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

MARINA MATEUS MISGA
RHÉGIS WOICIECHOWSKI LOPES

# AVALIAÇÃO DA INCLUSÃO DE AGREGADO MIÚDO DE RCD EM MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE PAVIMENTAÇÃO

PONTA GROSSA
2024

MARINA MATEUS MISGA
RHÉGIS WOICIECHOWSKI LOPES

# AVALIAÇÃO DA INCLUSÃO DE AGREGADO MIÚDO DE RCD EM MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE PAVIMENTAÇÃO

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

Orientador: Prof. Me. Guilherme Perosso Alves
Coorientador: Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami

PONTA GROSSA
2024

MARINA MATEUS MISGA
RHÉGIS WOICIECHOWSKI LOPES

AVALIAÇÃO DA INCLUSÃO DE AGREGADO MIÚDO DE RCD EM MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE PAVIMENTAÇÃO

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

**BANCA EXAMINADORA**

_____

Prof. Me. Guilherme Perosso Alves
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

_____

Prof. Dra. Rafaella Salvador Paulino
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

_____

Prof.ª Dr.ª Patrícia Kruger
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 28 de outubro de 2024

Este trabalho é dedicado aos nossos pais, por olharem incansavelmente por nós e nos darem seu apoio e compreensão durante toda a graduação.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer inicialmente à Deus, à Nossa Senhora Aparecida e Sta. Teresinha, que nos guiaram durante os cinco anos de curso e permitiram que chegássemos a esse momento tão esperado.

Aos nossos orientadores, professor Me. Guilherme Perosso Alves e professor Dr. Rafael Jansen Mikami que, mesmo distantes, se fizeram presentes e nos acompanharam e deram todo o apoio necessário para a execução deste trabalho.

Às nossas famílias, em especial aos nossos pais, que são pilares fundamentais nessa jornada. Somos infinitamente gratos pelo incentivo e por sempre acreditarem em nosso potencial.

Aos amigos e, agora colegas de profissão, Rafael Juncos e Fernanda Damaso, pela ajuda em laboratório e pesquisas.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, professores e colaboradores do Departamento de Engenharia Civil. A todos que, direta ou indiretamente fizeram parte deste projeto.

## RESUMO

Diante dos problemas de drenagem pluvial ocasionados especialmente pela impermeabilização dos solos urbanos, o concreto permeável surge como alternativa para mitigar esse efeito, sendo capaz de escoar a água por meio de sua estrutura porosa. Inicialmente, esse material era dosado sem nenhuma quantidade de areia, apresentando consumo significativo de cimento para manter estáveis os parâmetros de resistência mecânica. Estudos recentes trazem o concreto permeável com parte da sua dosagem já contendo o material miúdo, tornando a alternativa mais sustentável. Esse estudo, por sua vez, tem como objetivo avaliar a incorporação de agregado miúdo reciclado de concreto em peças de pavimentação, permitindo a análise do desempenho das peças de concreto permeável conforme há aumento do teor de areia. Inicialmente, foram produzidas 4 misturas de concreto com variação no teor areia/cimento de 0,0; 0,25; 0,5 e 0,75, sendo todas dosadas com porosidade de 25% e aumento gradual na relação água/cimento. Na sequência, foram analisadas as características físicas de permeabilidade e resistência mecânica do material. Como resultado, todas as amostras apresentaram altas taxas de infiltração, com valores acima de 1,5 cm/s. Entretanto, apenas o traço sem adição de areia apresentou resistência superior ao esperado de 20 MPa, de forma que um último traço foi proposto, com teor areia/cimento de 0,25 e porosidade de projeto igual a 20%, resultando na redução da permeabilidade a fim de que fosse obtido ganho de resistência mecânica. Após a realização de ensaios, obteve-se ainda uma boa taxa de infiltração, igual a 0,71 cm/s, e uma resistência mecânica de 24 MPa, igualando-se ao traço sem incorporação de areia. Além disso, o traço dosado com menor porosidade, apresentou a menor intensidade de consumo de cimento dentre todos os traços, sendo compreendida como a dosagem mais eficiente no quesito consumo de cimento/resistência. Com base nos resultados, conclui-se que é possível realizar a incorporação de agregado miúdo reciclado em traços de concreto poroso para reduzir o consumo de cimento, entretanto, é significativa a perda de resistência gerada pelo aumento da relação água/cimento, sendo que é necessário compreender as propriedades do material para a obtenção de uma dosagem otimizada.



**Palavras-chaves:** Concreto poroso, Agregado miúdo de RCD, Dosagem otimizada de concreto poroso

## ABSTRACT

Faced with rainwater drainage problems caused especially by the waterproofing of urban soils, pervious concrete appears as an alternative to mitigate this effect, being able to drain water through its porous structure. Initially, this material was dosed without any amount of sand, resulting in significant cement consumption to maintain stable mechanical resistance parameters. Recent studies present pervious concrete with part of its dosage already containing fine material, making the alternative more sustainable. This study, in turn, aims to incorporate recycled concrete fine aggregate into paving pieces, allowing the analysis of the performance of permeable pieces as the sand content increases. Initially, 4 mixtures were produced with a variation in sand/cement content of 0.0; 0.25; 0.5 and 0.75, all dosed with 25% porosity and gradual increase in the water/cement ratio. Subsequently, the physical characteristics of permeability and mechanical resistance of the material were proven, with all samples showing high infiltration rates, greater than 1.5 cm/s. However, only the mixture without the addition of sand showed a resistance higher than expected of 20 MPa, so that a final mixture was proposed, with a sand/cement content of 0.25 and design porosity equal to 20%, resulting in a reduction in permeability. in order to obtain gains in mechanical resistance. After carrying out tests, a good infiltration rate was also obtained, equal to 0.71 cm/s, and a mechanical resistance of 24 MPa, equal to the mixture without sand incorporation. Furthermore, the mix dosed with the lowest porosity showed the lowest intensity of cement consumption among all the mixes, being reported as the most efficient dosage in terms of cement consumption/resistance. Based on the results, it is concluded that it is possible to incorporate recycled fine aggregate into porous concrete mixes to reduce cement consumption, however, the loss of resistance generated by the increase in the water/cement ratio is significant, which is It is important to understand the properties of the material to obtain an optimized dosage.

**Keywords:** Pervious concrete, RCD fine aggregate, Reduction in cement consumption in pervious concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pavimento de concreto permeável ..... 22
Figura 2 - Típica seção do sistema do pavimento permeável ..... 23
Figura 3 - Demonstração da funcionalidade do concreto poroso ..... 24
Figura 4 - Representação da porosidade aberta, fechada e vazios da pasta ..... 26
Figura 5 - Fluxograma de execução de projeto ..... 38
Figura 6 - Curva granulométrica do agregado miúdo ..... 40
Figura 7 - Curva granulométrica dos agregados graúdos ..... 41
Figura 8 - Testes de a/c por vibrador mecânico e peneiramento ..... 43
Figura 9 - Moldes (a) prismático e (b) cílindrico ..... 49
Figura 10 - Placa metálica ..... 50
Figura 11 - Corpos de prova umedecidos em sacos plásticos ..... 51
Figura 12 - Anel de vedação para ensaio de permeabilidade ..... 52
Figura 13 - Corpo de prova nivelado ..... 53
Figura 14 - Representação de ensaio de tração indireta ..... 54
Figura 15 - Prensa utilizada para os ensaios ..... 54
Figura 16 Porosidade média no estado fresco ..... 55
Figura 17 - Massa específica média no estado fresco ..... 56
Figura 18 - Porosidade média dos corpos cilíndricos ..... 57
Figura 19 - Porosidade média no estado endurecido ..... 58
Figura 20 - Massa específica no estado endurecido ..... 59
Figura 21 - Permeabilidade média das misturas ..... 59
Figura 22 - Resistência à compressão média ..... 61
Figura 23 - Resistência à compressão e consumo de cimento ..... 62
Figura 24 - Resistência à tração das misturas ..... 63
Figura 25 - Intensidade de consumo de cimento ..... 66

# LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades físicas dos agregados miúdos.....39
Quadro 2 - Propriedades físicas dos agregados graúdos .....41
Quadro 3 - Quadro resumo de corpos de prova para cada traço .....49
Quadro 4 - Resumo das metodologias propostas .....51

