



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

ADELINO DA SILVA CARDOSO

**ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM GEOPOLÍMERO E
INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO**

BELÉM, PA

2025

ADELINO DA SILVA CARDOSO

ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM GEOPOLÍMERO E
INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil, da
Universidade Federal do Pará, como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
engenharia civil

Orientador: Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho
de Oliveira

BELÉM, PA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
(Deve ser impressa no verso na folha de rosto)

<https://www.bcficat.ufpa.br>

ADELINO DA SILVA CARDOSO

ANÁLISE DE BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM GEOPOLÍMERO E
INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em engenharia civil.

Orientador: Dênio Ramam Carvalho de
Oliveira

Data de aprovação: __/__/__

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
UFPA/ITEC

Prof. Dr. Helder Mansur Chaves
UFPA/ITEC

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
UFPA/ITEC

À Deus

RESUMO

CARDOSO, S.A. Análise de blocos de concreto permeável com geopolímero e influência do tamanho do agregado. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2025.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de concretos permeáveis produzidos com ligantes geopoliméricos à base de metacaulim, analisando a influência do tipo de ligante e do tamanho do agregado gráudo nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material. Foram desenvolvidos quatro traços experimentais: dois com cimento Portland composto CP II-F 32 e dois com matriz geopolimérica ativada por solução de hidróxido e silicato de sódio. Os agregados utilizados foram brita zero e brita um, além de 5% de areia fina nos traços convencionais. Os ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e permeabilidade foram conduzidos conforme as normas da ABNT. Os resultados mostraram que os concretos geopoliméricos apresentaram resistência à compressão superior, atingindo 19,2 MPa para o traço com brita zero, enquanto os convencionais não ultrapassaram 6,3 MPa. Em relação à tração diametral, o desempenho dos geopolímeros também foi superior, indicando melhor coesão entre a matriz e o agregado. Quanto à permeabilidade, todos os traços atenderam aos limites estabelecidos pela NBR 16416 ($k > 1$ mm/s), sendo o concreto convencional com brita 1 o que apresentou maior coeficiente de permeabilidade, cerca de 13% superior ao geopolimérico equivalente. Conclui-se que o uso do ligante geopolimérico, além de reduzir o impacto ambiental pela menor emissão de CO₂, proporciona concreto de maior resistência, mantendo a permeabilidade adequada para pavimentos de tráfego leve.

Palavras chave: Concreto permeável; geopolímero, concreto convencional

ABSTRACT

CARDOSO, S.A. Analysis of pervious concrete blocks with geopolymer and influence of aggregate size. Undergraduate Thesis, Civil Engineering Faculty, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil, 2025.

This study aims to evaluate the behavior of pervious concrete produced with metakaolin-based geopolymeric binders, analyzing the influence of the binder type and coarse aggregate size on the mechanical and hydraulic properties of the material. Four experimental mixtures were developed: two using Portland cement CP II-F 32 and two with geopolymeric matrices activated by sodium hydroxide and sodium silicate solutions. The aggregates used were coarse crushed stones of two sizes (b0 and b1), in addition to 5% of fine sand in the conventional mixes. Compressive strength, splitting tensile strength, and permeability tests were conducted according to ABNT standards. The results showed that geopolymeric concretes achieved higher compressive strength, reaching 19.2 MPa for the mix with smaller aggregate, while conventional concretes did not exceed 6.3 MPa. Regarding tensile strength, the geopolymeric mixtures also performed better, indicating improved bonding between the matrix and aggregates. As for permeability, all mixtures met the requirements established by NBR 16416 ($k > 1$ mm/s), with the conventional concrete containing coarse aggregate b1 exhibiting the highest permeability coefficient—about 13% higher than the corresponding geopolymer mixture. It is concluded that the use of geopolymeric binder, in addition to reducing environmental impact through lower CO₂ emissions, provides higher strength concrete while maintaining adequate permeability for light-traffic pavement applications.

Keywords: Pervious concrete; geopolymer; conventional concrete.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Bloco de concreto permeável..... | 2 |
| Figura 2: Estrutura de um pavimento permeável..... | 7 |
| Figura 3: Ensaio de flexão em prisma de PC..... | 8 |
| Figura 4: Reação química de geopolimerização..... | 10 |
| Figura 5: Porosidade aberta, fechada e vazios da pasta..... | 12 |
| Figura 6: Concreto impermeável \times Concreto permeável..... | 13 |
| Figura 7: CPs do traço com relação a/c de 0,45, com poros obstruídos..... | 15 |
| Figura 8: Ruptura à tração indireta e seção de fratura de concreto com duas camadas de compactação..... | 17 |
| Figura 9: Ensaio de consistência..... | 19 |
| Figura 10: Relação da resistência a compressão e substituição de escória..... | 22 |
| Figura 11: Dimensões dos blocos..... | 24 |
| Figura 12: Solução alcalina..... | 26 |
| Figura 13: Concreto convencional e geopolimérico, respectivamente..... | 27 |
| Figura 14: Concreto convencional e geopolimérico, respectivamente..... | 28 |
| Figura 15: Formas utilizadas para moldagem dos CPs..... | 29 |
| Figura 16: CPs antes e depois do ensaio..... | 30 |
| Figura 17: CPs antes e depois do ensaio de tração por compressão..... | 31 |
| Figura 18: Teste de permeabilidade nos blocos confeccionados..... | 32 |
| Figura 19: Resistência a compressão aos 28 dias..... | 34 |
| Figura 20: Resistência a tração por compressão diametral..... | 35 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Distribuição granulométrica do seixo médio..... | 20 |
| Tabela 2: Traço unitário de concreto convencional..... | 25 |
| Tabela 3: Traço unitário de concreto geopolimérico..... | 26 |
| Tabela 4: Traço unitário de concreto geopolimérico..... | 37 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - Instituto Americano de Concreto

ASTM - American Society for Testing and Materials

CP - Corpo de Prova

a/c - Relação água e cimento

K - Coeficiente de Permeabilidade

CPC- Concreto permeável de cimento

CPG- Concreto permeável de geopolímero

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. | REVISÃO DA LITERATURA | 6 |
| 2.1. | CONCRETO PERMEÁVEL | 6 |
| 2.2. | CONCRETO GEOPOLIMÉRICO | 9 |
| 2.3. | POROSIDADE | 11 |
| 2.4. | PERMEABILIDADE | 12 |
| 2.5. | TRABALHOS REALIZADOS | 14 |
| 2.5.1 | <i>Höltz (2011)</i> | 14 |
| 2.5.2 | <i>Mikami (2022)</i> | 16 |
| 2.5.3 | <i>Ryu et al. (2013)</i> | 19 |
| 2.5.4 | <i>Silva (2025)</i> | 22 |
| 3. | PROGRAMA EXPERIMENTAL | 24 |
| 3.1. | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 24 |
| 3.2. | MATERIAIS..... | 24 |
| 3.2.1. | <i>Concreto permeável convencional</i> | 25 |
| 3.2.2. | <i>Concreto permeável geopolimérico</i> | 25 |
| 3.3. | ENSAIOS REALIZADOS..... | 28 |
| 3.3.1. | <i>Caracterização dos materiais</i> | 28 |
| 3.3.2. | <i>Compressão axial</i> | 28 |
| 3.3.3. | <i>Tração por compressão diametral</i> | 30 |
| 3.3.4 | <i>Ensaio de permeabilidade</i> | 31 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 33 |
| 4.1 | <i>Desempenho mecânico</i> | 33 |
| 4.2. | DESEMPENHO HIDRÁULICO | 36 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 38 |
| 5.1. | CONSIDERAÇÕES..... | 38 |
| 5.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 39 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 41 |

1. INTRODUÇÃO

O avanço das cidades e o crescimento acelerado das populações urbanas vêm provocando intensas transformações no meio ambiente. O processo de urbanização, quando não acompanhado por políticas de infraestrutura adequadas, tem causado graves impactos nos sistemas naturais de drenagem, resultando em enchentes e inundações recorrentes. A substituição de superfícies naturais permeáveis por materiais impermeáveis, como concreto e asfalto, reduz drasticamente a infiltração da água no solo e eleva o volume de escoamento superficial (Chandrappa; Biligiri, 2016; Tucci, 2002; Yang; Giang, 2003). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de adotar soluções construtivas que conciliem desenvolvimento urbano e sustentabilidade ambiental. Os pavimentos de concreto permeável surgem como uma alternativa viável, uma vez que permitem a infiltração da água no subsolo, contribuindo para o controle de alagamentos e a recarga do lençol freático.

Além disso, sua aplicação reduz o aquecimento superficial e auxilia na gestão das águas pluviais em áreas urbanizadas (Haselbach *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2019). Sob essa perspectiva, as tecnologias de drenagem alternativa ganham destaque, sendo o concreto permeável uma das mais promissoras. A Figura 1 ilustra a diferença entre um bloco de concreto convencional e outro permeável, destacando a maior abertura dos vazios e o caminho interconectado dos poros que permitem a passagem da água. A correta seleção e dosagem dos materiais são fundamentais para evitar poros excessivamente grandes que possam comprometer a resistência e a durabilidade do material. Haselbach *et al.* (2006) definem esse sistema como uma superfície que reduz a poluição difusa e permite que parte da chuva se infiltre no solo. Segundo Li *et al.* (2019), o concreto permeável também possibilita a percolação de ar e água, proporcionando rápida filtração e renovação dos recursos subterrâneos.

Figura 1: Bloco de concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Simões *et al.* (2023).

O uso desse tipo de pavimentação é classificado como uma tecnologia de baixo impacto ambiental ou sistema de drenagem verde. Diferentemente das infraestruturas tradicionais (“cinzas”), as soluções de drenagem sustentável permitem o desenvolvimento de cidades mais adaptáveis e resilientes às mudanças climáticas (Ahern, 2011; Ahiablame *et al.*, 2012; Butler *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2019). Dessa forma, o concreto permeável desempenha papel essencial na transição para modelos urbanos mais sustentáveis e eficientes.

Contudo, conforme Tucci (2002), a gestão pública de recursos hídricos ainda é limitada, o que agrava os efeitos das inundações e provoca prejuízos econômicos e sociais. Alguns autores destacam a importância de adotar sistemas de drenagem integrados e sustentáveis, capazes de armazenar e redistribuir a água das chuvas. Nesse contexto, o concreto permeável representa uma tecnologia com grande potencial para contribuir com a infraestrutura verde das cidades.

Além de favorecer o escoamento e infiltração da água, estudos recentes têm buscado aprimorar o concreto permeável por meio da incorporação de materiais alternativos e mais sustentáveis. Uma dessas abordagens envolve o uso de ligantes geopoliméricos, estudados por autores como Davidovits (2013) e Palomo *et al.* (1999), em substituição parcial ou total ao cimento Portland, visando reduzir o impacto ambiental e aproveitar resíduos industriais como metacaulim e cinzas volantes.

