>máx</sub>) variou entre 4,75mm, 9,5 mm e 12,5 mm, que corresponde ao maior diâmetro adotado dentre os estudos. A predominância desse valor evidencia a busca por agregado graúdo, condição essencial para o aumento da permeabilidade da água.

No que se refere à natureza dos agregados, identificou-se a ocorrência de diferentes tipos de rocha, tais como basalto, granito natural e micaxisto. Entre esses materiais, destaca-se a rocha basáltica, apontada como mais utilizada nas pesquisas revisadas, refletindo sua

disponibilidade, resistência elevada e boa compatibilidade com misturas de concreto permeável.

O Quadro 6, consolida as principais condições experimentais, reunindo informações referentes aos tipos de cimento empregados, aos percentuais de substituição, às características mineralógicas dos agregados e às faixas de granulometria observadas nos diferentes estudos sobre concreto permeável que utilizaram metacaulim como adição mineral.

**Quadro 6** - Parâmetro de dosagem com metacaulim no concreto permeável

Autor	Tipo de Cimento	Tipo de rocha e D <sub>máx</sub> do agregado graúdo	Percentuais de substituição utilizados da adição
Ferreira (2024)	CPII F 40	Basáltica 6,3mm e 9,5mm	5%, 10%, 15%
Andrade (2019)	CP V-ARI	Micaxisto 12,5 mm	5%, 10%, 15%
SINGH S, B et al (2022)	OPC(CPI)	Tipo de rocha não identificada 12,5mm e 20 mm	5%, 10%, 15%, 20%
Supit et al (2019)	PPC(CPII)	Caulino 20mm	10%

Fonte: Elaborado pelo o próprio autor (2025)

A partir da análise dos estudos que investigaram a incorporação de metacaulim em concretos permeáveis, observa-se a utilização de diferentes tipos de cimento, dentre eles CPII F-40, CP V-ARI e OPC (equivalente aproximado ao CP I brasileiro) PPC (equivale ao CP II), o cimento portland Comum (OPC - Ordinary Portland Cement) tem sua origem no Reino Unido (Inglaterra), onde foi patenteado em 1824 por Joseph Aspdin. Por sua vez, o Cimento Portland Pozolânico (PPC - Portland Pozzolana Cement) é uma evolução do OPC. O conceito de utilizar materiais pozolânicos, que é a base do PPC, remonta à Roma Antiga, mas o PPC moderno é um produto padronizado internacionalmente, resultado da adição de pozolanas ao OPC. selecionados conforme as exigências experimentais de cada pesquisa, os percentuais de substituição por metacaulim variaram entre 5% e 20%, com destaque para os teores de 5%, 10% e 15%, que foram os mais frequentemente empregados, evidenciando o interesse dos autores em compreender a evolução do comportamento mecânico e hidráulico do material frente ao aumento progressivo da adição pozolânica no concreto permeável.

No que se refere à granulometria dos agregados graúdos, foram identificados diâmetros máximos característicos (D<sub>máx</sub>) de 6,3 mm, 9,5 mm e 12,5 mm e 20mm. O D<sub>máx</sub> de 9,5 mm aparece como o mais recorrente nos estudos, enquanto o valor de 20 mm representa o maior diâmetro adotado, favorecendo maior conectividade de vazios e,

consequentemente, uma estrutura mais permeável. Agregados com  $D_{m\acute{a}x}$  de 6,3 mm e 9,5 mm possibilitaram analisar misturas com granulometria mais fina, influenciando diretamente a distribuição de poros e o equilíbrio entre resistência e capacidade de infiltração.(BATEZINI 2013).

Quanto à natureza dos agregados, verificou-se o emprego de rochas basálticas, micaxisto e calcário. A rocha basáltica foi a mais presente entre as composições avaliadas, utilizada sobretudo nas formulações com CPlI F-40, enquanto o micaxisto e caulino contribuíram para estudos que investigaram o impacto da mineralogia no comportamento estrutural e hidráulico do concreto permeável.

O Quadro 7 organiza de maneira integrada os tipos de cimento empregados, os percentuais de substituição por CBCA, a mineralogia dos agregados e os valores de diâmetro máximo característico utilizados nos estudos de concretos permeáveis produzidos com cinzas da cana de açúcar.

**Quadro 7 - Parâmetro de dosagem com CBCA no concreto permeável**

Autor	Tipo de Cimento	Tipo de rocha e $D_{m\acute{a}x}$ do agregado graúdo	Percentuais de substituição utilizados da adição
Silva et al. (2021)	CP II-F 32	Basáltica, 9,5 mm	10%, 15%, 25%
Bazzan et al. (2024)	CPI	Cascalho 12mm e 9,5mm	2%, 4%, 6%
Fontes et al. (2022)	CP V-ARI	Basáltico 12,5mm	5%, 10%

Fonte: Elaborado pelo o próprio autor (2025)

A análise dos estudos que investigaram a aplicação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) em concretos permeáveis evidencia a utilização de diferentes tipos de cimento, incluindo CP II-F 32, CPI e CP V-ARI. Esses ligantes foram selecionados conforme os objetivos das pesquisas, abrangendo desde avaliações de propriedades mecânicas até estudos sobre o comportamento hidráulico das misturas em função da adição da CBCA. Os percentuais de substituição adotados variaram entre 2% e 25%, com maior recorrência dos teores de 5%, 10% e 15%, refletindo o interesse em compreender o impacto progressivo da cinza nas características físico-mecânicas e na estrutura porosa do concreto permeável.