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frações (em porcentagem) de destino de águas pluviais no ambiente ...19
Tabela 2 - Denominações, teores massa/cimento e porosidades das amostras.....39
Tabela 3 - Caracterização física do agregado miúdo .....40
Tabela 4 - Caracterização física dos agregados graúdos .....41
Tabela 5 - Relação água/cimento escolhido para cada teor areia/cimento .....43
Tabela 6 - Dados de entrada e traço piloto .....45
Tabela 7 - Teste de compactação para traço piloto .....47
Tabela 8 - Dados da dosagem .....48
Tabela 9 - Resultados obtidos para o Traço E em comparação com o Traço B .....64
Tabela 10 – Consumo real de materiais.....66
Tabela 11 - Resumo dos resultados obtidos .....67

**SUMÁRIO**

1 INTRODUÇÃO ..... **17**

1.1 OBJETIVO GERAL ..... 18

1.1.1 Objetivos específicos ..... 18

1.2 JUSTIFICATIVA ..... 19

**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 22**

2.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL ..... 22

2.3 PROPRIEDADES ..... 25

2.3.1 Porosidade ..... 25

2.3.2 Permeabilidade ..... 26

2.3.3 Resistência mecânica ..... 27

2.3.4 Intensidade de consumo de cimento ..... 28

2.4 INCORPORAÇÃO DE AREIA NO CONCRETO POROSO ..... 30

2.5 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL ..... 31

2.5.1 Propriedades do agregado miúdo reciclado ..... 33

**3 METODOLOGIA ..... 37**

3.1 MATERIAIS ..... 39

3.2 DOSAGEM ..... 42

3.2.1 Escolha da relação a/c ..... 42

3.2.2 Escolha do Traço ..... 43

3.3 PRODUÇÃO DE AMOSTRAS ..... 48

3.4 CARACTERIZAÇÃO ..... 51

**4 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 55**

4.1 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO ..... 55

4.2 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO ENDURECIDO ..... 57

4.3 PERMEABILIDADE ..... 59

4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA ..... 60

4.5 TRAÇO COMPLEMENTAR .....63
4.6 CONSUMO DE CIMENTO.....65
**5 CONCLUSÕES.....70**
**REFERÊNCIAS.....71**

# 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de urbanização no território brasileiro ocorreu de maneira crescente, sendo que a população urbana praticamente duplicou entre os anos de 1930 e 1950 segundo o IBGE (2007). Outros dados do IBGE (2023) indicaram que, em 2022, 124,1 milhões de pessoas viviam em concentrações urbanas no país, equivalente a 61% da população. A mesma pesquisa constatou que mais de 30% da população brasileira está em 48 cidades com mais de 500 mil habitantes, reforçando o fato de que há uma grande aglomeração urbana no Brasil. Esse aumento demasiado da população nas cidades traz obstáculos e preocupações que giram em torno do planejamento de cidades que comportem tamanha expansão, sem levar em consideração os problemas que seriam gerados a longo prazo. Como resultado desse crescimento de áreas urbanizadas dentro das cidades, a pavimentação e a construção civil tornaram grande parte do solo impermeabilizado, o que mais tarde é responsável por problemas recorrentes de drenagem urbana de águas pluviais.

Como alternativas para reduzir os danos causados pela falta de escoamento de águas pluviais surgiram diversas tecnologias voltadas ao aumento da permeabilidade da superfície urbana, em uma tentativa de recuperar as condições naturais. Uma alternativa que contribui para a infiltração e retenção de águas superficiais é o pavimento permeável, cuja principal função consiste em conduzir água entre suas camadas para as camadas de solo subjacentes (Scardua, 2021). Ainda dentro dos pavimentos permeáveis, há o concreto poroso, uma mistura cimentícia com pouca ou nenhuma adição de agregado miúdo que, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), em seu estado endurecido é capaz de conferir simultaneamente resistência e permeabilidade para a mistura através de sua matriz porosa.

As várias propriedades do concreto poroso são dependentes da sua porosidade (vazios intergranulares), que por outro lado depende da quantidade de cimento, relação água/cimento, força de compactação e qualidade e tamanho do agregado (ACI, 2010). Scardua (2021) ressalta a relação inversamente proporcional que conecta a porosidade do material à sua resistência, já que quanto mais vazios estiverem presentes na estrutura, menor será sua resistência mecânica. Sendo assim, é importante conhecer uma alternativa que forneça uma mistura suficientemente satisfatória em ambos os termos.

Com o intuito de reduzir o consumo de agregado natural, estudos como os de Alencar (2013) e Souza (2022) propuseram misturas de concreto permeável em que o agregado graúdo era substituído por agregado proveniente de RCD (Sandoval; Toralles; Teixeira, 2019). Em seu estudo, por exemplo, Souza (2022) conseguiu alcançar grande eficácia quanto a permeabilidade em *pavers* feitos com a substituição de agregado natural por areia reciclada mista, a medida a areia reciclada era inserida ao traço, com proporções de 25, 50 e 75%, a permeabilidade mostrava evolução.

A utilização de areia natural como agregado miúdo já tem sua eficácia comprovada no quesito de diminuição de consumo de cimento. No estudo de Skovronski e Carneiro (2023) em que foram realizados 4 traços, sendo eles o piloto, e os outros com relação agregado miúdo/cimento de 0,5, 1,0 e 1,5, todos com porosidade aproximada de 20%, obtiveram efetividade no consumo de cimento. Com resistência à compressão de 39,43 MPa, a melhor eficiência foi do traço com relação miúdo/cimento de 1,0. Mikami (2022) estabelece para uma relação agregado miúdo/cimento de 0,4.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação de uma dosagem otimizada, a fim de contribuir para o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de moldagem de concreto permeável utilizando areia reciclada como agregado miúdo. Dessa forma, permitindo a avaliação da eficiência do material pouco explorado como forma de reduzir o consumo de cimento e promover uma abordagem mais sustentável na construção civil.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o impacto da inclusão de agregado miúdo reciclado nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, com o intuito de verificar a conformidade com os critérios normativos para pavimentos permeáveis.

### 1.1.1 Objetivos específicos

a) Avaliar o impacto do agregado miúdo reciclado na demanda de água da mistura do concreto permeável;

b) Analisar a influência do agregado reciclado na dosagem do concreto permeável por meio do Método do Grau de Compactação;
c) Verificar o comportamento mecânico e hidráulico do concreto permeável em função do teor de agregado miúdo;
d) Avaliar a conformidade das misturas de concreto permeável com os critérios normativos nacionais;
e) Estudar a eficiência no consumo de cimento das misturas e seu comportamento com a adição de agregado miúdo reciclado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Fenômenos como as mudanças climáticas e o aquecimento global geraram diversas consequências ao meio ambiente, incluindo secas prolongadas, escassez de água, desertificação, degradação do solo, assoreamento de rios, afundamento do solo, intensificação do efeito estufa urbano e enchentes (Zhu *et.al.*, 2022). O grande desenvolvimento urbano sem que haja, na maioria das vezes, um planejamento urbano adequado e eficiente, faz com que diversos impactos ambientais, sociais e econômicos ocorram, sendo que a expectativa é que de que eles sejam mais frequentes e de escala maior devido às mudanças climáticas (Campos, 2021).

De acordo com Balbo (2020), com a intensificação da urbanização o destino das águas pluviais em termos de infiltração, evaporação e escoamento vem se modificando, como se observa na Tabela 1, à medida em que se altera a condição do solo, há uma mudança no caminho percorrido pelas águas fluviais.

Tabela 1 - Frações (em porcentagem) de destino de águas pluviais no ambiente

| **Tipo/ Condição de área superficial** | **Evapotrans - piração** | **Infiltração Superficial** | **Infiltração Profunda** | **Escoamento Superficial** |
|---|---|---|---|---|
| Cobertura natural | 40 | 25 | 25 | 10 |
| 10%-20% impermeabilizada | 38 | 21 | 21 | 20 |
| 35%-50% impermeabilizada | 35 | 20 | 15 | 30 |
| 75-%100% impermeabilizada | 30 | 10 | 5 | 55 |

Fonte: Livro Pavimentos de concreto permeáveis; (2020)

Observa-se que com uma cobertura natural a infiltração superficial é de 25%, já para um solo com 75% a 100% de área impermeabilizada, comum nos grandes centros urbanos, esse número cai para 10%, menos que a metade da inicial. Quanto mais impermeabilizado o solo se torna, consequentemente haverá elevação no escoamento superficial, o qual ocasiona alagamentos e inundações.

Segundo o Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023 – Informe, publicado pela ANA em 2024, mais de 1,5 milhões de pessoas sofreram efeitos de cheias (alagamentos, enxurradas e inundações) no Brasil em 2022. No mesmo ano, foram registrados 32 óbitos devido a cheias no país. Torna-se um problema hídrico que traz danos sérios à população, como: morte, enfermidade, doenças e desaparecimentos (ANA, 2018).