Os geopolímeros são compostos inorgânicos formados pela ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, que originam uma estrutura tridimensional com propriedades físicas e químicas estáveis. Além de reduzirem significativamente as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento, apresentam boa resistência mecânica, durabilidade e baixa permeabilidade (Bakharev, 2005; Kong & Sanjayan, 2010; Vassalo, 2013). Assim, a combinação entre o concreto permeável e o ligante geopolimérico representa uma alternativa inovadora e promissora para o desenvolvimento de pavimentos sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

1.1 Justificativa

A estrutura porosa do concreto permeável desempenha papel essencial não apenas na drenagem das águas pluviais, mas também na regulação térmica das superfícies urbanas. Sua capacidade de absorver e liberar calor auxilia na mitigação do fenômeno das ilhas de calor, promovendo o equilíbrio térmico com o ambiente e reduzindo a retenção de calor observada em pavimentos convencionais. Segundo a norma americana ACI 522R (ACI, 2010), o concreto permeável é um material granular de estrutura porosa com poros interconectados, resultante da combinação de agregados graúdos e pasta cimentícia em proporções otimizadas. De acordo com a NRMCA – CIP-38 (2004), a porosidade típica varia entre 15% e 25%, enquanto a relação água/cimento situa-se entre 0,28 e 0,40 — valores inferiores aos do concreto convencional, o que garante sua permeabilidade.

A proporção entre agregado e cimento exerce forte influência sobre o desempenho hidráulico e mecânico do concreto. Chandrappa & Biligiri (2016) relatam que essa proporção varia, em massa, de 4:1 a 6:1, correspondendo a um volume de agregados de aproximadamente 50 a 65%, enquanto concretos convencionais utilizam cerca de 60 a 75%. As propriedades dos aglomerantes cimentícios são determinantes para o desempenho do concreto permeável. Costuma-se empregar cimentos de alta resistência inicial e aditivos retardadores, que evitam a segregação dos agregados e aumentam o tempo disponível para a compactação da mistura. Essas medidas, recomendadas pela ACI 522R (ACI, 2010), garantem melhor coesão entre os materiais e estabilidade dimensional, fatores essenciais para assegurar a integridade estrutural e a funcionalidade hidráulica da mistura.

O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa, é uma prática amplamente adotada para melhorar o desempenho do concreto. De acordo com Santos *et al.* (2014), esses materiais apresentam propriedades pozolânicas que refinam a microestrutura da matriz cimentícia, reduzindo a conectividade dos poros e aumentando a resistência à compressão e à tração. Além disso, tais adições elevam a durabilidade do concreto, diminuindo sua permeabilidade e tornando-o mais resistente às ações ambientais. Assim, a escolha dos aglomerantes e a proporção adequada de MCS influenciam diretamente as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

Nesse contexto, o uso de geopolímeros surge como uma justificativa técnica e ambiental relevante. Ao substituir parcial ou totalmente o cimento Portland, os geopolímeros reduzem significativamente as emissões de CO₂ associadas à produção de ligantes, além de permitir o reaproveitamento de resíduos industriais como metacaulim e cinzas volantes. Segundo Davidovits (2013) e Palomo *et al.* (1999), esses materiais apresentam estrutura química estável e resistência comparável à dos cimentos convencionais, com menor impacto ambiental. Dessa forma, a incorporação de ligantes geopoliméricos em concretos permeáveis não apenas mantém o desempenho mecânico e hidráulico, mas também contribui para o desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito do uso de ligantes geopoliméricos no desempenho de concretos permeáveis destinados a pavimentos de tráfego leve, por meio da análise de parâmetros técnicos no estado fresco e endurecido, considerando aspectos mecânicos, hidráulicos e de sustentabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- Avaliar o comportamento mecânico e hidráulico dos concretos permeáveis com ligante geopolimérico em comparação aos concretos convencionais;
- Realizar a dosagem e caracterização de quatro traços de concreto permeável, variando o tipo de ligante e o tamanho do agregado graúdo;

- Determinar a influência da adição de 5% de areia na conectividade dos poros e na permeabilidade dos concretos estudados;
- Analisar a resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral dos concretos produzidos, correlacionando com sua estrutura interna;
- e) Investigar o comportamento do concreto geopolimérico no estado fresco, considerando a trabalhabilidade e a estabilidade da mistura;

1.3 Estrutura do trabalho

A pesquisa está dividida em 4 capítulos mais as referências bibliográficas. No *capítulo 1* faz-se a introdução da pesquisa, a justificativa, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

No *capítulo 2* é apresentado uma breve definição de concreto permeável e fatores influentes. Além disso, consta a revisão bibliográfica que reúne referências de trabalhos experimentais realizados por autores, assim, embasando o presente trabalho.

O *capítulo 3* apresenta o programa experimental desenvolvido, descrevendo as características dos traços desenvolvidos e os ensaios realizados. No *capítulo 4* consta os resultados do programa experimental, com os gráficos de das resistências das misturas obtidas.

No *capítulo 5* são apresentadas as conclusões obtidas desse estudo e sugestões para trabalhos futuro e, por fim, as referências bibliográficas.

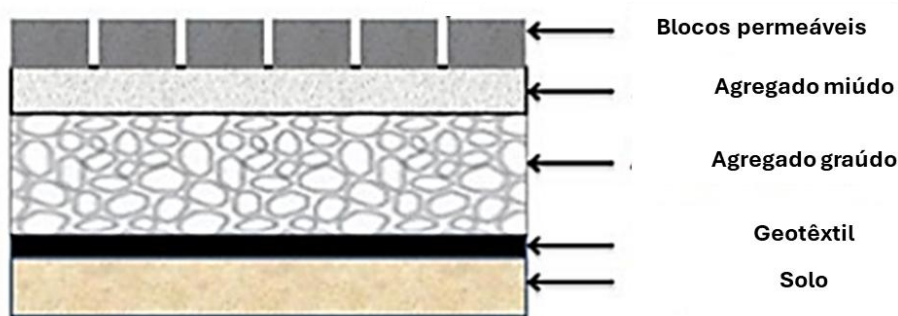
2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Concreto Permeável

A tecnologia de pavimentação drenante com concreto permeável tem sido amplamente aplicada em diferentes países, especialmente na Europa e nos Estados Unidos, devido à sua capacidade de aliar eficiência hidráulica e sustentabilidade ambiental. Seu uso remonta à França, por volta da década de 1940, quando o material foi empregado como alternativa econômica durante a reconstrução pós-Segunda Guerra Mundial. Segundo Balbo (2020), o pavimento de concreto permeável consiste em uma estrutura superficial porosa que direciona a água da chuva para uma base granular capaz de armazenar temporariamente parte da água infiltrada e/ou direcioná-la ao subleito. Conforme a norma brasileira, esse tipo de pavimento é indicado principalmente para calçadas e vias de tráfego leve, com volume diário médio (VDM) de até 400 veículos, podendo haver ocasionalmente a passagem de ônibus e caminhões, desde que em número reduzido.

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), as camadas de revestimento dos pavimentos têm como função resistir e distribuir esforços verticais e horizontais ao subleito, garantindo conforto e segurança ao rolamento. O pavimento de concreto permeável se diferencia por apresentar uma matriz com vazios interconectados, que permite a passagem da água por gravidade, favorecendo o controle do escoamento superficial. A Figura 2 ilustra as principais camadas estruturais de um pavimento permeável. A norma americana ACI 522R-10 (ACI, 2010) destaca diversas vantagens do uso desse tipo de pavimento, como o controle de poluição em águas superficiais, a redução do escoamento pluvial e o aumento da segurança em vias devido à menor derrapagem. Entretanto, a tecnologia exige elevado controle na execução e mão de obra qualificada, o que eleva os custos e restringe sua aplicação a locais com menores exigências estruturais.

Figura 2: Estrutura de um pavimento permeável.



Fonte: Adaptado de Shafique *et. al* (2018)

No que diz respeito aos agregados, a ACI 522R (ACI, 2010) recomenda o uso de partículas com diâmetro entre 9,5 mm e 19 mm, enquanto a ASTM C33 admite o intervalo entre 1,18 mm e 19 mm. Já a NBR 16416 (ABNT, 2015) orienta o uso de agregados de granulometria aberta, priorizando partículas graúdas com diâmetro entre 4,75 mm e 9,5 mm, de modo a garantir a permeabilidade adequada da mistura. A granulometria é fator determinante na formação dos poros e, portanto, na permeabilidade e resistência do concreto. Estudos de Neptune & Putman (2010) demonstraram que misturas com maior variedade granulométrica apresentaram menor permeabilidade e porosidade, porém com acréscimo de resistência mecânica, devido ao melhor empacotamento dos grãos. Resultados semelhantes foram observados por Yang & Jiang (2003), que verificaram que agregados menores proporcionam menor porosidade e maior resistência.

A ACI 522R (ACI, 2010) admite o uso de materiais como escória granulada e cinzas volantes, sem limitação de teor, reforçando a flexibilidade na dosagem. Pesquisas de Mohammed *et al.* (2018) mostraram que a substituição parcial do cimento por cinzas volantes e nano-sílica resultou em aumento da resistência à compressão e manutenção da porosidade. Já Yang (2011) observou que a adição de sílica ativa e fibras de polipropileno melhora a durabilidade frente aos ciclos de congelamento e degelo. Para a avaliação de desempenho, as principais propriedades mecânicas analisadas em concretos permeáveis incluem resistência à compressão, tração na flexão, fadiga, abrasão e durabilidade. A Figura 3 apresenta um corpo de prova submetido ao ensaio de tração na flexão.

Figura 3: Ensaio de flexão em prisma de PC.



Fonte: Chandrappa & Biligiri (2016).

Conforme Tennis *et al.* (2004), os valores de resistência à compressão do concreto permeável variam entre 3,5 MPa e 28 MPa, enquanto a resistência à tração na flexão situa-se entre 1,0 MPa e 3,8 MPa. Tais resultados indicam que o material é adequado para aplicações de baixo carregamento, como calçadas, estacionamentos e áreas de lazer (Costa *et al.*, 2018). Em contrapartida, para vias de tráfego intenso, recomenda-se a otimização da compactação e da granulometria, bem como o uso de aditivos e ligantes alternativos. A microestrutura do concreto permeável é responsável por equilibrar a permeabilidade e a resistência mecânica. O tamanho e a interconectividade dos poros determinam a eficiência hidráulica do material, enquanto a espessura da pasta de ligação afeta diretamente sua rigidez e resistência. De acordo com Chandrappa & Biligiri (2016), a otimização da relação entre volume de vazios e densidade aparente é essencial para garantir desempenho satisfatório tanto em drenagem quanto em durabilidade.

O aumento da resistência mecânica do concreto permeável pode ser obtido por meio da melhoria dos processos de compactação e adensamento da matriz, da adequada distribuição granulométrica dos agregados graúdos e do ajuste das proporções entre ligante, aditivos e adições minerais. A utilização de materiais alternativos, além de potencializar o desempenho mecânico, contribui para a redução do consumo de cimento e para a mitigação dos impactos ambientais associados à sua produção. Conforme destacado por Zhong *et al.* (2018), os métodos de ensaio aplicados ao concreto convencional não são totalmente adequados para o concreto permeável, em razão de sua estrutura porosa e comportamento diferenciado. Assim, a ausência de padronização específica dificulta a comparação entre estudos e resultados, sendo as

resistências à compressão e à tração na flexão os principais parâmetros empregados na avaliação do desempenho mecânico desse tipo de material.