No que diz respeito à granulometria dos agregados, observou-se a utilização de diâmetros máximos característicos ( $D_{m\acute{a}x}$ ) de 9,5 mm, 12 mm e 12,5 mm. Entre esses, o  $D_{m\acute{a}x}$  de 12,5 mm representa o maior valor identificado, sendo empregado em composições com CP V-ARI e contribuindo para a formação de vazios mais amplos e interconectados. Já o

D<sub>máx</sub> de 9,5 mm aparece em mais de uma formulação, mostrando-se o mais frequente entre os estudos. A variação granulométrica utilizada nos trabalhos permite avaliar a influência do tamanho dos agregados na permeabilidade e na estabilidade estrutural das misturas contendo CBCA.

Quanto à natureza dos agregados, foram utilizados materiais basálticos e cascalho (seixo rolado). A rocha basáltica foi a mais recorrente entre os estudos, atribuída à sua elevada resistência e ampla disponibilidade, enquanto o cascalho proporcionou a análise de misturas com características granulométricas alternativas, permitindo investigar diferenças no arranjo dos vazios e no comportamento hidráulico do concreto.

As análises das propriedades mecânicas e permeabilidade à água serão analisadas e discutidas no item 4.1.

#### 4.1. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM SÍLICA ATIVA

Na Tabela 1 são analisados os resultados obtidos para o concreto permeável quando o cimento Portland é parcialmente substituído por sílica ativa, considerando-se principalmente o comportamento mecânico e a permeabilidade à água das misturas.

**Tabela 1** - Propriedades mecânicas dos concretos permeáveis produzidos com adições de sílica ativa em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Substituição	Traço (cimento: Agregado gráudo)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão (MPa)	Permeabilidade (mm/s)
Gagliardo (2021)	10%	1:3 1:3,5 1:4	9,47 7,76 6,90	2,83 1,70 1,61	Não avaliado
Santana (2024)	10%	1:4,6	15,96	2,00	4,09
Costas et al. (2019)	8%	1:4(0,26) 1:4(0,30)	21,2 ≈17	3,08 1,92	7,6 8,9
Andrade et. al (2019)	10%	1:3,5	23,4	Não avaliado	3,1

Andrade et. al (2019)	5%	-	Menor que a referência (pasta)	Não avaliado	Não avaliado em concreto
Andrade et. al (2019)	15%	-	Não utilizado em concreto	Não avaliado	Não avaliado em concreto
Liu, H et. al (2018)	3%	1:3,1	23,6	4,91	3,85
Liu, H et. al (2018)	6%	1:3,1	24,8	5,09	3,93
Liu, H et. al (2018)	9%	1:3,1	25,3	5,19	3,79
Liu, H et. al (2018)	12%	1:3,1	25,3	5,20	3,82

Fonte: Elaborado pelo o próprio autor (2025)

Os resultados obtidos por Gagliardo (2021), referentes aos ensaios de resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) e resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) dos três traços avaliados, mostram que o traço 1:3 apresentou os maiores valores médios, enquanto os traços 1:3,5 e 1:4 mostraram reduções proporcionais de resistência, acompanhando o aumento da porosidade.

A redução das resistências à compressão ( $f_{ck}$ ) e à tração na compressão diametral ( $f_{ct}$ ) observada nos traços mais pobres (1:3,5 e 1:4) está diretamente associada ao aumento da porosidade da argamassa. Os poros atuam como descontinuidades na matriz, comprometendo a seção resistente devido ao aumento de vazios e funcionando como pontos de concentração de tensões, o que favorece a nucleação e a propagação de fissuras até a ruptura.

Do ponto de vista teórico, o incremento da porosidade resulta da elevação da relação água/cimento ( $a/c$ ). O excesso de água presente na mistura evapora ao longo do processo de cura, deixando para trás maior volume de poros capilares. Essa condição enfraquece a matriz cimentícia e confirma o princípio segundo o qual a resistência mecânica é inversamente proporcional ao nível de porosidade do material.

A mistura de concreto permeável de referência, otimizada com a adição de 10% de sílica ativa em relação à massa do cimento (Santana et al., 2024), demonstrou um desempenho que satisfaz os requisitos normativos para aplicação em pavimentação. Aos 28 dias de cura, esta mistura apresentou uma massa específica seca de 1963,04 kg/m<sup>3</sup>, estando em

conformidade com a faixa recomendada pela NBR 16416 (ABNT, 2015) ( $1600 \text{ kg/m}^3$  a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ). O índice de vazios obtido foi de 28,82 %, superando o mínimo de 15% necessário para concreto permeável.

Em relação à permeabilidade alcançado foi de 4,09 mm/s. Este valor é significativamente superior ao mínimo de 1 mm/s recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

No que concerne às propriedades mecânicas, a amostra de referência registou a maior resistência à compressão axial do estudo, atingindo uma resistência média de 15,96 MPa. Os resultados apresentados foram de 2,00 MPa para a tração por compressão diametral e 4,09 MPa para a flexão a três pontos. Adicionalmente, o módulo de elasticidade estático foi calculado em 13.570 MPa, valor próximo aos observados na literatura para concreto permeável.

A aplicação de adições minerais altamente reativas, como a sílica ativa (SA), em concretos permeáveis tem sido investigada como uma estratégia eficiente para compensar a inerente redução da resistência mecânica causada pela elevada porosidade destes materiais.

A incorporação de sílica ativa apresentou efeitos distintos nas propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas avaliadas. O traço 1:4/0.26, composto por 8% de sílica ativa e relação a/c 0,26, obteve os maiores valores de resistência, atingindo  $f_{cm} = 21,2 \text{ MPa}$  e  $f_{t,f} = 3,08 \text{ MPa}$ , correspondendo a um aumento de aproximadamente 33% em relação ao traço de referência (2,15 MPa).

A análise microscópica desse traço evidenciou menor presença de fissuras na pasta, indicando uma matriz mais consolidada em comparação ao seu respectivo controle.