Em vista disso, a produção de sistemas que auxiliem no alívio da ocorrência desses fenômenos, o pavimento de concreto permeável se torna um importante objeto de estudos para mitigar os efeitos que um solo mais impermeabilizado nos grandes centros urbanos no Brasil. A sua execução diminui a vazão de pico e o volume de escoamento, retardando o tempo de vazão de pico, auxiliando o ciclo hidrológico (Silva, 2021)

O concreto permeável auxilia na drenagem, controlando e gerenciando o fluxo de água, transmitindo-o para o subleito ou compartimento de armazenagem, mitigando assim inundações e contribuindo com o sistema de drenagem pluvial (Huang *et al.*, 2023). Seu uso pode ser variado, como em estacionamentos, calçadas, pavimentos de tráfego leve, pisos de parques e em taludes de pontes (Adresi, 2023).

A construção civil desempenha um papel essencial no panorama econômico do Brasil, gerando uma grande quantidade de empregos e desenvolvimento, ao mesmo tempo, provoca uma expressiva geração de resíduos. Em 2002 houve a homologação da Resolução Conama 307 (Brasil, 2002), que determinou a obrigação de geradores de resíduos públicos e privados deveriam possuir um plano de gestão de resíduos de construção civil, denominado PGRCC. Em 2010, segundo um estudo da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, a PNSB (IBGE, 2010), dos 5.564 municípios brasileiros, 4.031 municípios (72,44%) apresentavam algum tipo de serviço de manipulação dos RCC. Porém, apenas 392 destes municípios (9,7%) possuíam alguma forma de processamento dos RCC.

No Brasil, em 2020, a geração de RCD foi 100 milhões de toneladas, destas, a região sudeste foi responsável por 44,5 milhões de toneladas (44,5%) e o restante,

regiões Norte, Sul, Centro-Oeste e Nordeste, tiveram uma geração de 55,5 milhões de toneladas (55,6%). Esta quantidade, mesmo que de toda ela, seja revertida em agregados reciclados, não representaria mais que 20% de toda a demanda por agregados naturais na construção civil. Deste modo, a reciclagem não irá substituir a mineração de agregados, porém, irá minimizar a utilização de minério bruto aliada a um menor dano ambiental (ABRECON, 2020).

Além disso, com o aumento anual do consumo de agregado na construção civil é iminente a necessidade de buscar-se novos tipos de agregados a serem utilizados. No ano de 2023 o consumo de agregado foi de 654 milhões de toneladas, 272 milhões de toneladas para o agregado graúdo, brita e 382 milhões de toneladas para o agregado miúdo (ANEPAC, 2024).

Fazendo o comparativo de dados entre o consumo de agregado e geração de RCD dentro da construção civil, percebe-se que há a disponibilidade de espaço para a destinação desses resíduos dentro do setor. Diante disso, o estudo da dosagem de agregado miúdo reciclado no concreto poroso se torna uma importante área de pesquisa, do mesmo modo que diminui o uso de cimento, resultando numa menor geração de $CO_2$.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL

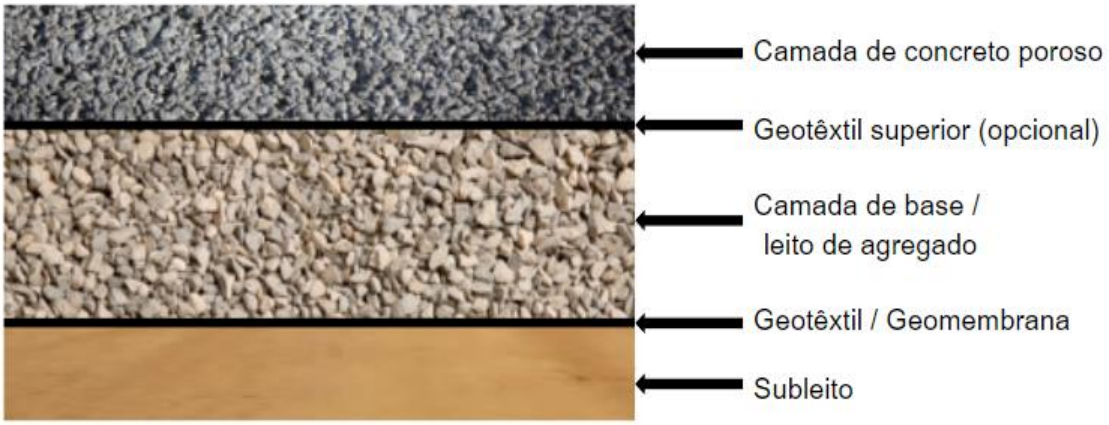
O pavimento permeável é uma estrutura que compreende materiais com vazios contínuos, suficientes para permitir a passagem de água da superfície para camadas inferiores (ACI, 2010). Martins (2015) considera o pavimento permeável uma superfície drenante que promove a infiltração, armazenamento e percolação total ou parcial da água, sendo escoada para o reservatório temporário de sua estrutura e após, sendo infiltrada pelo solo. A NBR 16416 (ABNT, 2015) destaca que o pavimento permeável não deve apenas permitir o escoamento de água por sua matriz, mas também deve resistir a solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento.

Figura 1 - Pavimento de concreto permeável

Fonte: Marchioni *et al*., 2013.

A seção transversal típica de um pavimento permeável está representada na Figura 2. Ela é composta pela camada de concreto permeável, geotêxtil superior, base do agregado, geomembrana e o subleito. O autor ressalta que podem existir duas camadas onde o geotêxtil pode ser inserido, sendo a geomembrana inferior, especificamente, impermeável ou não, variando de acordo com o objetivo, se a infiltração no subleito for necessária ou se caso não haja a necessidade de infiltração.

Figura 2 - Típica seção do sistema do pavimento permeável




Fonte: Adaptado de: Chandrappa *et al*., 2016.

O pavimento permeável pode ser classificado em três modelos diferentes, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), de acordo com o nível de infiltração e tipo de solo:

a) Infiltração total: sistema em que toda a água percola entre os vazios do pavimento e chega ao subleito;
b) Infiltração parcial: sistema em que uma fração da água infiltra no subleito e outra fica armazenada na matriz porosa escoando depois para o subleito através de drenos;
c) Sem infiltração: sistema pelo qual a água precipitada fica momentaneamente armazenada na estrutura, para depois, ser removida por meio de drenos.

Dentre as vantagens do seu uso, podem se destacar:

a) amenização do efeito ilha de calor e de ruídos causados pelo contato dos pneus automotivos (Xie *et al*., 2019);
b) redução do pico de cheias (Tucci, 2012);
c) recarga do lençol freático, controle de erosão do solo, filtragem de poluentes, redução de derrapagem em pistas (Suzuki; Azevedo; Junior, 2013);
d) controle de escoamento de águas pluviais, eliminação de necessidade de áreas para retenção de água (ACI, 2010).

## 2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

Caracterizado por elevados índices de vazios, o concreto permeável é um material poroso que permite a percolação da água através de sua matriz, com sua composição moldada por aglomerantes, agregados e água (Coelho; Rocha, 2019). A sua aplicação como pavimento permite o melhor escoamento superficial da água da chuva, deste modo atendendo às crescentes demandas ambientais (Tennis; Leming; Akers, 2004). Segundo Martins (2015), a superfície drenante dos pavimentos permeáveis facilita a infiltração da água de chuva, que é armazenada temporariamente na camada de base antes de ser infiltrada no subleito. Não estritamente ligado à função de escoamento, esse sistema também é capaz de reduzir o barulho gerado pelo impacto entre pneu e pavimento em pistas de rolamento, podendo ser empregado em rodovias como barreira sonora (Kim; Lee, 2010).

Figura 3 - Demonstração da funcionalidade do concreto poroso

Fonte: os autores.

Ele se difere do concreto convencional pela presença de poros macroscópicos em sua estrutura, gerados pela acomodação entre os agregados graúdos, e conectados de forma a conduzir água em seu interior (Sumanasooriya; Neithalath, 2011). A utilização de concretos permeáveis como alternativa para melhora na drenagem superficial tem crescido significativamente e, segundo Adresi (2023), tais investimentos apresentam grande potencial de sustentabilidade e rentabilidade para o futuro.

No estado fresco, a mistura de concreto permeável possui um *slump* praticamente nulo e uma consistência seca. Após ser lançado e passar pelo processo

de cura, o sistema apresenta uma superfície texturizada, e necessita de atenção especial ao processo de compactação e vibração para garantir a eficácia das suas propriedades (Tennis; Leming; Akers, 2004).