2.2. Concreto geopolimérico

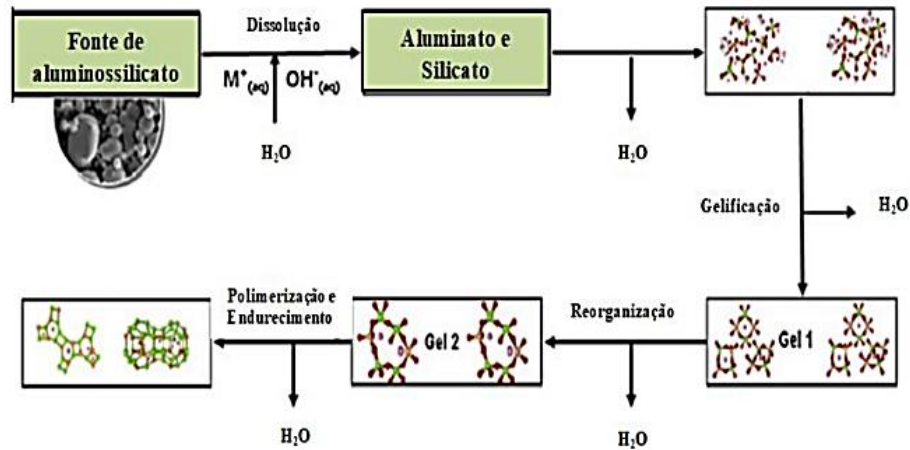
O concreto geopolimérico é uma alternativa inovadora ao concreto convencional, desenvolvido a partir da ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, como cinza volante, metacaulim e escória de alto-forno. Essa tecnologia surgiu em 1978, quando o pesquisador francês Joseph Davidovits propôs o uso da geopolimerização como mecanismo químico responsável pela formação de ligantes cimentantes em materiais inorgânicos ativados. Ao longo das décadas seguintes, diversos pesquisadores, como Palomo *et al.* (1999), ampliaram os estudos sobre as combinações entre precursores e ativadores alcalinos, buscando desenvolver concretos geopoliméricos de alta resistência.

Inicialmente, a cura era realizada em temperaturas elevadas, mas avanços recentes permitiram o endurecimento à temperatura ambiente, diminuindo significativamente o consumo energético e tornando o processo mais viável em larga escala. As pesquisas mais expressivas concentram-se no uso de metacaulim e cinza volante como matérias-primas principais, combinadas com soluções ativadoras formadas por hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3). O metacaulim, obtido pela desidroxilação térmica do caulim, apresenta alta reatividade e capacidade de gerar uma matriz densa e estável. Segundo Davidovits (1999), o processo de calcinação do caulim é simples e pode ser realizado em laboratório.

O processo de geopolimerização envolve diferentes etapas químicas — dissolução, gelificação, reorganização e polimerização — conforme ilustrado na Figura 4. A sílica e a alumina são dissolvidas em meio alcalino, gerando espécies reativas de aluminato e silicato que se reorganizam e se condensam, formando uma rede sólida de gel polimerizado. De acordo com Boca Santa (2012), a concentração do hidróxido de sódio pode variar entre 5 e 16 mols, dependendo do tipo de precursor utilizado. O uso combinado de NaOH e Na_2SiO_3 proporciona maior resistência mecânica quando associado a materiais como escória e cinzas volantes. No entanto, Provis *et al.* (2014) observaram que o alto calor de dissolução dos hidróxidos pode gerar tensões térmicas que afetam a microestrutura do material. Por esse motivo, o processo de mistura conhecido como “two-part mixing” é amplamente adotado — nele, a solução alcalina

é previamente preparada e posteriormente incorporada ao precursor, garantindo maior homogeneidade.

Figura 4: Reação química de geopolimerização



Fonte: Azevedo (2023).

Durante o processo de cura, a mistura apresenta picos exotérmicos, inicialmente relacionados à dissolução das partículas e formação de aluminatos, seguidos por estágios de reorganização e precipitação dos produtos de reação (Bernal *et al.*, 2015). Conforme Ferreira (2021), o concreto geopolimérico pode alcançar até 70% de sua resistência à compressão nas primeiras quatro horas de cura, evidenciando o rápido ganho de resistência e estabilidade volumétrica do material. A quantidade de água na mistura exerce papel determinante sobre o desempenho final. Segundo Brito (2018), a água garante a plasticidade inicial, mas seu excesso gera porosidade e reduz a resistência mecânica, pois parte da água fica aprisionada na rede de geopolímeros, dificultando a reação de polimerização.

Dessa forma, o controle da relação água/aglutinante e da razão SiO_2/Na_2O é essencial para a obtenção de um material com boa trabalhabilidade e desempenho elevado. De acordo com Davidovits (1991) e Tashima (2012), qualquer material inorgânico amorfo contendo silício e alumínio pode atuar como precursor na ativação alcalina, o que amplia as possibilidades de utilização de resíduos industriais e agrícolas. Essa diversidade de matérias-primas, embora vantajosa do ponto de vista ambiental, também dificulta a padronização dos resultados entre diferentes estudos, devido às variações na composição química e reatividade dos materiais disponíveis em cada região. Apesar dos avanços, Brito (2018) ressalta que ainda há necessidade

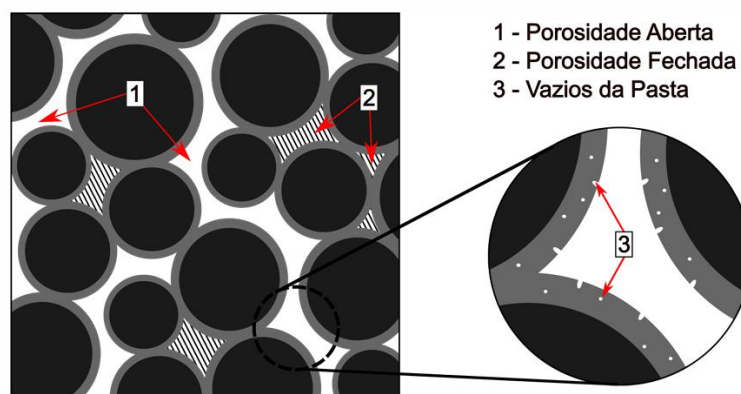
de aprofundar o entendimento sobre o processo de endurecimento dos geopolímeros. Pinto (2004) observou que esses materiais apresentam módulo de elasticidade inferior ao do concreto convencional, enquanto Palomo *et al.* (2014) defendem que a ciência dos aglomerantes deve evoluir rumo à adoção de ligantes alternativos, mais sustentáveis e versáteis.

2.3. Porosidade

A porosidade do concreto permeável pode ser dividida em três tipos principais: efetiva, isolada e total. A porosidade efetiva refere-se aos vazios interconectados que permitem o escoamento de fluidos no interior do material e, portanto, são diretamente responsáveis por sua permeabilidade. Já a porosidade isolada corresponde aos poros que permanecem desconectados entre si e da superfície externa, não contribuindo para o fluxo de água. A soma desses dois tipos resulta na porosidade total. É importante destacar que o desempenho hidráulico do concreto permeável não depende apenas da quantidade de poros, mas também da forma como estão distribuídos e do grau de interligação entre eles, fatores que influenciam significativamente a eficiência de drenagem.

Segundo Zhong *et al.* (2018), a presença de poros isolados pode reduzir a eficiência do fluxo de água, mesmo em concretos com alta porosidade. De modo geral, o volume de poros conectados situa-se entre 15% e 35%, valor suficiente para garantir a infiltração da água através da camada de pavimento (Tennis *et al.*, 2004; ACI, 2010; Yahia; Kabagire, 2014). Montes *et al.* (2005) observaram que a taxa de permeabilidade do concreto permeável varia de 0,2 cm/s a mais de 1 cm/s, dependendo das propriedades dos materiais utilizados, superando a maioria das taxas médias de precipitação. Em pesquisa complementar, Rushton (2001) verificou que o uso de pavimentos permeáveis em estacionamentos reduziu o escoamento superficial em até 45% durante eventos de chuva, demonstrando sua eficácia no controle de drenagem e no manejo sustentável das águas pluviais. A Figura 5 ilustra os diferentes tipos de porosidade.

Figura 5: Porosidade aberta, fechada e vazios da pasta.



Fonte: Mikami (2022).

Em estudo voltado à análise da redução do escoamento superficial e da concentração de poluentes, Dreelin *et al.* (2006) constataram uma diminuição de até 93% do escoamento em eventos de chuva de baixa intensidade. Embora esses trabalhos não tenham avaliado diretamente a microestrutura dos poros, ambos ressaltam a importância da porosidade e da interconectividade das camadas drenantes na capacidade de percolação de fluidos. De forma semelhante, Kwiatkowski *et al.* (2007) identificaram pavimentos de concreto permeável com porosidade próxima a 25%, capazes de eliminar completamente o escoamento superficial na área de estudo, evidenciando o papel fundamental dos vazios na eficiência hidráulica do sistema.

Em pesquisa comparativa, Alam *et al.* (2019) verificaram que pavimentos de concreto permeável com cerca de 20% de porosidade reduziram o escoamento superficial em até 98%, sob condições de precipitação média de 70 mm. De modo complementar, Braga *et al.* (2022), ao simularem o regime pluviométrico característico da região amazônica, observaram valores de escoamento inferiores a 0,5% mesmo em chuvas intensas com duração de até 15 minutos, utilizando placas com porosidade entre 21% e 39%. Os autores destacaram ainda uma relação inversa entre a área dos poros superficiais e o volume de escoamento, demonstrando que a estrutura porosa do concreto permeável exerce influência direta sobre sua eficiência no controle da drenagem urbana.

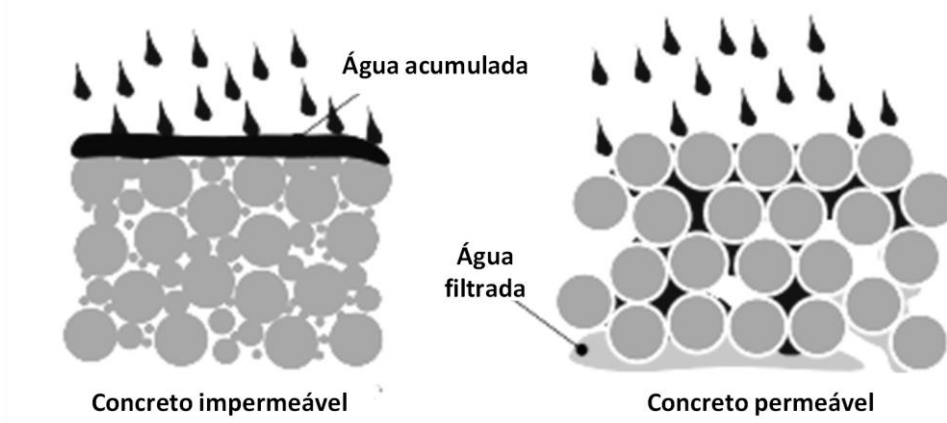
2.4. Permeabilidade

De acordo com Zhong *et al.* (2018), a permeabilidade corresponde à capacidade do concreto permeável de permitir a passagem da água através dos poros interconectados de sua

estrutura interna, como ilustrado na Figura 6. Conforme Collishonn & Tassi (2008), a infiltração está diretamente relacionada à condutividade hidráulica do material, ou seja, à sua permeabilidade. Esse comportamento é quantificado por meio do coeficiente de permeabilidade (k), que expressa a velocidade com que a água atravessa o material. Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), esse coeficiente deve ser superior a 1 mm/s, enquanto o ACI 522R (2010) recomenda valores variando entre 1,4 mm/s e 12,2 mm/s, dependendo da composição e das condições de adensamento do concreto.