Para a relação a/c 0,30, o traço 1:4/0.30 não apresentou melhoria de desempenho, registrando resistência média à compressão  $\approx 17 \text{ MPa}$  e  $f_{t,f} = 1,92 \text{ MPa}$ , valores inferiores aos do traço de referência ( $\approx 18 \text{ MPa}$ ).

Quanto à permeabilidade, ambos os traços com sílica ativa mantiveram coeficientes elevados, com  $K = 0,76 \text{ cm/s}$  (1:4/0.26) e  $K = 0,89 \text{ cm/s}$  (1:4/0.30), atendendo ao limite mínimo da NBR 16416 (2015).

O estudo conduzido por Andrade et. al., 2019 iniciou com uma fase experimental dedicada à determinação do melhor teor para as adições. Os autores produziram pastas de cimento Portland com teores de sílica ativa em substituição parcial ao cimento de 5%, 10% e 15%. O critério para a seleção do teor a ser utilizado no concreto permeável foi o que apresentasse os maiores resultados de resistência à compressão aos 28 dias nas pastas.

Os resultados dessa avaliação inicial foram decisivos: as pastas que receberam a adição de 5% de sílica ativa apresentaram resistência à compressão menor que a pasta de referência. Já os teores de 10% e 15% foram superiores ao de 5%, porém o teor de 10% apresentou os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias, sendo, por isso, o teor escolhido para a confecção dos corpos de prova de concreto permeável. O teor de 15%, apesar de testado na etapa de pastas, não foi selecionado por não superar o desempenho obtido com 10%. Com o teor de 10% de sílica estabelecido, o concreto permeável foi produzido com o objetivo de densificar a matriz cimentícia por meio da reação pozolânica. Com o teor de 10% de sílica estabelecido, o concreto permeável foi produzido com o objetivo de densificar a matriz cimentícia por meio da reação pozolânica.

Os resultados finais no concreto permeável confirmaram a superioridade desta dosagem. Em termos de resistência à compressão, o traço SA10% alcançou 23,4 MPa aos 28 dias, superando significativamente o traço de referência (17,6 MPa). Este desempenho representa um ganho de resistência de 33% em comparação com a mistura sem adições.

Relativamente à durabilidade, o ensaio de desgaste por abrasão confirmou a melhoria das propriedades mecânicas. O traço SA10% registou uma perda de massa de apenas 3,33%, o que é um dos menores valores observados no estudo, contrastando com a perda de 5,39% do traço de referência.

Quanto à permeabilidade, o coeficiente (K) obtido para o concreto com sílica ativa foi de 3,1mm/s valor que mantém um desempenho de drenagem elevado e está em conformidade com o valor mínimo estabelecido pela norma ACI PRC-522-23. Assim, a sílica ativa no teor de 10% influencia de forma relevante as propriedades avaliadas, permitindo obter pavimentos de concreto permeável com resistência adequada sem comprometer a sua função principal de drenagem.

O estudo conduzido por Liu et. al (2019) avaliou a influência de sílica (SF) como um material cimentício suplementar na matriz. A SF, um resíduo da produção da sílica, foi incorporada por substituição parcial do cimento portland com percentuais de 3%, 6%, 9% e 12%.

A resistência à compressão aumentou progressivamente com o teor crescente de SF, atingindo o valor máximo de 25,3 MPa nas misturas com 9% e 12% de SF. Em comparação com o referencial (0% SF), 22,2 MPa, isto representou uma melhoria máxima de 14%. De forma análoga, a resistência à flexão também demonstrou um efeito positivo, atingindo o valor máximo de 5,20 MPa (no teor de 12% SF), o que constitui uma melhoria de 7,4% em relação à referência (4,84 MPa).

Em relação às propriedades de permeabilidade, os resultados confirmaram que a metodologia de substituição por volume equivalente foi crucial. Como a adição de fumo de sílica não causou alteração no volume do material, as propriedades de permeabilidade alteraram-se pouco. A porosidade efetiva variou ligeiramente entre 13,4% e 14,5%, e o Coeficiente de Permeabilidade (K) de todas as misturas permaneceu aproximadamente constante, em torno de 3,8 mm/s.

#### 4.2. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM METACAULIM.

Na Tabela 5 são analisados os resultados obtidos para o concreto permeável quando o cimento Portland é parcialmente substituído por metacaulim, considerando-se principalmente o comportamento mecânico e a permeabilidade das misturas.

**Tabela 2-** Propriedades mecânicas do concreto permeável produzidos com adições de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland.

<b>Autor</b>	<b>Substituição</b>	<b>Traço (cimento:Agregado graúdo</b>	<b>Resistência à compressão axial (MPa)</b>	<b>Resistência à tração por compressão (MPa)</b>	<b>Permeabilidade (mm/s)</b>
Ferreira et. al (2024)	5%	1:3,35	18,09	2,73	5,07
Andrade et. al (2019)	5%	-	Menor que a referência (pasta)	Não avaliada em concreto	Não avaliada em concreto
Singh S, B et al (2022)	5%		29,76	3,67	7,83
Ferreira et. al (2024)	10%	1:3,35	13,78	2,63	4,18
Andrade et. al (2019)	10%	1:3,5	24,8	Não avaliado	3,7
Supit et al (2019)	10%	1:2:0,3	23,1	Não avaliado	6,36
Singh S, B et al (2022)	10%		33,07	3,92	7,02

Ferreira et. al (2024)	15%	1:3,35	15,98	2,18	2,82
Andrade et. al (2019)	15%	-	Não utilizado em concreto	Não avaliada em concreto	Não avaliado em concreto
Singh S, B. et al (2022)	15%		41,44	4,23	6,79
Singh S, B. et al (2022)	20%		37,10	4,23	6,42

Fonte: Elaborado pelo o próprio autor (2025)

Andrade et. al (2019) avaliou a adição de metacaulim com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico do material. O programa experimental foi testado em 5%, 10% e 15% em pastas do cimento portland.