## 2.3 PROPRIEDADES

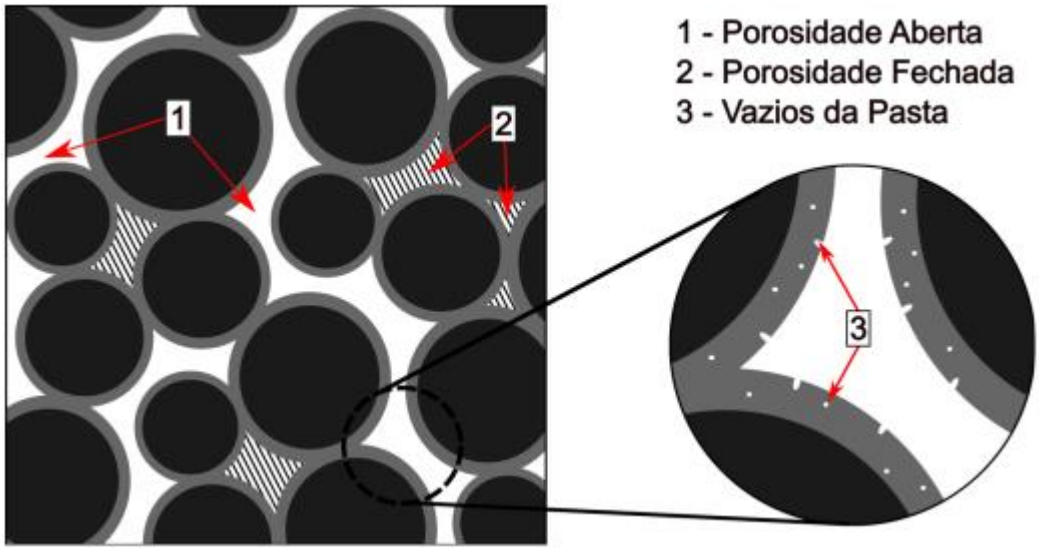
### 2.3.1 Porosidade

Estritamente ligada à capacidade do concreto poroso de escoar água, a porosidade é a propriedade que mede a quantidade de vazios existentes na estrutura, sendo normalmente mantida entre 15 e 35% (ACI, 2023). É considerada por Bechara (2017) como a principal característica do concreto permeável, já que possui uma relação de influência muito grande nas demais propriedades observadas. Segundo o autor, maiores porosidades resultam em uma maior taxa de infiltração e, em contrapartida, reduzem significativamente os valores de resistência à compressão. Considerando que a porosidade é a proporção de vazios em relação ao volume total, para se obter um concreto com padrões utilizáveis, é de suma importância que a porosidade seja devidamente equilibrada na mistura.

Conforme exposto por Mikami (2022) a porosidade total do concreto permeável pode ser dividida em três parcelas:

a) Vazios da pasta de cimento: poros naturalmente formados pelo processo de cura do cimento em hidratação;
b) Porosidade aberta ou efetiva: parte conectada de vazios capazes de escoar água em suas interligações. São formados pela ausência ou pouca quantidade de finos na mistura, não preenchidos pela pasta de cimento;
c) Porosidade fechada ou isolada: vazios formados entre os agregados graúdos, porém, não possuindo ligação com outros poros, de forma a não contribuir para o escoamento de água.

Figura 4 - Representação da porosidade aberta, fechada e vazios da pasta




Fonte: Mikami (2022).

De acordo com Adresi (2023) a porosidade tem uma ligação direta com a permeabilidade, quanto maior o grau de porosidade de uma mistura, mais benéfico será em termos de permeabilidade, da mesma forma para a densidade que sofre uma redução em seu valor. O autor complementa que ao passo que a porosidade evolui, a densidade diminui e o inverso é verdadeiro, menor porosidade leva à maior densidade.

Um estudo de Ibrahim *et al*. (2014) mostra o efeito da porosidade na permeabilidade, nele à medida que se aumentava a porosidade a permeabilidade acompanhava, com resultados de permeabilidade superiores a 2,0 cm/s e porosidade ultrapassando os 37%.

### 2.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do concreto permeável que permite a passagem de água por meio de sua estrutura, sendo associada à porosidade do material, ao diâmetro do agregado e à proporção de pasta de cimento na mistura (Vale *et al*., 2022).

Em se tratando de pavimentos permeáveis, os termos “permeabilidade” e “infiltração” são erroneamente confundidas de maneira frequente, ao passo que a permeabilidade é uma característica inerente ao material e define a facilidade da passagem da água através do concreto permeável, já infiltração, por outro lado, está

diretamente ligada ao termo “taxa de infiltração” que é o parâmetro para quantificar a velocidade de entrada d’água no meio poroso por meio de sua superfície.

Outro parâmetro importante a ser considerado na permeabilidade é a condutividade hidráulica que associa a velocidade de descarga d’água no meio submetido a carga hidráulica. De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), a permeabilidade é medida no estado saturado do material que, sob determinada pressão, é capaz de percolar água. A denominada condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade tem seu valor variando entre 0,2 e 1,2 cm/s, em estudos já realizados (Mikami, 2022; Tennis; Leming; Akers, 2004).

A fim de garantir a eficiência de elementos de concreto poroso é necessário que seja feita a manutenção do pavimento já que, com o passar do tempo, os poros tendem a ser obstruídos. Dessa forma, garante-se que seja mantida a efetividade desse parâmetro e a consequente funcionalidade do material (Alencar, 2013).

### 2.3.3 Resistência mecânica

É importante que os pavimentos possuam resistência mecânica a fim de suportar os esforços aos quais são submetidos. Sabe-se que, ao empregar o concreto poroso em um pavimento, este tende a ter sua resistência mecânica reduzida em função do aumento de sua permeabilidade. Sendo assim, é importante compreender a forma como estas propriedades estão interligadas, a fim de que a estrutura seja dimensionada corretamente e atenda às necessidades do ambiente onde será utilizada (Huang *et al.*, 2009). Uma das propriedades que também influenciam a resistência mecânica é a porosidade, que por sua vez, são inversamente proporcionais (ACI, 2010).

Para o entendimento do comportamento do concreto poroso, é necessário entender suas principais propriedades mecânicas: resistência à compressão e resistência à flexão. A resistência à compressão caracteriza a quantidade de tensão que o concreto conseguirá suportar em sua seção transversal sem que fissure. A resistência à flexão, por sua vez, determina a quantidade máxima de tensão suportada pelo material quando submetido à deformação em extensão (ABNT, 2010, 2015; ACI, 2010; Bechara, 2017).

Muitos fatores influenciam o valor da resistência mecânica do concreto poroso, podendo ser citados a porosidade, a relação agregado/cimento e o grau de

compactação. A resistência à compressão pode variar em uma faixa ampla de 3,5 a 28 MPa, enquanto a resistência à flexão se limita a valores de 1,0 a 3,8 MPa (Tennis; Leming; Akers, 2004).

De acordo com o relatório ACI 522-R (ACI, 2010), a resistência pode ser prejudicada caso haja uma falha de cobrimento do agregado gerando uma falta de pasta. Por outro lado, o excesso de pasta pode reduzir significativamente a porosidade, pelo tamponamento dos vazios. Ainda conforme o relatório, a resistência à flexão está diretamente ligada à resistência à compressão e, portanto, a porosidade exerce impacto inversamente proporcional, de modo similar o fato é observado na resistência à compressão. Uma adição de agregado miúdo no concreto poroso faria com que as resistências aumentassem, no entanto, afetaria a porosidade do material.

Uma resistência superior do concreto permeável depende da energia de compactação aplicada, do critério aplicado nas relações água/cimento e agregado/cimento e da mineralogia do agregado (Bechara, 2017). A mineralogia do agregado afeta diretamente as propriedades do concreto uma vez que eles fornecem a estrutura que resiste às cargas, a composição do agregado afetará na dureza, resistência à compressão, porosidade e absorção de água (Mehta; Monteiro, 2014).

### 2.3.4 Intensidade de consumo de cimento

Um indicador representativo acerca do concreto permeável é a Intensidade de Consumo de Cimento (ICC), definido por Damineli (2010), em seu estudo sobre substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, como um método utilizado para avaliar a eficiência no uso do cimento em composições de concreto. Ele mede a quantidade de cimento consumida por unidade de resistência mecânica desenvolvida no concreto, expressando a relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão do concreto.

Esta ferramenta promove a sustentabilidade na construção civil, uma vez que o cimento é o componente do concreto com maior impacto ambiental, especialmente devido às emissões de $CO_2$ durante sua fabricação. Um baixo valor do índice indica uma maior eficiência na dosagem e o oposto, um alto valor aponta um consumo excessivo de cimento para a resistência obtida, indo contra o objetivo de reduzir o impacto ambiental.