Na prática, a permeabilidade é um parâmetro essencial para avaliar o desempenho hidráulico de pavimentos permeáveis, especialmente quanto à infiltração de águas pluviais e à mitigação do escoamento superficial. Em pesquisa recente, Braga *et al.* (2022) verificaram que o coeficiente de permeabilidade apresenta forte correlação com a capacidade das placas de concreto em reduzir o volume escoado, sendo influenciado por fatores como o tipo de agregado, o teor de pasta e o grau de compactação. Outros autores também destacam que a qualidade da execução e a manutenção periódica da superfície são determinantes para a conservação da eficiência hidráulica ao longo do tempo.

Figura 6: Concreto impermeável x Concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Zhong *et al.* (2018).

Um dos principais desafios no desenvolvimento de misturas de concreto permeável é alcançar um equilíbrio entre resistência mecânica e desempenho hidráulico. Nesse contexto, Yahia & Kabagire (2014) avaliaram a influência da granulometria dos agregados, do diâmetro característico e do volume de pasta cimentícia nas propriedades do material, constatando que a maior graduação e a redução do tamanho dos grãos diminuem o potencial de percolação da água, estabelecendo uma relação polinomial entre a permeabilidade e a porosidade das amostras. De

forma complementar, Mikami (2022) analisou a condutividade hidráulica de concretos permeáveis utilizando um permeâmetro de carga variável com carga inicial de 500 mm, o que permitiu determinar a taxa de escoamento e o coeficiente de permeabilidade em função da variação do nível d'água. Os resultados evidenciaram que o equilíbrio entre porosidade e distribuição granulométrica é essencial para o desempenho hidráulico, e o modelo de regressão proposto demonstrou boa precisão na estimativa da condutividade hidráulica com base nas características físicas da mistura.

2.5. Trabalhos realizados

2.5.1 Höltz (2011)

O presente estudo teve como finalidade desenvolver e avaliar um concreto permeável voltado à aplicação em grandes áreas, com ênfase na compreensão de suas propriedades físicas e mecânicas, nas dificuldades de produção em campo e em seu potencial de contribuição para a drenagem urbana. A pesquisa foi estruturada em quatro etapas principais: a fase preliminar, que envolveu a prospecção da melhor combinação entre a relação água/cimento (a/c) e a proporção de agregados (m), a partir de um conjunto de traços experimentais baseados nas recomendações do ACI 522-06 "Pervious Concrete"; a fase complementar, na qual foram avaliados os traços com $m = 5$ e $a/c = 0,30$, além de um traço adicional com $m = 4$, considerando diferentes granulometrias (brita, pedrisco e areia) e métodos de vibração; a fase de análise do efeito de extração, que comparou os resultados de resistência à compressão entre corpos de prova moldados e extraídos; e, por fim, a etapa de ensaios de permeabilidade, onde foram realizados testes hidráulicos para determinar a capacidade de percolação do material e consolidar os resultados obtidos.

Na etapa experimental, o autor conduziu concretagens exploratórias com o objetivo de identificar o traço mais adequado para conciliar resistência mecânica, permeabilidade e viabilidade econômica. Foram testadas 12 combinações distintas, resultantes da variação de quatro relações água/cimento (0,26; 0,30; 0,35; e 0,45) e três proporções de agregados (1:5, 1:7 e 1:9), utilizando materiais disponíveis localmente. Os melhores resultados foram obtidos com a proporção 1:5 e relação $a/c = 0,30$, que apresentou equilíbrio satisfatório entre coesão e percolação. A partir dessa constatação, o autor investigou também um traço mais rico (1:4) para verificar possíveis ganhos de resistência, além de avaliar a substituição parcial da brita 1

por brita 0 (pedrisco) e pequenas quantidades de areia, com o intuito de melhorar a conectividade e a uniformidade da mistura. A relação a/c de 0,30 foi mantida para os ensaios finais, uma vez que relações inferiores a 0,26 resultaram em misturas excessivamente secas e relações superiores a 0,45 ocasionaram o escoamento da pasta e obstrução dos poros, comprometendo a permeabilidade do concreto.

Figura 7: CPs do traço com relação a/c de 0,45, com poros obstruídos.



Fonte: Hölzt (2011).

O autor realizou ensaios de compressão axial e de permeabilidade, sendo este último baseado na metodologia proposta por Neithalath *et al.* (2003). Na primeira etapa experimental, os resultados indicaram valores de resistência à compressão variando entre aproximadamente 3 e 9 MPa, com desempenho influenciado pelas proporções entre relação água/cimento (a/c) e proporção de agregados (m). Observou-se que os traços com menores relações a/c apresentaram maior variabilidade nos resultados, o que foi atribuído à baixa trabalhabilidade das misturas e às dificuldades no processo de moldagem. Assim, constatou-se que a resistência e a morfologia dos corpos de prova variaram de forma significativa conforme as proporções utilizadas. Diferentemente do comportamento observado em concretos convencionais, a resistência à compressão não foi diretamente governada pela relação a/c ; ao contrário, os traços com a/c mais elevadas (0,30 a 0,35) apresentaram melhores resultados devido à maior fluidez da mistura, que favoreceu o envolvimento e a acomodação dos agregados.

Também foi analisado um traço com $m = 4$ e relação $a/c = 0,30$, introduzindo variações granulométricas a partir do uso de brita 0, brita 1 e 7% de agregado fino (areia). Essa configuração teve como objetivo melhorar a coesão da mistura e evitar o entupimento dos poros, mantendo a permeabilidade característica do concreto. Para os ensaios de compactação, diferentes métodos de vibração e adensamento foram empregados: os traços com brita 1 foram adensados manualmente com o auxílio de uma espátula, enquanto o traço com pedrisco (brita 0) foi submetido à vibração intensa em mesa vibratória para garantir melhor empacotamento. Essa variação de procedimento permitiu comparar os efeitos da compactação na resistência mecânica e na permeabilidade das amostras. Os resultados demonstraram que ambas as abordagens de adensamento contribuíram para o aumento da resistência.

No caso da brita 1 sem vibração, o adensamento manual evitou o escorrimento da pasta e resultou em misturas mais estáveis. Já para o traço com brita 0, a vibração em mesa melhorou o empacotamento e proporcionou maior ganho de resistência, embora tenha causado obstrução parcial dos poros. Por fim, o estudo conclui que os traços desenvolvidos mostraram-se adequados para pavimentos de tráfego leve e pedonal, apresentando viabilidade técnica e econômica. Para aplicações em áreas de maior solicitação, como estacionamentos e vias com tráfego moderado, recomenda-se a utilização de traços com $m = 4$ ou 5 , que proporcionam melhor equilíbrio entre resistência e permeabilidade.

2.5.2 Mikami (2022)

O presente estudo teve como principal objetivo desenvolver uma metodologia de dosagem versátil, capaz de ser aplicada a diferentes composições granulométricas de agregados graúdos e níveis de energia de compactação, de modo a garantir maior controle sobre a porosidade do concreto permeável. A proposta baseou-se no conceito de grau de compactação do agregado graúdo, permitindo estabelecer uma relação direta entre o empacotamento das partículas e a permeabilidade do material. A metodologia foi testada em 48 misturas experimentais, com porosidades-alvo de 20%, 25% e 30%, variando-se a granulometria, o teor de agregado miúdo e a utilização de aditivos superplastificantes. Esse procedimento possibilitou o ajuste sistemático das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto, oferecendo um método prático e eficiente para o controle da estrutura interna das misturas e a otimização de suas características de desempenho.

Os resultados indicaram porosidades efetivas variando entre 15% e 30%, confirmando a eficiência do método proposto para ajustar a estrutura dos vazios e alcançar o equilíbrio entre resistência e permeabilidade. O autor também desenvolveu modelos preditivos para estimar a resistência à compressão, a condutividade hidráulica e o consumo de cimento em função da porosidade obtida, facilitando a definição de traços otimizados para diferentes condições de uso. A Figura 8 apresenta o modo de ruptura observado em um corpo de prova moldado com duas camadas de compactação, onde a fissura inicial se formou longitudinalmente, evoluindo para uma fratura transversal na região central. Essa diferença de comportamento foi atribuída à variação de porosidade entre as camadas, que reduziu a resistência à tração da amostra, evidenciando a importância de um controle rigoroso da compactação durante a moldagem.

Além da análise mecânica, o autor conduziu ensaios de permeabilidade com permeâmetros de carga constante e variável, investigando a influência da granulometria dos agregados sobre o desempenho do concreto. Foram comparadas misturas compostas por pedrisco (P) e brita 1 (B) de mesma origem mineral, diferenciadas apenas pela distribuição granulométrica. Também foram produzidas misturas com granulometria uniforme (U), obtidas por peneiramento em três faixas de tamanho — 4,75 mm, 6,3 mm e 9,5 mm —, além de composições descontínuas (D) formadas por misturas binárias de 4,75 mm e 9,5 mm, inspiradas no conceito de pavimentos SMA (Stone Matrix Asphalt). Por fim, foi testada uma mistura combinando pedrisco e brita 1 (P/B), que apresentou o melhor empacotamento de partículas, confirmando o potencial dessa combinação para melhorar a resistência sem comprometer a permeabilidade.

Figura 8: Ruptura à tração indireta e seção de fratura de concreto com duas camadas de compactação.

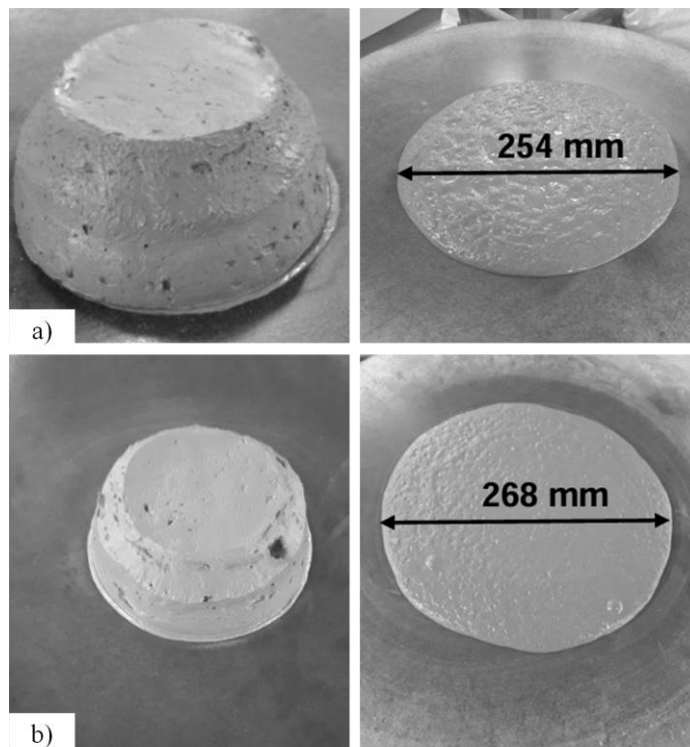


Fonte: Mikami (2022).

O autor constatou que, por se tratarem de agregados provenientes da mesma origem mineralógica, as densidades aparentes apresentaram valores semelhantes entre as diferentes composições granulométricas. No entanto, observou-se que a absorção de água variou conforme o tamanho médio dos grãos — sendo mais elevada no agregado U4 (fração uniforme de menor diâmetro) e mais baixa na brita 1, composta por partículas de maior dimensão. As propriedades que exibiram maior variação foram a massa unitária e o volume de vazios, ambos fundamentais no processo de dosagem do concreto permeável, pois influenciam diretamente o controle da porosidade da mistura em conjunto com o volume de pasta de cimento. Identificou-se ainda que as frações uniformes (U) apresentaram maior volume de vazios, justificando sua ampla utilização em concretos permeáveis, enquanto as misturas binárias (D) alcançaram maiores massas unitárias devido ao efeito de empacotamento, no qual partículas menores preenchem os espaços entre as maiores. Esse ganho, contudo, é limitado: quando o preenchimento é excessivo, as partículas finas substituem as grossas, reduzindo a massa unitária total.