Os resultados indicaram que os teores de 5% e 15% resultaram em resistência à compressão menor que o teor de de 10%, por apresentar os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias nas pastas, o teor de 10% foi escolhido para a confecção do concreto permeável. O traço base de concreto selecionado foi 1:3,5, que apresentou a maior resistência à compressão 17,6 MPa entre os traços que satisfizeram o requisito de permeabilidade mínima da norma ACI PRC-522-23.

Quando aplicado ao concreto permeável no teor de 10%, o metacaulim demonstrou um impacto significativo na capacidade de carga do material. O traço MK10% registrou 24,8 MPa aos 28 dias, o que representa a maior resistência à compressão obtida no estudo, proporcionando um ganho de 40,1% em relação ao traço de referência 17,6 MPa, simultaneamente, o MK10% manteve a funcionalidade de drenagem, essencial para pavimentos permeáveis. O coeficiente de permeabilidade (K) obtido foi de 3,7 mm/s, o qual está em conformidade com o valor mínimo de 1,40 mm/s estabelecido pela norma ACI PRC-522--23. Desta forma, este estudo demonstrou o grande potencial do metacaulim para produzir concretos permeáveis com resistência adequada sem comprometer a sua principal função de drenagem.

O estudo de Ferreira et. al (2024) teve como objetivo verificar a influência da substituição parcial do cimento por metacaulim (MK) nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos concretos permeáveis.

O estudo comparou quatro misturas: uma referência (0% de metacaulim) e substituições parciais, em massa, do cimento por metacaulim nos teores de 5%, 10% e 15%.

Para a produção, utilizou-se um traço fixo de 1:3,35, e o consumo de materiais por traço incluiu 80,00 Kg de agregado. O teor de água foi ajustado para manter um comportamento reológico similar da pasta cimentícia em todas as misturas, comprovado por ensaios de squeeze-flow.

Os resultados obtidos nos ensaios aos 28 dias demonstram que o teor de 5% de metacaulim alcançou os melhores resultados em todas as propriedades principais. A resistência à compressão axial ( $f_c$ ) da mistura 5% MET atingiu 18,09 MPa, o que representou um aumento de cerca de 7,36% em comparação com a mistura referência (16,85 MPa). Todos os resultados de ( $f_c$ ) ficaram acima dos mínimos normativos. A análise de variância (ANOVA) confirmou que a substituição de cimento por metacaulim influencia significativamente a resistência à compressão axial.

Relativamente à resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct}$ ), a mistura 5% MET obteve 2,73 MPa, um aumento de cerca de 5,00% em relação à referência (2,60 MPa). O teor de 10% MET também resultou num pequeno acréscimo de resistência (2,63 MPa). A substituição demonstrou ter uma influência significativa na resistência à tração.

O Coeficiente de Permeabilidade ( $k$ ) da mistura 5% MET foi o mais elevado, registrando 0,00507 m/s, o que representa um aumento de cerca de 58,93% em relação à Referência (3,19 mm/s)

Em relação à espessura de pasta, observou-se que os menores valores de espessura de pasta originaram as maiores resistências à compressão axial. A mistura 5% MET destacou-se por apresentar o maior valor para o coeficiente de permeabilidade e o menor valor médio para a espessura de pasta nas seções transversais. A espessura de pasta e a densidade parcial apresentaram uma excelente relação ( $R^2=0,97$ ), embora a variação não fosse linear ao longo da altura do corpo de prova

A pesquisa concluiu que a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim na proporção de 5% influenciou positivamente as propriedades mecânicas e a espessura de pasta aderida ao agregado graúdo. Em contraste, a substituição de 10% MET resultou em deterioração na maioria das propriedades mecânicas, e o teor de 15% MET se mostrou inviável. A otimização com 5% de metacaulim permitiu o maior coeficiente de permeabilidade e o maior percentual de resistência mecânica (compressão e tração).

O estudo realizado por Supit e Pandei (2019) investigou os efeitos da adição de metacaulim (MK) como substituição parcial do cimento no concreto permeável. A pesquisa buscou avaliar as propriedades de resistência à compressão, índice de vazios e permeabilidade

do material, utilizando 10% de Metacaulim em substituição ao Cimento Portland Composto (PCC), em uma mistura com relação agregado/cimento de 2 e relação água/cimento de 0,3.

Os resultados demonstram que a incorporação de 10% de metacaulim (MK), juntamente com 1% de superplastificante, promoveu um aumento significativo na resistência à compressão do concreto permeável. Aos 28 dias de idade, a resistência atingiu 25,3 MPa, um valor consideravelmente superior em comparação com o concreto PCC de referência.

Em relação às propriedades de permeabilidade, a adição de 10% de metacaulim resultou em uma redução na taxa de infiltração. A taxa de infiltração diminuiu de 12,73 mm/s para 6,36 mm/s. Essa redução na permeabilidade é causada pelo efeito *filler* do metacaulim, que preenche os poros e lacunas entre os agregados, aumentando a espessura da pasta e adensando a matriz, o que conseqüentemente diminui a velocidade de passagem da água.

Contudo, a mistura com 10% MK manteve um alto índice de vazios contínuos (17%), indicando que a característica principal de drenagem do concreto permeável foi preservada de forma funcional, apesar da redução da taxa de fluxo.

O estudo realizado por Singh et al (2022) avaliou o impacto da incorporação de metacaulim (MK) como substituição parcial do cimento nas propriedades do concreto permeável, considerando também o efeito de dois tamanhos de agregado graúdo: 12,5 mm e 20 mm. Os autores constataram que o aumento do diâmetro do agregado, como no caso do agregado de 20 mm, eleva a porosidade e a permeabilidade do concreto, porém reduz significativamente as resistências mecânicas. Dessa forma, o agregado de 12,5 mm demonstrou melhor desempenho estrutural, proporcionando um equilíbrio mais favorável entre resistência e propriedades hidráulicas.