### 2.3.5 Dosagem

Dentre as metodologias propostas na literatura para a dosagem de concreto poroso, é importante que a escolha do método a ser utilizado leve em consideração as características especiais que essa mistura possui. Deve-se considerar a dificuldade em analisar diferentes tamanhos e distribuições granulométricas dos agregados, bem como a irregularidade na energia de compactação e a pouca variedade de materiais a serem utilizados, sendo que todos estes parâmetros divergem do concreto convencional, tornando difícil a análise exata desse material (Mikami, 2022).

Uma das metodologias usadas para a dosagem do concreto permeável é a de Castro *et al.* (2009), que propõem uma equação que leva em conta a relação água/cimento e o número de vazios presentes após a pega. Com amostras de relação a/c de 0,29 a 0,41, e compactação do concreto com rolo pesado, o método traz a análise de correlações de número de vazios com a taxa de infiltração, densidade e resistência à flexão. O método define que, quanto menor o valor da relação a/c, menor a resistência e maior o desprendimento dos agregados da superfície, ao mesmo tempo que as misturas com uma relação água/cimento maior obtiveram uma notável redução no número de vazios.

Boutouil *et al*. (2014), propuseram um método analítico de dosagem de concretos permeáveis no qual o volume da pasta de cimento é dividido pela área superficial dos agregados a fim de medir a espessura do excesso de pasta. Além disso, é criado um fator de escala que ditará a melhor forma de espalhar a pasta de acordo com o tamanho do agregado, do mesmo modo que é proposto um teste de drenagem para especificar a máxima relação água/cimento para que a pasta não flua para camada inferiores do pavimento devido a ação da compactação.

O método proposto por Mikami (2022), denominado método do Grau de Compactação, tem origem na falta de métodos que fixem uma porosidade de projeto. A metodologia chamada Grau de Compactação consiste, de forma simples, em correlacionar as propriedades mecânicas e hidráulicas do material com parâmetros de dosagem, fazendo o uso de relações volumétricas dos materiais que integram o traço do concreto, a fim de controlar a porosidade no estado fresco e assimilar como a sua variação afetará no desempenho do concreto, solucionando o problema da falta de padronização de outros métodos, sem restrições de tipos de agregados, sendo assim, uma dosagem mais precisa.

No mesmo estudo, Mikami (2022) propôs também a inclusão da areia, já que seu método proporciona um ajuste para agregados disponíveis na região, ajustes de volume de pasta de cimento para cada mistura particularmente, consistência da pasta e energia de compactação. Com o implemento da areia natural, Mikami (2022) para teores de 0,0, 0,2 e 0,4 houve uma redução de 21% na redução de consumo de cimento com grau de compactação similar.

## 2.4 INCORPORAÇÃO DE AREIA NO CONCRETO POROSO

Com o objetivo de reduzir o consumo de cimento em concreto poroso a adição de areia como agregado miúdo em sua mistura se mostra uma alternativa vantajosa. A adição de areia pode aumentar significativamente a sua resistência sem que haja uma perda expressiva da sua porosidade e infiltração. Contudo, é necessário atentar-se à quantidade de areia adicionada, já que esta incorporação possui parâmetros ainda não muito explorados no que diz respeito à redução da sua permeabilidade (França; Costa, 2021).

Segundo Ramos (2018), misturas de concreto permeável com adição de agregado miúdo são capazes de atingir ou até mesmo superar valores comumente tratados na literatura que se aproximam de 25 MPa de resistência à compressão. Além disso, o autor complementa que a adição de até 10% de agregado miúdo em relação à massa total de agregados não apresenta uma redução prejudicial nos valores de permeabilidade das misturas porosas.

Bonicelli *et al.* (2015), por sua vez, evidenciam que a adição de areia ao traço proposto também possui relação direta com a razão a/c estipulada. Os autores ainda enfatizam a variação significativa de parâmetros de comparação dependendo da energia de compactação utilizada. Entretanto, é perceptível que a adição de areia à mistura traz mais benefícios ao sistema no quesito consistência e consumo de cimento.

Conforme mostrado por Skrovonski e Carneiro (2023), em seus resultados na pesquisa focada no aprimoramento de misturas para a produção de peças de concreto poroso por dosagem de agregado miúdo, a sua adição se mostrou muito vantajosa, diminuindo o uso de cimento Portland do traço piloto de 423,70 kg/m³ para 224,1 kg/m³ no traço de 1,0 miúdo/cimento, uma redução de mais de 50% mantendo ainda as

propriedades mecânicas. O estudo ainda cita o Método do Grau da Compactação de Mikami (2022), ressaltando seu método, aplicações e resultados.

## 2.5 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Os Resíduos da Construção Civil (RCC) constituem o principal componente do fluxo de resíduos gerados pelas sociedades modernas, apresentando um crescimento diretamente proporcional ao processo de urbanização global (Zhang *et al*., 2023). A indústria da construção civil gera uma grande quantidade de resíduos que quando descartados de forma inadequada, causam sérios problemas ambientais e sociais (Lima *et al*., 2022).

De acordo com uma pesquisa, de 2023, chamada de Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, comandada pela Associação Brasileira de Resíduos Sólidos no Brasil, foram geradas 45 mil toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) em 2022 no Brasil. Tal fato tem se tornado alvo de estudos do desenvolvimento de técnicas que minimizem os impactos da construção civil gerados à natureza.

Diante disso, a utilização de agregados provenientes de resíduos de construção e demolição, o RCD, mostra-se uma alternativa que vem sendo amplamente estudada pela engenharia a partir da década de 2000, seja como agregado graúdo ou miúdo (Ângulo; Figueiredo, 2011). Tal alternativa passou a receber maior atenção no Brasil quando o Conselho Nacional do Meio Ambiente definiu que os geradores de entulhos deveriam ser os responsáveis pela destinação destes, bem como deveriam estabelecer procedimentos e critérios para que o impacto gerado pela construção civil fosse minimizado (CONAMA, 2002). A resolução N° 307 classifica os resíduos de construção de acordo com a sua composição:

a) Classe A: resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassa e concreto; resíduos de processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios e outros) produzidos nos canteiros de obras.

b) Classe B: São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
c) Classe C: São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.
d) Classe D: São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (tintas, solventes, óleos e outros) ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos (clínicas radiológicas, instalações industriais e outros) enquadrados como classe I da ABNT NBR 10004.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) utiliza das definições previstas pelo CONAMA para classificar os agregados provenientes de resíduos da construção civil em três tipos, sendo que apenas os resíduos de classe A podem ser utilizados como agregado graúdo em concretos:

a) Agregado de resíduo cimentício (ARCI): predominantemente constituído por materiais cimentícios, podendo incluir baixos teores de material cerâmico;
b) Agregado reciclado de concreto (ARCO): predominantemente constituído por resíduos de concreto;
c) Agregado reciclado misto (ARM): possuem em sua constituição uma mistura de materiais cimentícios e cerâmicos.

Outra contribuição importante quanto ao uso de agregado reciclado na indústria de construção civil é quanto à emissão de $CO_2$. Um estudo realizado por Casarin *et al*., (2021) onde os autores propõem analisar as emissões de $CO_2$ de um pavimento de concreto permeável, comparando o agregado de RCD com o natural teve resultados que indicaram que de modo geral o agregado de RCD se mostrou mais eficiente em relação ao natural em emissão total de $CO_2$. O uso de agregados reciclados de construção e demolição em materiais de construção, como concretos e argamassas, ajuda a reduzir o impacto causado pela indústria da construção civil, já que capturam o $CO_2$ da atmosfera e utilizam resíduos que seriam jogados em aterros (Antônio, 2018).

Como alternativa para aliar a economia proveniente da utilização de agregados reciclados e a sustentabilidade do concreto permeável, existem autores como Candian Filho *et al.* (2022), Deleprani (2022), Kazmierczak e Tavares (2016) cujo trabalho

avaliou a possibilidade de substituição do agregado graúdo de origem natural para o agregado proveniente de RCD. A reciclagem e reutilização de RCC é uma estratégia eficaz para reduzir a exploração de recursos naturais, minimizar a destinação em aterros e prevenir problemas ambientais e de saúde (Freitas, 2023).

Apesar das obras citadas, existe na literatura uma lacuna no que diz respeito à incorporação de areia reciclada no concreto poroso, já que esse tipo de pavimento era conhecido justamente pela ausência de agregado miúdo. Incorporar areia na mistura a torna mais econômica sem que esta tenha suas propriedades principais prejudicadas significativamente, como já visto anteriormente neste estudo, com a redução de cimento. Dessa forma, é necessário que sejam realizados estudos que avaliem a viabilidade de adição de areia provenientes de RCD ao concreto poroso a fim de obter uma mistura mais eficiente no aspecto sustentável e ainda satisfatória em parâmetros normativos.