Para o desenvolvimento do método de dosagem, o autor empregou modelos matemáticos capazes de estimar resistência à compressão, condutividade hidráulica e consumo de cimento em função da porosidade das misturas. Foi também proposta uma etapa de otimização baseada em porosidade fixa, ajustando a relação água/cimento (a/c) e o teor de agregado miúdo. A consistência da pasta foi controlada por meio de um índice de referência (ICp) de 254 mm, sendo o teor de aditivo superplastificante ajustado para manter a trabalhabilidade desejada em misturas com 20% e 40% de agregado miúdo. Os ensaios foram realizados utilizando cimento CP II-F 32 e aditivo à base de policarboxilato, resultando em uma mistura ideal com relação a/c de 0,28 e índice de consistência de 268 mm. A Figura 9 ilustra a diferença visual entre o ensaio de consistência da pasta isolada e do traço com adição de agregado miúdo, evidenciando o efeito da granulometria sobre a trabalhabilidade.

Figura 9: Ensaio de consistência.



Fonte: Adaptado de Mikami (2022)

De modo geral, a principal contribuição da pesquisa foi a formulação de um método sistemático e quantitativo de dosagem de concreto permeável, que permite o controle dos fatores mais críticos para o desempenho do material — porosidade, relação a/c e proporção de agregado miúdo. Essa abordagem possibilita a adaptação a diferentes tipos de agregados, níveis de compactação e adições minerais, sem depender de ajustes empíricos, tornando o processo mais preciso e reproduzível. Além disso, o autor ressalta a importância da cura úmida para evitar lixiviação, do uso racional da energia de compactação para equilibrar resistência e permeabilidade e da adequação dos métodos de medição da condutividade hidráulica. Observou-se que a porosidade no estado fresco é um parâmetro essencial para o controle das misturas, e que a adição moderada de agregado miúdo contribui para reduzir o consumo de cimento sem prejudicar a drenagem, desde que sejam mantidos o equilíbrio entre consistência e porosidade. Dessa forma, o método proposto fornece uma base sólida para o ajuste de traços otimizados, conciliando desempenho técnico, eficiência material e sustentabilidade.

2.5.3 Ryu *et al.* (2013)

O estudo desenvolvido por Ryu *et al.* (2013) teve como foco central analisar o comportamento mecânico e microestrutural do concreto geopolimérico produzido a partir de

cinzas volantes, investigando o impacto de diferentes concentrações e proporções de ativadores alcalinos na resistência e na porosidade do material. A pesquisa partiu da crescente necessidade de substituição parcial ou total do cimento Portland por aglomerantes alternativos de baixo impacto ambiental, capazes de reduzir as emissões de dióxido de carbono e o consumo energético associados à indústria cimenteira. Dentro desse contexto, o concreto geopolimérico foi avaliado como uma solução promissora, especialmente em virtude da sua capacidade de atingir elevadas resistências mecânicas e boa durabilidade, quando adequadamente formulado.

Na fase inicial da pesquisa, os autores elaboraram argamassas geopoliméricas experimentais, utilizando cinzas volantes de origem termelétrica como precursor e combinações variadas de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃) como soluções ativadoras. O objetivo foi compreender o efeito da molaridade da solução alcalina e da proporção entre os dois ativadores sobre as reações de geopolimerização e o desenvolvimento da estrutura do material. As amostras foram moldadas em corpos de prova prismáticos de (50 × 50 × 50) mm, e os ensaios compreenderam testes de resistência à compressão, análises de porosidade e exames microestruturais com o intuito de observar a formação da matriz e o grau de densificação obtido em cada formulação. A Tabela 1 mostra os traços testados pelos autores.

Tabela 1: Distribuição granulométrica do seixo médio.

| PROPORÇÃO EM MASSA (g) | | | | | | | | |
|------------------------|------------|-----------------|------------------|-----------|-----------|------------|-------------------|-------|
| Séries | Mistura | Cinzas volantes | H ₂ O | NaOH (6M) | NaOH (9M) | NaOH (12M) | Silicato de Sódio | Areia |
| 1 | FASH6SS50 | 1600 | 160 | 400 | | | 400 | 2400 |
| | FASH9SS50 | 1600 | 160 | | 400 | 400 | 400 | 2400 |
| | FASH12SS50 | 1600 | 160 | | | | 400 | 2400 |
| 2 | FASH0SS100 | 1600 | 160 | | 0 | | 800 | 2400 |
| | FASH25SS75 | 1600 | 160 | | 200 | | 600 | 2400 |
| | FASH50SS50 | 1600 | 160 | | 400 | | 400 | 2400 |
| | FASH75SS25 | 1600 | 160 | | 600 | | 200 | 2400 |
| | FASH100SS0 | 1600 | 160 | | 800 | | 0 | 2400 |

Fonte: Azevedo (2023)

Os resultados demonstraram que a resistência à compressão das misturas aumentou proporcionalmente à concentração do ativador alcalino, até um ponto de saturação, onde o excesso de hidróxido de sódio passou a comprometer a coesão interna e aumentar a porosidade.

A proporção entre NaOH e Na₂SiO₃ mostrou-se determinante para o equilíbrio entre fluidez da mistura e densidade da matriz, sendo que a adição controlada de silicato de sódio favoreceu a formação de uma rede tridimensional mais estável e compacta, resultante da reação entre as cinzas volantes e os íons liberados na solução alcalina. As análises microestruturais confirmaram que as misturas mais equilibradas apresentaram poros menores e melhor conectividade entre as fases, o que se refletiu em maiores resistências mecânicas e menor absorção de água.

Com base nesses resultados, foi selecionada a mistura designada FASH50SS50, contendo proporções equivalentes de hidróxido e silicato de sódio, para dar continuidade aos ensaios com adição de agregado graúdo, convertendo a argamassa em concreto geopolimérico propriamente dito. Os corpos de prova cilíndricos moldados, com dimensões de 100 × 200 mm, foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, atingindo valores médios de aproximadamente 31 MPa aos 28 dias de idade. Esse desempenho foi considerado notável, especialmente porque foi obtido sem o uso de cimento Portland, demonstrando o potencial do sistema geopolimérico como material estrutural viável. Além disso, os autores observaram que a mistura apresentou baixo calor de reação, boa estabilidade volumétrica e reduzida formação de fissuras, características desejáveis em aplicações estruturais e de infraestrutura.

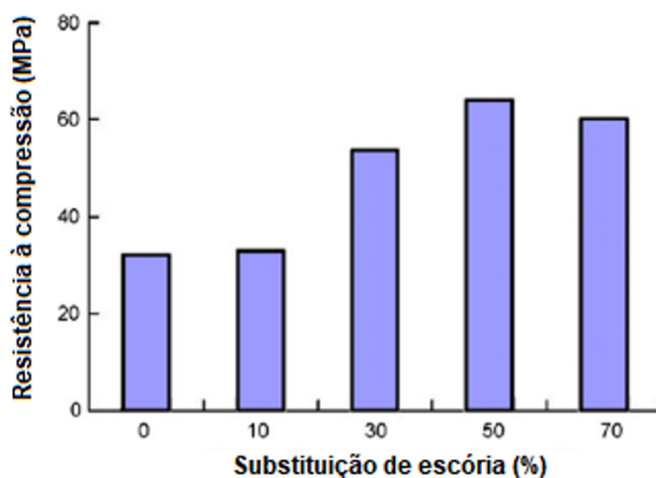
Por fim, Ryu *et al.* (2013) concluíram que o equilíbrio químico entre os ativadores alcalinos é essencial para o desenvolvimento adequado da microestrutura do concreto geopolimérico, sendo o principal fator determinante da resistência final. O estudo destacou que pequenas variações na molaridade do NaOH ou na relação entre NaOH e Na₂SiO₃ podem alterar significativamente as propriedades físicas do material, evidenciando a importância de um controle rigoroso das variáveis de mistura. Os autores reforçam que o concreto geopolimérico produzido a partir de cinzas volantes não apenas apresenta desempenho mecânico comparável ao concreto convencional, mas também reduz significativamente os impactos ambientais relacionados à produção de cimento, podendo ser utilizado em diversas aplicações estruturais. Dessa forma, o trabalho fornece uma base experimental sólida para o avanço da tecnologia dos geopolímeros, contribuindo para a consolidação de materiais sustentáveis de alto desempenho na engenharia civil moderna.

2.5.4 Silva (2025)

O trabalho analisa o comportamento e viabilidade do concreto geopolimérico como alternativa sustentável ao concreto convencional, substituindo parcial ou totalmente o cimento Portland por materiais precursores ativados alcalinamente, como metacaulim e cinzas volantes. O estudo fundamenta-se na crescente demanda por soluções que reduzam as emissões de CO₂ e o consumo de recursos naturais na construção civil, além de promover o reaproveitamento de resíduos industriais. O autor apresenta o processo de geopolimerização, que envolve a ativação de compostos ricos em sílica e alumina por soluções alcalinas de hidróxido e silicato de sódio, formando uma estrutura de aluminossilicatos tridimensionais.

Esse mecanismo resulta em um material com alta resistência inicial, baixa permeabilidade, elevada durabilidade e boa estabilidade térmica, características que o tornam aplicável em estruturas de engenharia civil. A pesquisa ressalta que o desempenho depende fortemente da razão SiO₂/Na₂O, da relação água/aglutinante e da temperatura de cura. Nos ensaios experimentais, o concreto geopolimérico apresentou ganhos de resistência à compressão acima de 40 MPa e atingiu até 70% da resistência final nas primeiras quatro horas de cura, comprovando o rápido endurecimento do material. Além disso, observou-se boa estabilidade volumétrica e baixa retração autógena, aspectos que o diferenciam positivamente do concreto Portland. O estudo também discute a viabilidade econômica e ambiental, apontando redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa e na energia consumida durante o processo produtivo.

Figura 10: Relação da resistência a compressão e substituição de escória.



Fonte: Silva (2025)

Por fim, o autor destaca a necessidade de normatização específica para concretos geopoliméricos, visto que os métodos tradicionais de ensaio não se aplicam integralmente a esses materiais. Conclui-se que o concreto geopolimérico representa uma alternativa promissora e ambientalmente responsável, com potencial para ser incorporado à construção civil moderna, sobretudo em aplicações de pavimentação e elementos estruturais não convencionais.

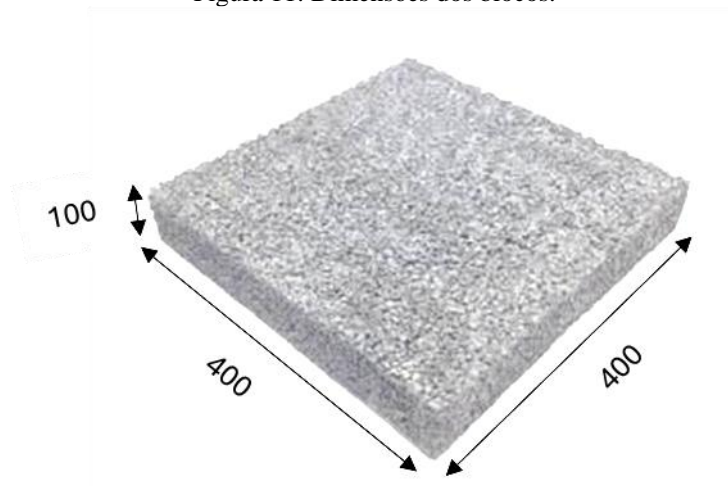
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

O programa experimental teve como objetivo principal avaliar o efeito do material cimentício à base de metacaulim sobre o desempenho de concretos permeáveis destinados a pavimentos de tráfego leve. A pesquisa buscou compreender de que forma as características físicas dos diferentes ligantes e agregados influenciam o comportamento hidráulico e mecânico do concreto, com ênfase na viabilidade da matriz geopolimérica como alternativa sustentável e na redução do consumo de cimento Portland.