A mistura considerada ótima, composta pelo agregado de 12,5 mm e 15% de metacaulim, apresentou as melhores respostas mecânicas. Em termos de resistência à compressão, o concreto permeável atingiu 41,44 MPa, representando um aumento de 39,25% em relação à mistura convencional de 12,5 mm sem adição de metacaulim. Este valor é expressivo, visto que concretos permeáveis são geralmente projetados para operar com resistências na faixa de 2 a 28 MPa. O ganho observado está associado ao refinamento da microestrutura promovido pelo metacaulim, tanto pelo efeito de preenchimento quanto pela atividade pozolânica. Entretanto, teores superiores a 15% ocasionaram redução da resistência à compressão devido ao excesso de finos no sistema, que prejudica a formação adequada da matriz cimentícia.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, a mistura metacaulim 15% alcançou 4,23 MPa, valor 15,26% superior ao da mistura convencional de 12,5 mm. As falhas

observadas nos ensaios de tração ocorreram predominantemente na zona de transição interfacial (ITZ), refletindo a limitada aderência entre a pasta e os agregados, característica inerente aos concretos permeáveis, que possuem elevado índice de vazios.

A permeabilidade apresentou comportamento diretamente associado ao tamanho do agregado e à quantidade de metacaulim. O agregado de 12,5 mm, por apresentar menor espaçamento entre partículas, resultou em permeabilidades inferiores às obtidas com o agregado de 20 mm. Além disso, o aumento do teor de metacaulim promoveu uma redução linear da permeabilidade, atribuída ao efeito de preenchimento dos poros e ao refinamento microestrutural decorrente das reações pozolânicas. A mistura ótima metacaulim 15% apresentou permeabilidade de 6,79 mm/s, indicando uma redução de 13,28% em relação à mistura convencional. Apesar dessa queda, todas as formulações analisadas atenderam ao valor mínimo de porosidade de 15% recomendado pela ACI 522R-2010, garantindo a funcionalidade hidráulica do concreto permeável.

Desse modo, o diâmetro de 12,5 mm mostrou-se o mais eficiente, por maximizar as propriedades mecânicas sem comprometer a permeabilidade necessária ao funcionamento do concreto permeável. Os resultados confirmam que o tamanho do agregado exerce influência determinante no equilíbrio entre resistência, porosidade e desempenho hidráulico.

#### 4.3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM CINZA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR.

Na Tabela 3 são analisados os resultados obtidos para o concreto permeável quando o cimento Portland é parcialmente substituído por cinza do bagaço da cana de açúcar, considerando-se principalmente o comportamento mecânico e a permeabilidade das misturas.

**Tabela 3** - Propriedades mecânicas do concreto permeável produzidos com adições de cinza do bagaço da cana de açúcar em substituição parcial do cimento Portland

<b>Autor</b>	<b>Substituição</b>	<b>Traço (cimento:Agregado graúdo</b>	<b>Resistência à compressão axial (MPa)</b>	<b>Resistência à tração por compressão (MPa)</b>	<b>Permeabilidade (mm/s)</b>
Silva et al. (2021)	10%	1:5	13,2	Não avaliado	9,2
Silva et al. (2021)	15%	1:5	10,7	Não avaliado	Ligeiramente inferior ao controle (14.9)
Silva et al. (2021)	25%	1:5	9,4	Não avaliado	12,6
Fontes et al. (2022)	5%	1:3/1:4	11,27	Não avaliado	4,3
Fontes et al. (2022)	10%	1:3 /1:4	9,75	Não avaliado	4,1
Bazzan et al. (2024)	2%	Não indentificado	22,99	Avaliado indiretamen te	Avaliado indiretamente
Bazzan et al. (2024)	4%	Não indentificado	21,06	Avaliado indiretamen te	Avaliado indiretamente
Bazzan et al. (2024)	6%	Não indentificado	20,28	Avaliado indiretamen te	Avaliado indiretamente

**Fonte:** Elaborado pelo o próprio autor (2025)

Silva et al. (2021) avaliaram o desempenho do concreto permeável incorporando Cinza de Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA) como substituição parcial do cimento, mantendo a proporção ligante:agregado de 1:5,0.

Na resistência à compressão aos 28 dias, o controle (0% CBCA) apresentou 10,6 MPa.

A substituição por 10% de CBCA mostrou o melhor resultado, alcançando 13,2 MPa, devido ao refinamento da microestrutura provocado pela reação pozolânica e pelo efeito de preenchimento das cinzas.

Quando utilizada em 15%, a CBCA gerou uma resistência praticamente igual ao traço de controle (10,7 MPa). Já a substituição em 25% reduziu a resistência para 9,4 MPa, resultado esperado por causa da menor quantidade de cimento ativo na mistura.

Quanto à permeabilidade, todas as misturas ficaram acima do mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015) (1,0 mm/s), sendo adequadas para pavimentos permeáveis. O controle apresentou o maior valor (14,9 mm/s). Com 10% de CBCA, a infiltração de água reduziu para 9,2 mm/s, devido ao aumento de densidade da mistura.

A substituição em 25% resultou em 12,6 mm/s, um pequeno aumento em relação aos 10%. Já para 15% de CBCA, embora o estudo não forneça o valor exato, foi relatado que a permeabilidade é ligeiramente inferior à do controle, mas ainda dentro do desempenho aceitável.

Fontes (2023), avaliou o desempenho do concreto permeável com e sem a substituição parcial do cimento por Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBCA). O estudo analisou os traços de referência e as misturas contendo 5% e 10% de CBCA, com foco nas propriedades de resistência à compressão axial e permeabilidade, fundamentais para o desempenho do pavimento.