### 2.5.1 Propriedades do agregado miúdo reciclado

De acordo com Coelho (2023) o agregado reciclado de concreto possui uma camada que cerca o agregado, essa característica faz com que o material gerado tenha propriedades que diferenciem do agregado natural, como a porosidade, absorção e densidade. Estudos demonstram que a utilização de agregados reciclados de construção e demolição (RCD) em concretos resulta em um aumento da absorção de água, da porosidade e do índice de vazios, quando comparados com agregados naturais. Essas características levam à redução da trabalhabilidade das misturas, à necessidade de um maior consumo de cimento, um aumento na quantidade de água resultando em uma diminuição da resistência mecânica do concreto (Angulo, 2005; Leite *et al*., 2002; Lovato, 2007).

No estudo de Frotté *et al*. (2017) foi analisada as propriedades físicas e mecânicas em relação a substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. Foram realizadas diversas correlações a partir de três traços, o traço referência e outros dois com substituição de 25% e 50% de agregado reciclado. Quanto à caracterização do agregado, o teor de material pulverulento do agregado natural foi aproximadamente de 75% maior que o do agregado natural miúdo. No que se refere a massa específica houve uma diferença de 3,4% do agregado miúdo reciclado para o agregado miúdo natural. Para a absorção de água

foi encontrado um valor de 12,35%, estando dentro do limite de 17% requerido pela NBR 15116 (2004). No que diz respeito às propriedades do concreto, o índice de vazios no estado endurecido evoluiu do traço referência para o de 25% e 59% de substituição. Acerca da resistência à compressão axial teve uma diminuição na resistência de 22% e 13% para as substituições de 25% e 50% em relação ao traço de referência, respectivamente. Já para a resistência à tração por compressão diametral na substituição de 25% resultou um valor inferior para o traço referência e a substituição de 50% não trouxe prejuízos para a resistência.

Nas pesquisas de análise de propriedades mecânicas do concreto de alta resistência com agregados reciclados de RCD de Ditz *et al*., (2019), nos testes em que o agregado natural miúdo e graúdo foi substituído parcialmente por agregados reciclados de RCD obteve-se uma redução na resistência de compressão, justificada pela alta porosidade deste material.

No trabalho de Silva (2023), explorando a eficiência resíduo de concreto usado como agregado miúdo em uma reciclagem cíclica obteve-se um aumento da relação água/ cimento durante a produção das argamassas, o que, consequentemente, acarretou um valor inferior de massa específica dos agregados reciclados. O mesmo aumento na relação água/cimento foi notada no trabalho de Fucale *et al*. (2014), no qual, à medida que a proporção de agregado reciclado aumentava a relação a/c progredia, em decorrência disso, houve um aumento da quantidade de vazios no concreto, a massa específica decresceu, assim, tendo um aumento da absorção de água.

Todavia, antes de serem reutilizados, é necessário que os resíduos passem por um processo de beneficiamento, passando por processos de separação, britagem, peneiramento, entre outros. Normalmente os equipamentos utilizados para beneficiamento de agregados naturais também podem ser utilizados para o tratamento do RCD por se tratar majoritariamente de materiais de mesma natureza (Lovato, 2007).

Para a utilização de areia reciclada na produção de peças de concreto, algumas das propriedades a serem estudadas são citadas abaixo:

a) Granulometria: normalmente obtida por ensaio de peneiramento, capaz de influenciar diretamente na trabalhabilidade do material obtido (Mehta; Monteiro, 1994);

b) Massa Específica: provavelmente pela maior porosidade do material gerado, Lima (1999; *apud* Lovato, 2007) foi capaz de mapear valores menores de massa específica de agregado miúdo proveniente de RCD em comparação aos de agregados naturais;
c) Absorção de água: ainda tratando-se da natureza porosa dos materiais, as misturas contendo resíduos de construção e demolição tendem a ter maior absorção de água, influenciando no fator a/c calculado para a mistura Lima (1999; *apud* Lovato, 2007);
d) Teor de material pulverulento: influência direta com redução da trabalhabilidade, densidade e aumento de ar incorporado (Kruger *et al*., 2020);
e) Fração de argamassa aderida: causa o aumento da absorção de água nos agregados reciclados, deste modo, contribuindo para que a resistência à compressão diminua (Ferreira *et al*., 2019).

Sob outra perspectiva e assemelhando-se à proposta deste trabalho, Hood (2006), em sua tese de RCD como agregado miúdo reciclado para confecção de blocos de concreto para pavimentação, fez um estudo do consumo de cimento em relação à resistência à compressão. Com 5 traços, o traço referência e os outros, com substituição de 25, 50, 75 e 100%, o estudo trouxe como resultado um consumo de cimento 15% menor quanto ao maior teor de substituição. O autor ressalta que isso não significa uma viabilidade econômica, deve-se analisar em relação à resistência obtida. Para cada MPa de concreto, a porcentagem de consumo de cimento necessária para os traços 0 e 25% houve um aumento variando até 17%, para os traços restantes obteve-se um aumento de até 180% em relação à referência. Assim, a quantidade de cimento para cada MPa evolui quanto maior o teor de agregado miúdo reciclado sendo, neste estudo, benéfico para no custo final dos blocos.

Outra contribuição importante quanto ao uso de agregado reciclado na indústria de construção civil é quanto à emissão de $CO_2$. Um estudo realizado por Casarin *et al*., (2021) onde os autores propõem analisar as emissões de $CO_2$ de um pavimento de concreto permeável, comparando o agregado de RCD com o natural teve resultados que indicaram que de modo geral o agregado de RCD se mostrou mais eficiente em relação ao natural em emissão total de $CO_2$. O uso de agregados reciclados de construção e demolição em materiais de construção, como concretos e argamassas, ajuda a reduzir o impacto causado pela indústria da construção civil, já

que capturam o $CO_2$ da atmosfera e utilizam resíduos que seriam jogados em aterros (Antônio, 2018).

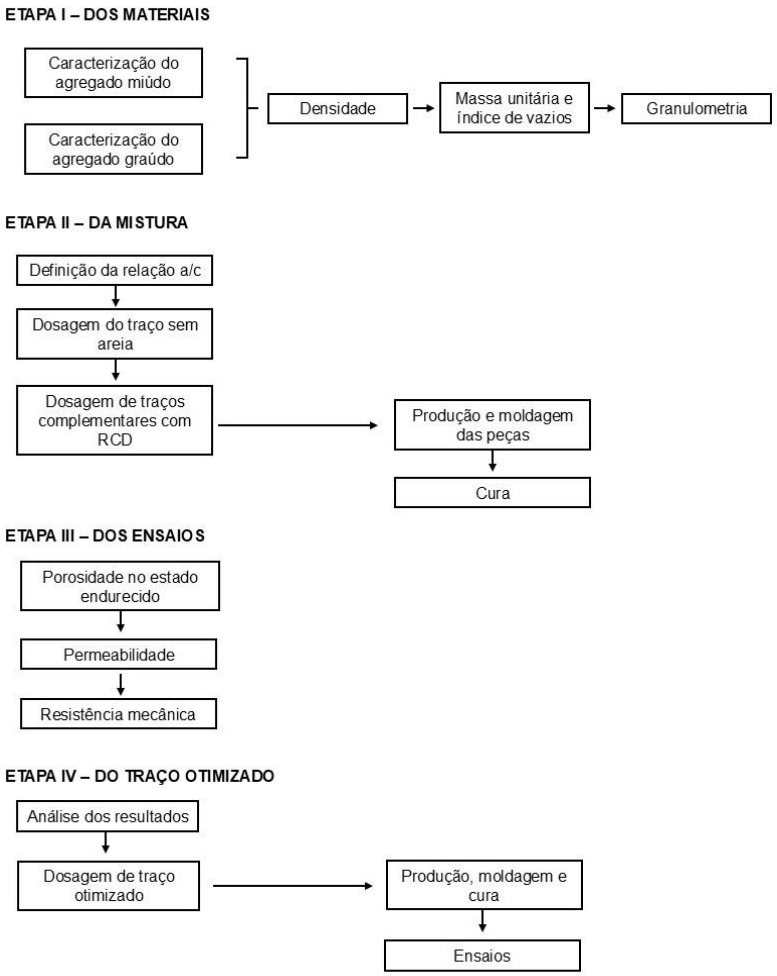
Entende-se, através do exposto, que existe a possibilidade de incorporação de agregado miúdo reciclado em misturas de concreto permeável, buscando a obtenção de uma mistura com menor consumo de cimento Portland. Entretanto, esse sistema por si só, demanda grande quantidade de água para atingir uma boa coesão, de forma que, ao fazer o uso de material reciclado, é esperado o aumento ainda mais significativo da relação a/c para o traço dosado, a fim de que seja obtida uma mistura homogênea e com boa interação entre a pasta e as partículas de agregado. Havendo o aumento na quantidade de água incorporada à mistura, entende-se também que possa ser causada uma redução significativa na resistência mecânica do material, já que serão formados mais poros em sua estrutura após o processo de cura. Sendo assim, deve ser compreendido o comportamento das demais propriedades estudadas, tornando possível a otimização da dosagem e consequente melhoria de resultados e de eficiência do sistema.