Foram estudados quatro traços distintos: dois formulados com cimento Portland — um com brita número zero e outro com brita número um — e dois com matriz geopolimérica, também variando o tamanho do agregado graúdo. Nos traços convencionais, foi adicionada areia fina correspondente a 5% da massa de cimento, com o objetivo de melhorar o cobrimento dos agregados, aumentar a coesão da mistura e evitar o desprendimento superficial dos grãos. Para os ensaios mecânicos, foram moldadas placas de concreto permeável com dimensões de $400 \times 400 \times 100$ mm. A Figura 11 mostra as dimensões e a configuração dos blocos confeccionados para os testes, que serviram de base para a comparação entre os traços convencionais e os geopoliméricos.

Figura 11: Dimensões dos blocos.



Fonte: Autor (2025).

3.2. Materiais

3.2.1. Concreto permeável convencional

Neste estudo, optou-se pela utilização do cimento Portland composto CP II-F 32, cuja principal característica é a presença de 11% a 25% de material carbonático em sua composição, de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Esses materiais, constituídos predominantemente por carbonato de cálcio finamente dividido, contribuem para um processo de hidratação mais controlado e com menor liberação de calor, aspecto essencial para concretos que exigem estabilidade térmica e dimensional. Tal escolha justifica-se especialmente no contexto do concreto permeável, em que a relação água/cimento é consideravelmente inferior à dos concretos convencionais. Essa característica demanda um cimento com baixo calor de hidratação, de forma a minimizar o risco de fissuração térmica e tensões internas decorrentes da rápida evaporação da água de amassamento.

No que se refere aos agregados graúdos, adotou-se uma combinação de brita zero e brita um, selecionadas de forma a proporcionar adequada distribuição granulométrica e melhor empacotamento das partículas, o que contribui para a manutenção da porosidade interconectada, característica indispensável ao desempenho hidráulico do concreto permeável. Adicionalmente, foi incorporado 5% de areia natural, em relação à massa de cimento, com o objetivo de aumentar a coesão da mistura, melhorar a conectividade da pasta e reduzir o desprendimento de agregados durante a moldagem e o adensamento. A Tabela 2 apresenta o traço unitário adotado na pesquisa, especificando as proporções de cada componente utilizado.

Tabela 2: Traço unitário de concreto convencional.

| Cimento | Agregado graúdo | Agregado miúdo | <i>a/c</i> |
|---------|-----------------|----------------|------------|
| 1,0 | 4,0 | 0,05 | 0,36 |

Fonte: Autor (2025)

3.2.2. Concreto permeável geopolimérico

Foi desenvolvido um concreto geopolimérico permeável utilizando o metacaulim como material precursor e uma solução alcalina de 16 mols composta por hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃) como ativadores. O traço adotado é apresentado na Tabela 3, sendo as proporções relacionadas à massa do metacaulim. O agregado graúdo empregado foi uma brita com diâmetro máximo de 9,5 mm, escolhida por apresentar granulometria adequada

ao controle da porosidade e à manutenção da permeabilidade do material e brita 1. A Figura 12 mostra a solução alcalina utilizada.

Tabela 3: Traço unitário de concreto geopolimérico

| Metacaulim | Agregado gráúdo | Solução alcalina | <i>a/c</i> |
|------------|--------------------|---------------------|------------|
| 1,0 | 6,0 | 0,80 | 0,05 |

Fonte: Autor (2025)

Figura 12: Solução alcalina



Fonte: Autor (2025)

Durante a execução dos traços, observou-se a necessidade de rigoroso controle tecnológico dos agregados, visto que a presença de finos na brita interferia negativamente na trabalhabilidade e na formação dos poros interconectados. Para garantir uniformidade e precisão nos resultados, foi realizado um processo de secagem completa dos agregados, além da remoção do material pulverulento da brita, assegurando a consistência e a reprodutibilidade dos ensaios, bem como a continuidade granulométrica.

Durante os ajustes de dosagem, verificou-se que a manutenção da mesma proporção de componentes utilizada em concretos convencionais resultava em um elevado teor de pasta geopolimérica, o que reduzia a porosidade e comprometia a permeabilidade característica do concreto. Assim, tornou-se necessário aumentar a proporção de agregado gráúdo, de modo a

equilibrar o volume de pasta e preservar a estrutura porosa essencial ao desempenho hidráulico do material. Após os ajustes, o concreto apresentou trabalhabilidade adequada, melhor conectividade entre a matriz geopolimérica e o agregado graúdo e porosidade uniforme, atendendo aos requisitos de resistência e drenagem esperados para pavimentos de tráfego leve. A Figura 13 mostra a diferença dos traços no estado fresco.

Figura 13: Concreto convencional e geopolimérico, respectivamente.



Fonte: Autor (2025)

O processo de concretagem foi conduzido de maneira controlada, visando garantir a homogeneidade e a qualidade do concreto geopolimérico durante a produção dos blocos. Inicialmente, foram adicionados à betoneira o metacaulim e a solução alcalina, composta previamente preparada. Essa mistura foi mantida em agitação contínua por aproximadamente dois minutos, garantindo a dispersão completa do precursor e a ativação inicial do ligante. Em seguida, foi introduzido o agregado graúdo — brita zero/brita 1 — à mistura, permitindo que as partículas fossem uniformemente envolvidas pela pasta geopolimérica. Na sequência, de forma lenta e controlada, adicionou-se água, em quantidade previamente determinada, para ajustar a trabalhabilidade e a consistência da mistura.

Esse procedimento visou evitar a segregação dos materiais e a perda de fluidez, garantindo uma distribuição uniforme da matriz e dos agregados no interior da betoneira. Após o preparo, o concreto foi vertido nas formas de madeirite, previamente limpas e lubrificadas, sendo o adensamento realizado manualmente com o auxílio de uma espátula, de modo a preservar a estrutura porosa característica do concreto permeável. A Figura 14 apresenta os blocos moldados nas formas, evidenciando a textura superficial e a uniformidade da mistura. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao período de cura em condições controladas de

temperatura e umidade, assegurando o desenvolvimento completo das reações de geopolimerização e a estabilidade dimensional do material.

Figura 14: Concreto convencional e geopolimérico, respectivamente.



Fonte: Autor (2025)

3.3. Ensaios realizados

Afim de avaliar o desempenho físico, hidráulico e mecânico dos quatro traços analisados — cimento + brita 0, cimento + brita 1, geopolímero + brita 0 e geopolímero + brita 1 — foram realizados ensaios conforme normas técnicas nacionais e internacionais. Os ensaios permitem caracterizar adequadamente o concreto permeável no estado endurecido, possibilitando correlacionar propriedades como permeabilidade, índice de vazios e resistência mecânica

3.3.1. Caracterização dos materiais

Antes da moldagem dos corpos de prova, realizou-se a caracterização dos materiais constituintes de cada traço, com o intuito de identificar propriedades que influenciam diretamente no comportamento final do concreto permeável. Os agregados graúdos (brita 0 e brita 1) foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica, massa específica e absorção de água, conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 52 (ABNT, 2003)..

3.3.2. Compressão axial

O ensaio de compressão axial foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência mecânica dos concretos permeáveis produzidos, permitindo comparar o desempenho entre os traços convencionais e aqueles com matriz geopolimérica à base de metacaulim. Esse ensaio fornece informações fundamentais sobre a capacidade de suporte de carga do material e sua

adequação para aplicação em pavimentos de tráfego leve, sendo um dos principais parâmetros de controle de qualidade para concretos de natureza estrutural ou funcional. Os corpos de prova foram moldados em formas metálicas cilíndricas com dimensões de (100 × 200) mm, de acordo com as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018). A Figura 15 mostra os corpos de prova utilizados.

Figura 15: Formas utilizadas para moldagem dos CPs.



Fonte: Autor (2025)

O procedimento de cura foi cuidadosamente controlado para evitar variações de temperatura e umidade que pudessem interferir no ganho de resistência. O ensaio foi conduzido em uma prensa hidráulica com capacidade de 2000 kN, com velocidade de carregamento constante, conforme especificado pela norma. Cada corpo de prova foi posicionado centralmente na prensa, aplicando-se o carregamento de forma contínua até a ruptura do material. Durante o ensaio, foram registrados os valores de carga máxima suportada, sendo a resistência à compressão calculada pela razão entre a força máxima e a área da seção transversal do corpo de prova. A Figura 16 mostra os corpos de prova utilizados antes e depois da ruptura.

Figura 16: CPs antes e depois do ensaio.



Fonte: Autor (2025)

3.3.3. Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro de tração indireta, foi realizado com o propósito de determinar a resistência à tração dos concretos permeáveis produzidos com matrizes convencionais e geopoliméricas à base de metacaulim. Esse ensaio é amplamente utilizado por apresentar simplicidade de execução e bons resultados na avaliação do comportamento à tração de concretos frágeis, nos quais a ruptura direta por tração é de difícil realização devido à natureza do material. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados com dimensões de (100×200) mm, conforme estabelece a NBR 7222 (ABNT, 2011). No caso dos traços geopoliméricos, garantiu-se que o processo de geopolimerização ocorresse de forma controlada, mantendo condições adequadas de temperatura e umidade para o completo desenvolvimento das reações químicas do ligante.

Figura 17: CPs antes e depois do ensaio de tração por compressão.



Fonte: Autor (2025)

O ensaio foi conduzido em uma prensa hidráulica universal, aplicando-se a carga uniformemente ao longo do diâmetro do corpo de prova, entre duas faixas de apoio metálicas, até o instante de ruptura. A força aplicada no momento da ruptura foi registrada e utilizada para calcular a resistência à tração indireta conforme a equação prevista na norma, que relaciona a carga máxima, o diâmetro e a altura do corpo de prova. A Figura 17 apresenta o ensaio de tração por compressão diametral em execução, destacando o modo típico de fissuração. Observou-se que a ruptura ocorreu de forma frágil e predominantemente linear, com a abertura de uma fissura diametral centralizada, indicando a concentração das tensões de tração na região de aplicação da carga. Nos concretos geopoliméricos, a aderência entre a matriz e o agregado gráúdo mostrou-se mais eficiente, resultando em fissuras mais discretas e propagação mais lenta, quando comparadas às amostras convencionais.

3.3.4 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade tem como finalidade avaliar a capacidade do concreto permeável em permitir o escoamento de água através de sua estrutura porosa, parâmetro diretamente relacionado à eficiência hidráulica e à funcionalidade desse tipo de material em pavimentos drenantes. O procedimento consiste em submeter o corpo de prova a um escoamento controlado de água, observando o volume percolado e o tempo necessário para sua passagem pela amostra. Esse ensaio pode ser realizado com permeômetro de carga constante

ou variável, conforme recomendam a NBR 16416 (ABNT, 2015) e a ASTM C1701 (ASTM, 2017).