Na resistência à compressão aos 28 dias, o traço 1:3 (referência, sem cinza) apresentou o melhor resultado, com 11,68 MPa. Já as misturas com cinza registraram valores inferiores: 11,27 MPa (CBCA 5%) e 9,75 MPa (CBCA 10%), representando uma variação de 16,5% entre o maior e o menor valor. Embora estes resultados estejam dentro da faixa reportada na literatura para concreto permeável (2,8–28 MPa), eles permanecem abaixo do mínimo de 20 MPa exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015) para estruturas de pavimentação permeável. Assim, sua aplicação é recomendada para tráfego leve, como calçadas e ciclovias. O traço 1:4 obteve apenas 5,10 MPa, resultado atribuído à baixa trabalhabilidade, que dificultou a compactação durante a moldagem. A autora menciona que adições minerais como a CBCA podem melhorar o desempenho mecânico, sugerindo que trabalhos futuros incluam ensaios de flexão e tração em placas.

Quanto ao coeficiente de permeabilidade, todas as misturas avaliadas atenderam ao mínimo exigido pela NBR 16416 ( $\geq 1 \times 10^{-3}$  m/s). O traço de referência apresentou o maior valor (4,3 mm/s). Já as misturas com CBCA apresentaram permeabilidades menores: 4,1 mm/s (CBCA 5%) e  $3,6 \times 10^{-3}$  m/s (CBCA 10%), indicando que a cinza reduz os vazios do concreto, comportamento esperado devido ao efeito de preenchimento. O ensaio de permeabilidade não foi realizado no traço 1:4.

Em síntese, o uso da CBCA mostrou-se promissor para concreto permeável destinado a tráfego leve, pois, embora reduza moderadamente a resistência e a permeabilidade, os valores obtidos continuam compatíveis com a literatura e com a norma para esse tipo de aplicação.

O estudo conduzido por Bazan et al (2024) visou avaliar o impacto da incorporação da Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBCA), considerado um material pozolânico devido ao seu alto teor de sílica e alumínio, nas propriedades do concreto permeável. O principal objetivo mecânico do ensaio era garantir que o concreto mantivesse uma resistência mínima à compressão de 20,58 MPa.

A avaliação da resistência à compressão, efetuada em espécimes submetidos a um período de cura de 28 dias, demonstrou resultados variáveis em função da percentagem de CBCA adicionada. A amostra padrão (0% de CBCA) alcançou uma resistência média de 21,40 MPa. A mistura mais eficiente foi a que incorporou 2% de CBCA, atingindo a resistência máxima de 22,99 MPa, superando a resistência da amostra padrão e confirmando que a adição em baixas porcentagens melhora as propriedades mecânicas do concreto poroso. Contudo, o estudo estabeleceu uma relação inversa entre a quantidade de CBCA e a resistência: à medida que a incorporação do aditivo pozolânico aumenta, a resistência diminui. Isso é evidenciado pelas misturas de 4% de CBCA, que obtiveram 21,06 MPa e 6% de CBCA, que alcançaram 20,28 MPa.

A amostra de 6% ficou ligeiramente abaixo da resistência mínima de 20,58 MPa requerida. Esta redução na resistência em percentagens elevadas é atribuída ao baixo teor do elemento Sódio (Na) na composição química da CBCA, que afeta negativamente as propriedades mecânicas a partir do dia 21 de cura.

Em relação à permeabilidade, embora os autores não tenham reportado numericamente o coeficiente de permeabilidade (K) para as misturas específicas, esta propriedade foi avaliada indiretamente. O estudo identificou que a amostra padrão e a amostra com 2% de CBCA apresentavam o mesmo tamanho de poros, o que sugere que a capacidade de filtração essencial do concreto permeável não foi afetada negativamente pela adição ideal de CBCA. No entanto, nas percentagens mais elevadas (4% e 6% de CBCA), observou-se um aumento no tamanho dos poros, chegando a uma abertura de 3,45 mm. A norma ACI522R-10 indica que o Concreto permeável deve tipicamente apresentar uma permeabilidade à água na faixa de 0,135 cm/s a 1,21 cm/s. Os valores numéricos da resistência à tração por compressão para as amostras testadas também não foram reportados no estudo. Conclui-se que a CBCA a 2% otimiza a resistência à compressão mantendo a estrutura porosa do concreto.

A tabela 4 - Analisa cada adição pozolana (Sílica Ativa, Metacaulim e Cinza do bagaço da cana de açúcar) evidenciando os teores que geraram maior eficiência mecânica e hidráulica, conforme a NBR 16416 2015, o material deve apresentar resistência à compressão mínima de 20 MPa e permeabilidade igual ou superior a 1 mm/s.

**Tabela 4 -** Melhores Valores Obtidos para Propriedades de Concretos Permeáveis com Adições Minerais

Adição Mineral	Propriedade Avaliada	Melhor Desempenho	Percentual do Teor Utilizado	Referência
Sílica Ativa (SA)	Resistência à Compressão Axial (fck)	25,3 MPa	9% ou 12%	Liu, H et. al (2018)
Sílica Ativa (SA)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (fct/fcd)	5,20 MPa	12%	Liu, H et. al (2018)
Sílica Ativa (SA)	Permeabilidade (K)	4,09 mm/s	10%	Santana (2024)
Metacaulim (MK)	Resistência à Compressão Axial (fck)	41,44 MPa	15%	Singh S, B. et al (2022)
Metacaulim (MK)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (fct/fcd)	4,23 MPa	15% ou 20%	Singh S, B. et al (2022)
Metacaulim (MK)	Permeabilidade (K)	7,83 mm/s	5%	Singh S, B et al (2022)
Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA)	Resistência à Compressão Axial (fck)	22,99 MPa	2%	Bazzan et al. (2024)
Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA)	Permeabilidade (K)	12,6 mm/s	25%	Silva et al. (2021)