# 3 METODOLOGIA

A fim de que os objetivos propostos no presente trabalho fossem atingidos, o planejamento experimental foi dividido em 3 etapas, as quais estão expostas na Figura 5. Na Etapa I os materiais foram caracterizados separadamente, a fim de compreender as suas principais características físicas e como estas poderiam afetar as propriedades do concreto permeável. Em seguida, na Etapa II foi feita a dosagem da mistura e a produção dos corpos de prova com o devido processo de cura.

Ainda, conforme disposto na Figura 5, a Etapa III consistiu na realização dos ensaios, análise dos resultados obtidos e avaliação da possibilidade de que fosse encontrada uma dosagem diferente das iniciais, com melhores resultados. Então, para conclusão do trabalho, na Etapa IV foi produzido um último traço com menor porosidade, o qual foi submetido aos mesmos ensaios propostos.

Figura 5 - Fluxograma de execução de projeto




Fonte: os autores.

Seguindo as etapas mostradas acima, o procedimento para a análise dos dados obtidos em laboratório foi elaborado através do monitoramento das principais propriedades das amostras e como estas são influenciadas em função da variação do teor de agregado miúdo da mistura. Para isso, foram definidos os traços iniciais com porosidade fixada em 25% e com variação no teor de agregado miúdo/cimento (m/c) sendo 0,0; 0,25; 0,5 e 0,75, resultando em um total de quatro misturas diferentes, conforme mostra a Tabela 2.

A partir das combinações apresentadas, foi possível compreender o comportamento da permeabilidade e resistência mecânica da mistura conforme as mudanças na sua composição. Através da avaliação do desempenho das amostras, foi proposta a execução de um novo traço, com teor m/c de 0,25 e porosidade de projeto igual a 20%, a fim de que fosse atingido o valor esperado de resistência em

amostras com adição de areia reciclada. Sendo assim, ao final do trabalho, foi moldado o quinto traço a partir da mesma metodologia, sendo submetido também aos ensaios de permeabilidade, resistência mecânica e porosidade (Tabela 2). Ainda, para a avaliação de parâmetro ambiental das amostras, foi realizada análise da relação entre o consumo de cimento e a resistência mecânica, permitindo a compreensão dos efeitos da quantidade de areia adicionada em cada traço.

Tabela 2 - Denominações, teores massa/cimento e porosidades das amostras

| NOME | M/C | POROSIDADE DE PROJETO (%) |
|---|---|---|
| A | 0,0 | 25 |
| B | 0, 25 | 25 |
| C | 0,5 | 25 |
| D | 0,75 | 25 |
| E | 0, 25 | 20 |

Fonte: os autores.

## 3.1 MATERIAIS

No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados para a confecção das peças os seguintes materiais: cimento do tipo CP II F-32, brita 0 (popularmente conhecida como pedrisco), areia reciclada do tipo ARCO, predominantemente composta por resíduos de concreto.

O agregado miúdo adicionado à mistura foi produzido em laboratório através de equipamento britador e caracterizado quanto às suas propriedades físicas de acordo com as normativas dispostas no

Quadro 1.

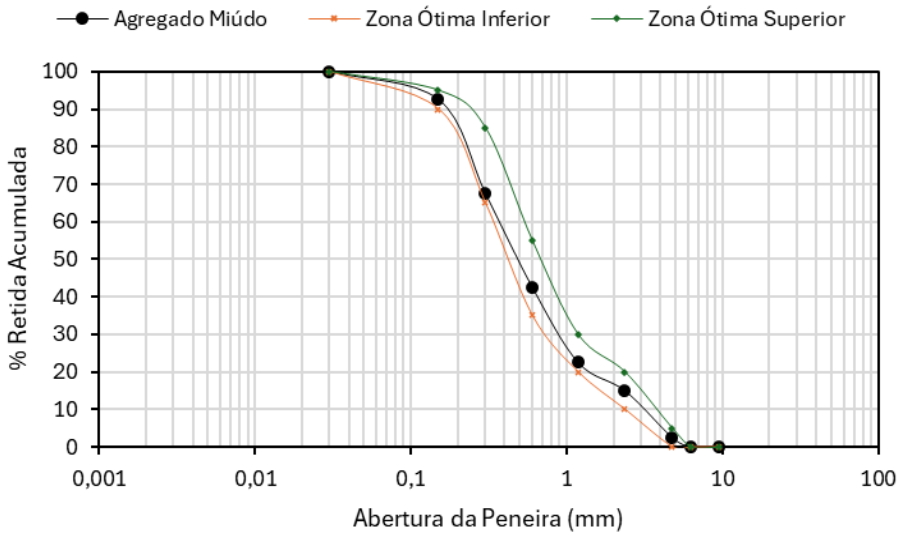
Quadro 1 - Propriedades físicas dos agregados miúdos

| PROPRIEDADE | REFERÊNCIA NORMATIVA |
|---|---|
| Distribuição granulométrica | NBR 17054 (ABNT, 2022) |
| Massa unitária e Índice de vazios | NBR 16972 (ABNT, 2021c) |
| Densidade | NBR 16916 (ABNT, 2021a) |

Fonte: os autores.

Os resultados obtidos para a composição granulométrica do material estão dispostos na Figura 6, enquanto os valores referentes à densidade e massa unitária estão descritos na Tabela 3.

Figura 6 - Curva granulométrica do agregado miúdo




Fonte: os autores

Tabela 3 - Caracterização física do agregado miúdo

| **Densidade (g/cm³)** | **Massa Unitária (g/cm³)** | | **Índice de Vazios (%)** | |
|---|---|---|---|---|
| | Estado Solto | Estado Compactado | Estado Solto | Estado Compactado |
| 2,08 | 1,41 | 1,47 | 31,92 | 29,12 |

Fonte: Os autores.

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0, viabilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa, tendo a composição granulométrica mínima mantida em até 4,75 mm, dados estudos preliminares realizados por Skovronski e Carneiro (2023) que apontaram resultados positivos através desse limite mínimo. As propriedades verificadas estão descritas, juntamente com suas metodologias, no Quadro 2.

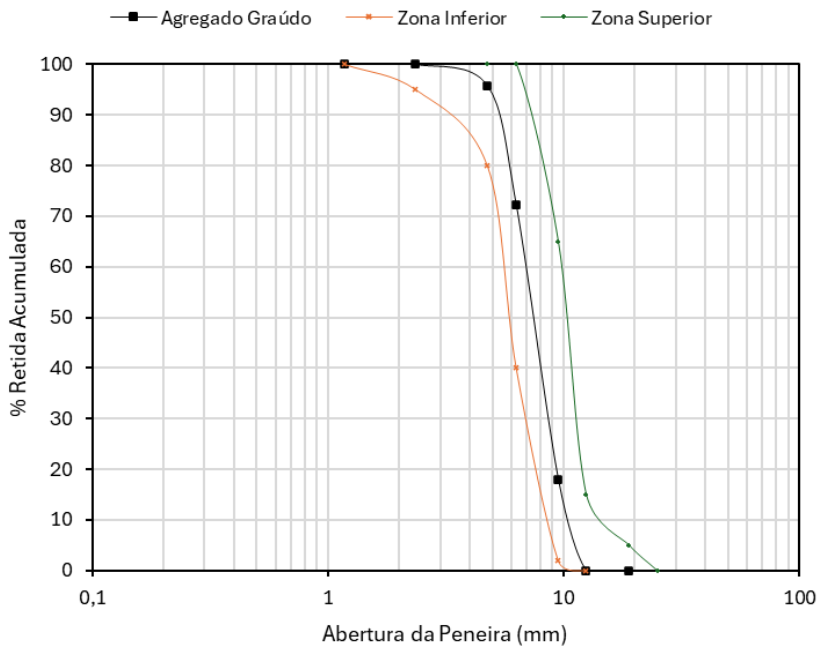
Quadro 2 - Propriedades físicas dos agregados graúdos

| PROPRIEDADE | REFERÊNCIA NORMATIVA |
|---|---|
| Distribuição granulométrica | NBR 17054 (ABNT, 2022) |
| Massa unitária e Índice de vazios | NBR 16972 (ABNT, 2021c) |
| Densidade | NBR 16916 (ABNT, 2021a) |

Fonte: os autores.