Em ambos os métodos, a água é aplicada sobre a superfície do corpo de prova, geralmente moldado em dimensões de 100 mm de altura por 400 mm de lado, e o coeficiente de permeabilidade (k) é calculado com base na vazão do fluido, altura da carga hidráulica e espessura da amostra. O resultado, expresso em milímetros por segundo (mm/s), fornece uma medida quantitativa da condutividade hidráulica do concreto, sendo um indicador da sua eficiência como pavimento drenante. Figura 18 mostra o ensaio de permeabilidade realizado com dois tipos de concreto: o convencional à esquerda e o geopolimérico à direita. Em ambos os casos, observa-se a aplicação de água sobre a superfície superior dos blocos moldados, permitindo visualizar a percolação do fluido através dos poros interconectados do material.

Figura 18: Teste de permeabilidade nos blocos confeccionados.



Fonte: Autor (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

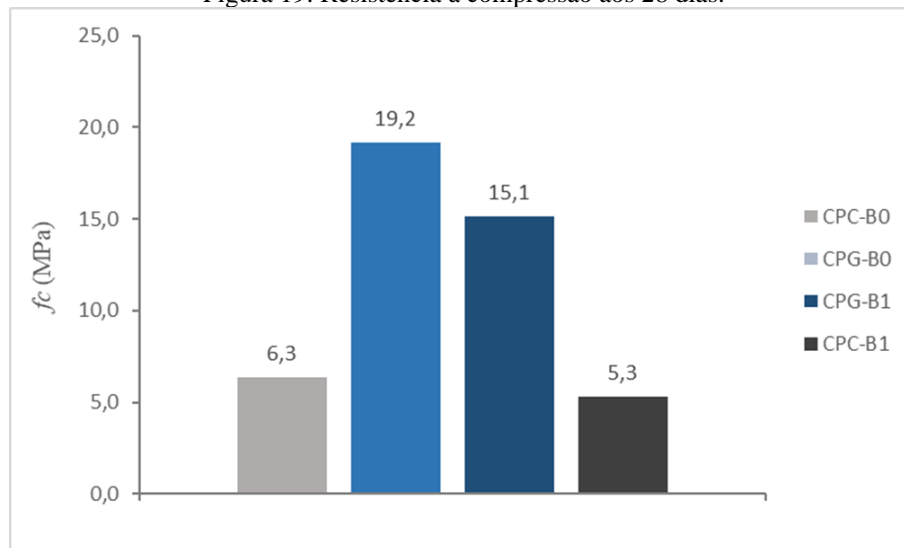
Os resultados obtidos nos ensaios experimentais permitem avaliar o comportamento mecânico e funcional dos concretos produzidos, considerando a influência do tipo de ligante e da granulometria do agregado graúdo. A análise dos parâmetros de resistência e permeabilidade fornece subsídios para compreender o efeito das variáveis de dosagem sobre o desempenho do material, contribuindo para a verificação da viabilidade técnica do concreto geopolimérico em comparação ao concreto convencional. Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e permeabilidade, confrontando-os com as normas técnicas e estudos correlatos.

4.1 Desempenho mecânico

A Figura 19 apresenta os valores médios de resistência à compressão (f_c) obtidos para os quatro traços avaliados. Observa-se um ganho expressivo de resistência nos concretos geopoliméricos, quando comparados aos traços convencionais de cimento Portland. O traço CPG-B0 atingiu 19,2 MPa, enquanto o CPG-B1 alcançou 15,1 MPa, superando em mais de três vezes os valores registrados para os concretos convencionais CPC-B0 (6,3 MPa) e CPC-B1 (5,3 MPa). Esse comportamento confirma a eficiência da ativação alcalina do metacaulim, que promove a formação de uma rede tridimensional de aluminossilicatos com elevada densificação e menor presença de poros interconectados, resultando em uma matriz mais coesa e resistente à compressão.

Entre os traços convencionais, nota-se que o uso de brita zero proporcionou uma resistência aproximadamente 20 % superior em relação ao traço com brita 1, demonstrando que a granulometria mais fina favorece o melhor empacotamento das partículas, reduzindo os vazios e aumentando o contato entre a pasta e o agregado graúdo. Essa característica permite uma distribuição mais homogênea das tensões internas e reduz a concentração de microfissuras, o que justifica o desempenho superior do traço CPC-B0. Resultados semelhantes são reportados por autores como Mehta & Monteiro (2014), que destacam que o controle da curva granulométrica é um dos fatores mais relevantes para o aumento da resistência mecânica em concretos de baixa relação água/cimento.

Figura 19: Resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Autor (2025)

Nos concretos geopoliméricos, observa-se que, mesmo com uma proporção de agregado cerca de duas vezes maior que a dos traços convencionais — o que implicaria, em princípio, menor quantidade de fase ligante — os valores de resistência permaneceram significativamente elevados. Isso evidencia que o desempenho do sistema geopolimérico não depende apenas da quantidade de pasta, mas também da qualidade da reação de geopolimerização, que ocorre de forma mais completa e homogênea devido à elevada reatividade do metacaulim. O produto resultante dessa reação é o gel N-A-S-H (silicato de alumínio e sódio hidratado), responsável pela coesão interna e pelo preenchimento eficiente dos vazios capilares. Assim, a microestrutura formada é mais densa e menos suscetível à propagação de fissuras sob compressão.

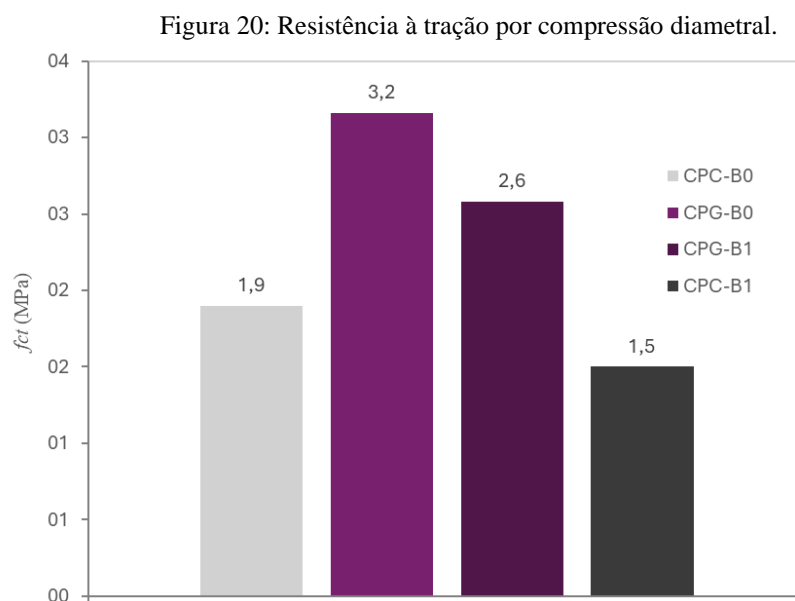
Além disso, o fato de o traço CPG-B0 apresentar resistência superior ao CPG-B1 reforça que o tamanho máximo do agregado também influencia o comportamento dos geopolímeros, ainda que em menor grau do que nos concretos convencionais. A utilização de brita zero promoveu uma melhor transição entre as zonas de interface (ITZ), minimizando discontinuidades entre a pasta e o agregado. Essa interface, tradicionalmente considerada o ponto mais fraco nos concretos convencionais, mostra-se mais estável em sistemas geopoliméricos devido à menor porosidade e à presença de produtos de reação de alta coesão, conforme discutido por Provis & Van Deventer (2019).

Em síntese, os resultados indicam que os concretos geopoliméricos possuem maior potencial de desempenho mecânico, mesmo com teores reduzidos de material ligante, demonstrando a viabilidade técnica e ambiental dessa alternativa. A substituição parcial ou total

do cimento Portland por ligantes ativados alcalinamente pode resultar em concretos com melhor desempenho estrutural e menor impacto ambiental, uma vez que reduz a emissão de CO₂ associada à produção do clínquer e aproveita resíduos de origem pozolânica, como o metacaulim.

A Figura 20 apresenta os valores médios de resistência à tração por compressão diametral (f_{ct}) obtidos para os quatro traços analisados. De modo geral, observa-se que os concretos com matriz geopolimérica apresentaram maior capacidade resistente à tração indireta quando comparados aos traços convencionais de cimento Portland. O traço CPG-B0 atingiu resistência de 3,2 MPa, enquanto o CPG-B1 apresentou 2,6 MPa. Já os concretos convencionais CPC-B0 e CPC-B1 obtiveram 1,9 MPa e 1,5 MPa, respectivamente.

O desempenho superior dos geopolímeros reflete a maior coesão interna e aderência entre matriz e agregado, que favorecem a transferência de tensões e retardam o início da fissuração. A matriz geopolimérica, embora mais rígida, apresenta estrutura compacta e contínua, o que reduz a concentração de tensões e contribui para o aumento da resistência à tração. Nesse contexto, o gel formado durante a reação de ativação alcalina atua reforçando a ligação entre partículas, promovendo uma estrutura mais integrada e resistente à propagação de fissuras.



Fonte: Autor (2025).

Comparando-se os traços de mesma granulometria, nota-se um ganho expressivo de desempenho dos concretos geopoliméricos. O traço CPG-B0 apresentou uma resistência cerca de 68 % superior à do CPC-B0, enquanto o CPG-B1 superou o CPC-B1 em aproximadamente 73 %. Esses resultados confirmam que a ativação alcalina proporcionou ganhos significativos também no comportamento à tração indireta, mesmo considerando que a proporção de agregado é maior nos traços geopoliméricos. A influência da granulometria do agregado também se mantém evidente. Tanto nos concretos convencionais quanto nos geopoliméricos, os traços com brita zero apresentaram resistências superiores aos traços com brita 1, devido ao melhor empacotamento e à maior continuidade da matriz, fatores que favorecem a distribuição uniforme das tensões de tração.

Assim, a combinação entre a matriz ativada e o agregado de menor diâmetro se mostrou mais eficiente em termos de desempenho mecânico. De forma geral, os resultados indicam que o concreto geopolimérico apresenta não apenas maior resistência à compressão, mas também melhor resposta à tração indireta, o que amplia seu potencial de aplicação em elementos estruturais sujeitos a tensões combinadas. Essa melhoria evidencia o papel da matriz geopolimérica na melhoria da coesão interna e na aderência interfacial, resultando em um material mais resistente e estável frente à abertura de fissuras.

4.2. Desempenho hidráulico

O ensaio de permeabilidade teve como finalidade determinar a capacidade de infiltração de água nos concretos permeáveis, comparando o desempenho entre misturas de matriz convencional e geopolimérica. O procedimento foi realizado com volume de 3,6 l de água aplicado sobre amostras com área superficial de 0,16 m² e espessura de 100 mm, conforme recomendações da NBR 16416 (ABNT, 2015). O coeficiente de permeabilidade (k) foi calculado pela relação $k = V/A \cdot t$, sendo o tempo (t) correspondente ao escoamento completo do volume de água.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que todas as composições atingiram valores superiores a 1 mm/s, atendendo integralmente ao requisito mínimo da NBR 16416 (ABNT, 2015) para pavimentos permeáveis. Além disso, os traços com brita 1, tanto para o concreto convencional quanto para o geopolimérico, enquadram-se também na faixa recomendada pela ACI 522R (ACI, 2010), que varia entre 1,4 e 12,2 mm/s.