**Fonte:** Elaborado pelo o próprio autor (2025)

No caso da Sílica Ativa, observou-se desempenho mecânico significativamente superior devido à sua elevada reatividade e granulometria ultrafina. O maior valor de resistência à compressão observado, 25,3 MPa, foi alcançado tanto com 9% quanto com 12%

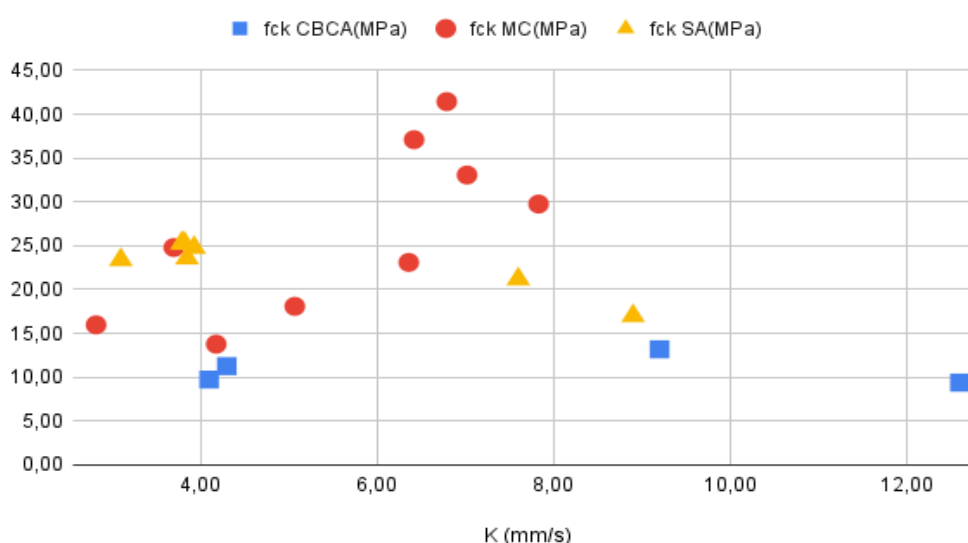
de substituição do cimento. A resistência à tração por compressão diametral atingiu 5,20 MPa com 12% de SA, reforçando sua contribuição para o comportamento tensional do material.

Quanto à permeabilidade, embora a SA promova maior densificação da matriz, os concretos mantiveram desempenho hidráulico elevado, com destaque para o valor máximo relatado de 8,9 mm/s utilizando 8% de sílica ativa, mas sem comprometer a constatação de que os resultados superaram com folga o valor mínimo normativo.

O Metacaulim foi a adição que mais se destacou quanto ao ganho de resistência, atingindo 41,44 MPa com 15% de substituição, valor bastante superior às exigências normativas e aos demais materiais analisados. A resistência à tração por compressão também apresentou desempenho significativo, alcançando 4,23 MPa tanto com 15% quanto com 20% de MK. Como esperado, a permeabilidade reduziu-se em função do efeito filler, sendo o melhor valor, 7,83 mm/s, obtido com 5%, embora todos os teores tenham permanecido adequados para o uso em pavimentação permeável.

Por fim, a Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar demonstrou comportamento eficiente mesmo em baixos teores, uma vez que o maior valor de resistência à compressão, 22,99 MPa, foi registrado com apenas 2% de adição. Já a permeabilidade atingiu seu valor mais alto, 12,6 mm/s, com 25% de CBCA. Assim como o MK, essa adição tende a reduzir a porosidade efetiva, mas os resultados permaneceram acima do limite mínimo exigido pela NBR 16416 2015. Dessa forma, a análise global evidencia que todas as adições avaliadas demonstraram capacidade de potencializar o desempenho do concreto permeável, cada uma com características particulares de otimização mecânica e hidráulica.

**Figura 2** - A correlação entre os valores de permeabilidade (K) e resistência à compressão (fck) dos concretos produzidos com CBCA, metacaulim e sílica ativa. (Fonte: própria 2025)



A análise dos dados de resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) e permeabilidade ( $K$ ) mostra comportamentos diferentes para os concretos produzidos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), metacaulim (MC) e sílica ativa (SA). No caso do CBCA, os valores de  $K$  foram os mais altos, variando de 4,10 a 12,60 mm/s, enquanto a resistência ficou entre 9,40 e 13,20 MPa. Isso indica um concreto mais poroso, já que, quanto maior a permeabilidade, menor tende a ser o  $f_{ck}$ . Essa característica está ligada à menor reatividade e maior variabilidade da cinza, o que resulta em uma matriz menos densa.

O concreto com metacaulim apresentou o melhor desempenho entre todas as misturas. A resistência variou de 13,78 até 41,44 MPa, e a permeabilidade ficou entre 2,82 e 7,83 mm/s. Ficou clara a tendência de que valores menores de  $K$  geram maiores resistências, mostrando que o metacaulim contribui para uma matriz mais compacta e com menos vazios devido à sua alta reatividade pozzolânica.

A sílica ativa apresentou resultados intermediários. A resistência ficou entre 17,00 e 25,30 MPa, com valores de permeabilidade entre 3,10 e 8,90 mm/s. Apesar de não atingir os maiores  $f_{ck}$  observados no grupo com metacaulim, a SA ainda proporcionou bom desempenho, reduzindo a porosidade do concreto graças à sua elevada finura.

De modo geral, a comparação entre os materiais mostra que o metacaulim alcançou os melhores resultados (maior  $f_{ck}$  e menor  $K$ ), seguido pela sílica ativa, enquanto o CBCA apresentou o comportamento menos favorável. Além disso, observou-se que a relação entre  $f_{ck}$  e  $K$  é inversa: quanto menor a permeabilidade, maior é a resistência. Isso confirma que o controle da porosidade é determinante para o desempenho mecânico dos concretos avaliados.