Tabela 4: Traço unitário de concreto geopolimérico

| Tipo de concreto | Agregado graúdo | Tempo para 3,6 L (s) | Coefficiente k (mm/s) | Classificação segundo norma |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Convencional | Brita 0 | 16,4 | 1,37 | Atende à NBR 16416 |
| Convencional | Brita 1 | 11,8 | 1,91 | Atende à NBR 16416 e ACI 522R |
| Geopolimérico | Brita 0 | 22,5 | 1,00 | Limite NBR 16416 |
| Geopolimérico | Brita 1 | 13,3 | 1,69 | Atende à NBR 16416 e ACI 522R |

Fonte: Autor (2025)

Verifica-se que o concreto convencional com brita 1 apresentou o melhor desempenho hidráulico, atingindo $k=1,91$ mm/s, valor 13% superior ao do concreto geopolimérico com o mesmo agregado ($k = 1,69$ mm/s). Essa diferença é atribuída à menor quantidade de pasta e à estrutura de vazios mais aberta no concreto convencional, devido a retração da pasta, que favorece a passagem da água entre os agregados graúdos. Já o concreto geopolimérico, embora apresente uma permeabilidade satisfatória, mostrou condutividade hidráulica ligeiramente inferior, influenciada pela maior proporção de agregado graúdo e pela maior viscosidade da pasta geopolimérica, que tende a preencher parte dos poros interconectados, além de não apresentar porosidade.

A formulação geopolimérica, com traço 1:6:0,8:0,05 (metacaulim : agregado : solução alcalina : água), foi ajustada para reduzir o excesso de pasta observado nas primeiras misturas, o qual causava o fechamento dos poros e comprometia a drenagem. O aumento do volume de agregado resultou em uma estrutura mais coesa e estável, embora com menor conectividade entre os vazios. Esse equilíbrio proporcionou boa trabalhabilidade e resistência, mas reduziu levemente o fluxo hidráulico em comparação ao concreto convencional.

De modo geral, pode-se afirmar que o concreto geopolimérico apresentou desempenho hidráulico adequado para pavimentos de tráfego leve, combinando boa resistência mecânica e permeabilidade dentro dos limites normativos. Entretanto, quando o objetivo principal é maximizar a taxa de infiltração e a eficiência do sistema de drenagem, o concreto convencional com brita 1 se destaca como a alternativa mais eficaz, oferecendo a melhor relação entre permeabilidade e estabilidade estrutural dentre os traços analisados.

5. CONCLUSÕES

5.1. Considerações

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e permeabilidade, observa-se que os concretos geopoliméricos apresentaram desempenho significativamente superior aos concretos convencionais à base de cimento Portland. A utilização do ligante ativado alcalinamente proporcionou ganhos expressivos tanto na resistência à compressão quanto na tração indireta, evidenciando uma matriz mais coesa e com melhor aderência interna. Em contrapartida, essa estrutura mais densa resultou em menor permeabilidade, o que indica uma redução da conectividade dos poros e, conseqüentemente, menor capacidade de infiltração.

No que diz respeito à granulometria do agregado, os traços produzidos com brita zero apresentaram melhores resultados de resistência em ambos os ensaios mecânicos, quando comparados aos traços com brita número 1. O agregado de menor diâmetro favoreceu o empacotamento das partículas e a homogeneidade da matriz, reduzindo a presença de vazios e melhorando a transferência de tensões. No entanto, essa mesma característica ocasionou uma leve diminuição na permeabilidade, devido ao fechamento parcial dos poros interconectados. Assim, verifica-se que o aumento da resistência mecânica vem acompanhado da redução da capacidade de infiltração, exigindo um equilíbrio entre ambas as propriedades conforme a aplicação pretendida.

De forma comparativa, o traço CPG-B0 destacou-se como o de melhor desempenho geral, apresentando as maiores resistências à compressão e à tração entre todos os analisados, ainda que com a menor permeabilidade. Já o traço CPG-B1 mostrou-se mais equilibrado, alcançando bons valores de resistência e mantendo uma permeabilidade relativamente satisfatória, o que o torna adequado para aplicações que requerem simultaneamente resistência estrutural e capacidade de drenagem. Os traços convencionais (CPC-B0 e CPC-B1) apresentaram resistências inferiores, porém maior permeabilidade, o que pode ser vantajoso em pavimentos onde o desempenho hidráulico seja prioritário.

De modo geral, conclui-se que a substituição do cimento Portland por ligantes geopoliméricos é uma alternativa promissora para a produção de concretos permeáveis com melhor desempenho mecânico e menor impacto ambiental. Entretanto, o tipo de agregado exerce papel determinante no equilíbrio entre resistência e permeabilidade. Assim, a escolha do traço ideal deve considerar as exigências de projeto, priorizando resistência em aplicações estruturais ou permeabilidade em superfícies drenantes, sendo o traço CPG-B1 o que melhor representa o compromisso entre essas duas condições.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados, tem-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Análise microestrutural dos concretos geopoliméricos permeáveis. Recomenda-se a realização de estudos complementares utilizando técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), com o objetivo de compreender de forma mais detalhada a estrutura interna, a distribuição e a conectividade dos poros, bem como a influência da reação de geopolimerização na formação da matriz e na aderência entre pasta e agregado.
- Avaliação da durabilidade sob condições ambientais reais. Sugere-se a execução de ensaios de envelhecimento acelerado e exposição natural, incluindo ciclos de molhagem e secagem, variações térmicas e ataques químicos. Esses estudos permitiriam avaliar o comportamento dos concretos geopoliméricos ao longo do tempo, verificando a manutenção da resistência mecânica, da permeabilidade e da integridade superficial em condições semelhantes às de um pavimento em serviço.
- Investigação do uso de diferentes tipos de ativadores e precursores. Pesquisas futuras podem explorar o efeito de diferentes soluções ativadoras (por exemplo, combinações de hidróxido e silicato de sódio em distintas proporções molares) e de outros materiais precursores, como cinza volante, escória granulada ou resíduos industriais ricos em sílica e alumina. Essa abordagem permitiria comparar o desempenho mecânico, hidráulico e ambiental de diferentes sistemas geopoliméricos.
- Estudo da influência do teor de agregado graúdo e da compactação. Considerando que a relação entre resistência e permeabilidade depende fortemente do volume de vazios, propõe-se avaliar diferentes teores de agregado e métodos de

compactação. Ensaio variando a densidade de empacotamento poderiam identificar uma faixa ótima que maximize a resistência sem comprometer a drenagem, contribuindo para o aprimoramento da dosagem de concretos permeáveis geopoliméricos.

- Avaliação da viabilidade estrutural e econômica em escala real. Finalmente, recomenda-se a aplicação dos traços mais promissores em protótipos de pavimentos ou calçadas permeáveis, com instrumentação para monitoramento de desempenho. Além da análise estrutural e hidráulica em campo, a inclusão de uma avaliação de custos e impactos ambientais (como emissões de CO₂ e consumo energético) proporcionaria uma visão mais completa da viabilidade técnica e sustentável do uso de geopolímeros em obras de infraestrutura urbana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI. *ACI 522R-10 — Pervious Concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2010.

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, v. 100, p. 341-343, 2011.

AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low-impact development practices: a literature review. *Journal of Environmental Management*, v. 92, p. 308-318, 2012.

ALAM, M. S.; HASAN, M.; HOQUE, M. M.; UDDIN, F. Hydraulic performance of pervious concrete pavement: a review. *Construction and Building Materials*, v. 225, p. 176-188, 2019.

ASTM. *C1701/C1701M-17a — Standard Test Method for Infiltration Rate of In-Place Pervious Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AZEVEDO, E.; OLIVEIRA, D.; NZAMBI, A. Geopolymer flat slabs with synthetic coarse aggregate under punching. 2023.

BAKHAREV, T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated-temperature curing. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1224-1232, 2005.

BALBO, J. T. *Pavimentação*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; WALKLEY, B.; SAN NICOLAS, R.; GEHMAN, J. D.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A. R.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 127–144, 2013.

BOCA SANTA, R. A. A. Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel. 2012. 34 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

BRAGA, N. T. S.; ARRUDA JÚNIOR, E. S.; CORDEIRO, L. N. P. Performance and runoff coefficient of permeable concretes subjected to heavy rainfall simulations. *Matéria*, v. 27, p. 1-12, 2022.

BUI, L. A.-T.; CHEN, C.-T.; HWANG, C.-L.; WU, W.-S. Effect of silica forms in rice husk ash on the properties of concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, v. 19, n. 3, p. 252-258, 2012.

BUTLER, D.; FARMANI, R.; FU, G.; WARD, S.; DIAO, K.; ASTARAIE-IMANI, M. A new approach to urban water management: safe and sure. *Procedia Engineering*, v. 89, p. 347–354, 2014.

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

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 5, e05818, 2018.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, v. 37, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 4. ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2013.

DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. Enhancing future resilience in urban drainage systems: green versus grey infrastructure. *Water Research*, v. 124, p. 280-289, 2017.

DREELIN, E. A.; FOWLER, L.; CARROLL, C. R. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events. *Water Research*, v. 40, p. 799-805, 2006.

HASELBACH, L.; VALAVALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of Environmental Management*, v. 81, n. 1, p. 42-49, 2006.

HÖLTZ, F. C. Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise de viabilidade técnica e do impacto ambiental. 2011. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, Porto Alegre, 2011.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 334-339, 2010.

KWIATKOWSKI, M.; WELKER, A.; TRAVER, R. Evaluation of an infiltration BMP utilizing pervious concrete. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 43, p. 1208-1222, 2007.

LIU, J.; LI, H.; WANG, Y.; ZHANG, H. Integrated life cycle assessment of permeable pavement: model development and case study. *Transportation Research Part D*, v. 85, 102381, 2020.

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

NEPTUNE, A. I.; PUTMAN, B. J. Effect of aggregate size and gradation on pervious concrete mixtures. *ACI Materials Journal*, v. 107, 2010.

NRMCA. CIP-38 — Pervious Concrete. National Ready Mixed Concrete Association, 2004.

PALOMO, A.; BLANCO-VARELA, M. T.; GRANIZO, M. L.; PUERTAS, F.; VAZQUEZ, T.; GRUTZECK, M. W. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 7, p. 997-1004, 1999.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Alkali-activated binders: current status and future prospects. *Cement and Concrete Research*, v. 57, p. 1-17, 2014.

RYU, G. S.; LEE, Y. B.; KOH, K. T.; CHUNG, Y. S. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 409-416, 2013.

RUSHTON, B. M. Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutants. *Watershed Protection Techniques*, v. 3, n. 2, p. 566-578, 2001.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; KWON, K-H. Rainfall runoff mitigation by retrofitted permeable pavement in an urban area. *Sustainability*, v. 10, n. 4, 1231, 2018.

SILVA, J. P. C. Concreto geopolimérico: uma revisão bibliográfica. 2025. 79 f.

SIMÕES, O. G.; ZANOTELLI, J.; PILAR, R.; SCHANKOSKI, R. Avaliação das propriedades mecânicas e de permeabilidade de peças de concreto permeável contendo resíduos de rocha ornamental. *Ambiente Construído*, v. 23, n. 4, p. 241-254, 2023.

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

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

VASSALO, E. A. S. Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: a review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, v. 210, p. 1605-1621, 2019.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 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, p. 381-386, 2003.

YANG, J. Mix design and characteristics evaluation of pervious concrete. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 28, p. 223-231, 2011.