## 5. CONCLUSÃO

O concreto permeável destaca-se como uma solução sustentável para mitigar os impactos da impermeabilização urbana, contribuindo para a drenagem adequada, redução de enchentes e melhoria das condições ambientais nas cidades. A análise realizada evidenciou que as adições pozolânicas desempenham papel importante na otimização das propriedades mecânicas e hidráulicas do material, tornando sua aplicação ainda mais eficiente em termos técnicos e ambientais.

Constatou-se que a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas é viável e eficaz. Por exemplo, o teor de 9% quanto com 12% de sílica ativa e o teor de 15% de metacaulim demonstraram a superioridade das dosagens, com ganhos significativos na resistência à compressão (25,3 MPa e 41,44 MPa), respectivamente, no estudo de Liu, H et. al, 2018 e Singh S, B. et al (2022) e manutenção da funcionalidade de drenagem. Da mesma forma, a Cinza de Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA), em baixas porcentagens (2% e 10%), otimizou a resistência e manteve a permeabilidade acima dos requisitos normativos. Os resultados obtidos, ao confirmarem a viabilidade do uso dessas adições, validaram o alcance dos objetivos técnicos e ambientais propostos para o estudo.

De maneira geral, observou-se que cada adição se destaca por características específicas: a sílica ativa apresentou elevado potencial de melhoria mecânica em baixos teores; o metacaulim demonstrou desempenho crescente associado à sua elevada reatividade; e a CBCA contribuiu principalmente para a manutenção ou melhoria da permeabilidade, aspecto essencial para sistemas de pavimentação permeável.

Dessa forma, o estudo confirma que o uso de adições pozolânicas no concreto permeável é uma estratégia eficiente tanto para aprimorar o desempenho do material quanto para reduzir o consumo de cimento Portland, favorecendo práticas construtivas mais sustentáveis.

Sugere-se, para pesquisas futuras, a realização de estudos de durabilidade, comportamento em longo prazo, desempenho de placas submetidas a esforços de tração e flexão e a influência da mineralogia e geometria dos agregados graúdos, ampliando o entendimento das relações entre resistência e permeabilidade em concretos permeáveis modificados.

## REFERÊNCIAS

ABCP. Guia básico de utilização do Cimento Portland. **Boletim técnico, São Paulo, n.106, 2002.**

**ABNT NBR 7211:** Agregados Para Concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 522. **ACI report on pervious concrete.** Farmington Hills, MI: ACI, 2010.

ANJOS, M. A. S. dos; FERREIRA, D. F.; BORJA, E. V. Influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal. **Holos**, ano 28, v. 2, pp. 44-57, 2012.

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 13956-1: Adições minerais para concreto de cimento Portland — Sílica ativa — Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 15894-1: Metacaulim — Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

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 (USP), São Paulo, 2013.

BAZAN HERNANDEZ, J.; ROJAS LLANOS, J. T. **Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre las propiedades mecánicas del hormigón permeable.** 2024. Tesis (Ingeniería Civil) – Universidad Privada del Norte, Cajamarca, 2024.

BONICELLI, A.; ARGUELLERS, G. M.; PUMAREJO, L. G. F. **Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads.** *Procedia Engineering*, [S. l.], v. 161, p. 1568-1573, 2016

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Levantamento/2017. 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: set. 2017.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, p. 82-86, 2009.

**DA SILVA, R. G. et al.** Effect of wastes from sugar cane industry on the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], p. 1–18, 2021.

DELATTE, N. J.; CLEARY, J. **Developing a structural design method for pervious concrete pavement.** Proceedings, National Stone, Sand and Gravel Association. [S. l.], 2006.

FERGUSON, B.K. **Porous Pavements.** New York: Taylor and Francis Group, 2005, 577 p.

**FERREIRA, Ayrton Rodrigues.** *Influência da substituição parcial do cimento Portland por metacaolim nas propriedades mecânicas e na espessura de pasta do concreto permeável.* 2024. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2024.

**FONTES, Rayssa Passos Damasceno.** *Análise do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concreto permeável para pavimentação.* 2023. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

**COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da.** *Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação.* 2019. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. **Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 53, p. 680-691, 2014.

IBGE. **Prévia do Censo Demográfico 2022: Brasil tem 208 milhões de habitantes.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: . Acesso em: 1 de ago. de 2023.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. **Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties.** *Construction and Building Materials*, v.50, 2014, p.524-529.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos.** In: Freire, W. J.; Beraldo, A. L. *Tecnologia e materiais alternativos de construção.* Campinas: UNICAMP, 2003. cap.6, p.145-190.

LIU, Hanbing et al. **Laboratory evaluation of eco-friendly pervious concrete pavement material containing silica fume**

MAGUESVARI, M. U.; NARASIMHA, V. I. **Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications.** *Procedia - Social And Behavioral Sciences*, [s.l.], v. 104, p.198-207, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.112>.

**NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis produzidos com agregado reciclado de concretol.** 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) -- Curso de Pós- 129 graduação em

Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), Campinas, 2017.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.353–357, 2009.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Cardápio energético**. Edição Impressa 30, abril 1998.

SILVA, G. C. G. da. **Estudo experimental do concreto permeável para pavimentação**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019.

SINGH, **Bright**; MURUGAN, **M**. Effect of metakaolin on the properties of pervious concrete. [s. l.], 2022. 20 p.

SUPIT, **Steve W. M.**; PANDEI, **Romario W**. Effects of metakaolin on compressive strength and permeability properties of pervious cement concrete. **Jurnal Teknologi**, Manado, v. 81, n. 5, p. 33–39, 2019.

TRINDADE, A. L. B.; LOPES, P. H. F. **Caracterização de concreto para pavimento permeável baseado em materiais de construção reciclados**. Relatório técnico do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2018.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 62, p. 38–46, 2014.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v.33, 2003, p.381-386