A curva granulométrica do agregado graúdo é apresentada na Figura 7, e as demais características físicas avaliadas são dispostas na Tabela 4 abaixo.

Figura 7 - Curva granulométrica dos agregados graúdos




Fonte: os autores.

Tabela 4 - Caracterização física dos agregados graúdos

| Densidade (g/cm³) | Massa Unitária (g/cm³) | | Índice de Vazios (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | Estado Solto | Estado Compactado | Estado Solto | Estado Compactado |
| 2,86 | 1,53 | 1,67 | 48,54 | 43,68 |

Fonte: os autores.

## 3.2 DOSAGEM

### 3.2.1 Escolha da relação a/c

A escolha do valor para a relação a/c foi realizada através de testes baseados na proposta de Nguyen *et al.* (2014), onde são testados diferentes valores de composição e, através da análise da consistência da pasta, o teor de água é escolhido.

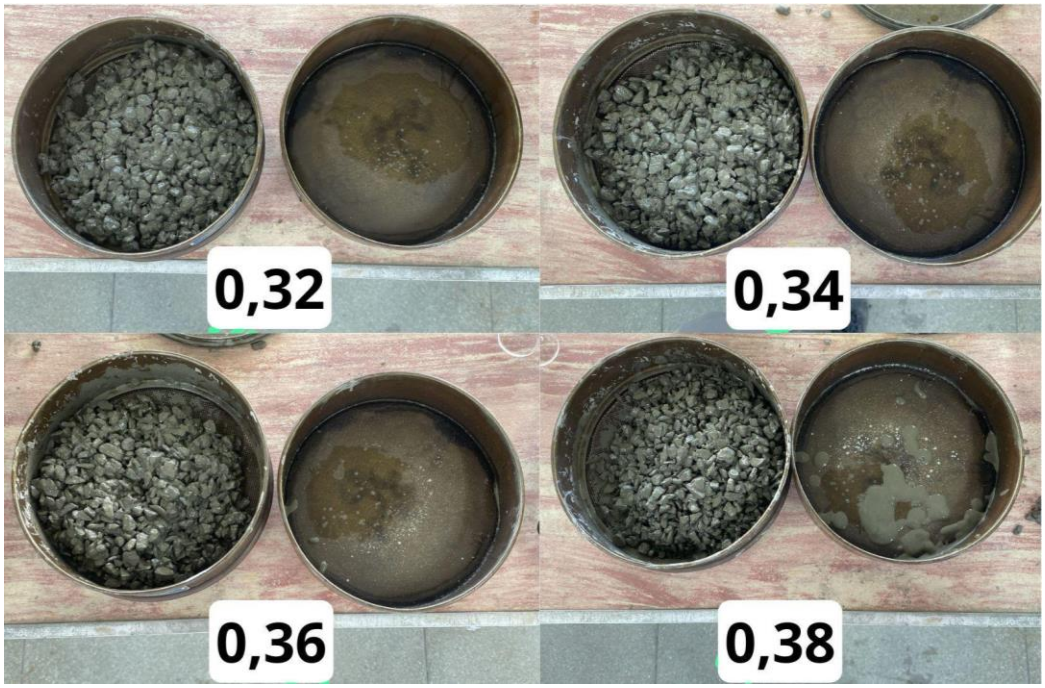
O método apresenta como base a premissa de que a pasta de cimento deve envolver o grão do agregado graúdo completamente, com consistência suficiente para não escoar pelos poros quando submetido à ação do vibrador mecânico.

Fundamentado por estudos preliminares ao trabalho, foi escolhido um traço base de 1:0,5:5,35 para os testes de consistência da pasta, tendo sido fixada a faixa de valores entre 0,32 e 0,40 para a escolha do fator a/c. Os testes foram realizados repetidas vezes, com aumento de 0,02 neste índice conforme as passagens pelo peneiramento, conforme apresentado na Figura 8.

Após a mistura dos materiais de forma manual, o concreto foi depositado em peneira com abertura de 1,18 mm, sendo vibrado por 15 segundos no vibrador mecânico a cada nova adição de água.

A análise para determinação do resultado é feita de maneira visual, sendo que o valor definido como ideal para cada teor de areia foi aquele que apresentou cobertura homogênea das partículas e pouco ou nenhum escoamento de pasta pelas aberturas.

Figura 8 - Testes de a/c por vibrador mecânico e peneiramento




Fonte: os autores.

A partir do método descrito, o ensaio foi repetido para todos os teores de areia definidos previamente, estando os resultados descritos na Tabela 5. É possível perceber o aumento do valor em 0,02 a cada adição de areia, sendo este comportamento esperado, já que a areia de RCD é um material fino e poroso, que tende a absorver água (Tavares, 2021).

Tabela 5 - Relação água/cimento escolhido para cada teor areia/cimento

| Traço | Teor m/c | Relação a/c |
|---|---|---|
| A | 0,0 | 0,36 |
| B; E | 0,25 | 0,38 |
| C | 0,5 | 0,40 |
| D | 0,75 | 0,42 |

Fonte: os autores.

### 3.2.2 Escolha do Traço

O método escolhido para a definição do traço piloto foi o método do Grau de Compactação, proposto por Mikami (2022). Este método consiste em desenvolver amostras com a porosidade pré-fixada através da análise do grau de compactação do agregado graúdo. Através desses cálculos, são considerados os poros existentes na mistura, e quais deles são efetivos na condutibilidade hidráulica.

Inicialmente foi adotado um valor do grau de compactação inicial (GC,i) para cada uma das porosidades desejadas, sendo esse valor definido através das características do agregado, o volume de pasta da mistura e o método utilizado no processo de compactação. Na sequência, é definida a massa unitária compactada (MUc) e a densidade seca do agregado, permitindo o cálculo do índice de vazios efetivo (Equação 1). Em seguida, foi feita a verificação da porosidade de projeto (Pd), o que permite o cálculo do Volume de Pasta (Vp) necessário para a mistura (Equação 2).

$$Vv,ef = \frac{dagg - MUc * Gc,i}{dagg} \quad (1)$$

$$Vp = Vv,ef - Pd \quad (2)$$

Sendo:
Vv,ef - Volume de vazios efetivo (%);
dagg - Densidade aparente do agregado no estado seco (g/cm³)
Vp - Volume de pasta de cimento (%);
Pd - Porosidade de projeto (%)

Feitas as estimativas, foi necessário calcular também os valores de consumo de cimento (Ccim) e consumo de agregado (Cagg), através das equações 3 e 4, respectivamente.

$$Ccim = \frac{Vp/100}{(1/dcim) + a/c + (m/c)/dagm} \quad (3)$$

$$Cagg = GC * MUc \quad (4)$$

Sendo:

Ccim - Consumo de cimento por volume unitário de concreto (g/cm³);
dcim - Densidade do cimento (g/cm³);
a/c - Relação em massa água/cimento;
m/c - Relação em massa agregado miúdo/cimento;
dagm - Densidade do agregado miúdo (g/cm³);
Vp - Volume de pasta de cimento (%);
Cagg - Consumo de agregado por volume unitário de concreto (g/cm³);
Gc - Grau de compactação do agregado graúdo;

Então, através das Equações 5 e 6 foram calculados os índices de agregado graúdo/cimento (g/c) e a estimativa de massa específica da mistura (Pf,est).

$$g/c = \frac{Cagg}{Ccim} \quad (5)$$

$$\rho f, est = (1 + \frac{1}{g/c} + \frac{a/c}{g/c} + \frac{m/c}{g/c}) * MUc * GC \quad (6)$$

Para o cálculo do traço piloto, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Dados de entrada e traço piloto

| **Parâmetro** | | **m/c = 0,0** |
|---|---|---|
| Grau de Compactação Inicial | GCi | 0,92 |
| Relação a/c | a/c | 0,36 |
| Volume de vazios efetivo (%) | Vv,ef | 48,44 |
| Porosidade de Projeto (%) | Pd | 25 |
| Volume de pasta (%) | Vp | 23,44 |
| Relação agregado/cimento | m/c | 0,0 |
| Consumo de cimento (kg/m³) | Ccim | 343,4 |
| Consumo de agregado graúdo (kg/m³) | Cagg | 1536,4 |
| Relação agregado graúdo/cimento | g/c | 4,47 |
| Traço em massa | - | 1:4,47 - 0,36 |

| | | |
|---|---|---|
| Massa Específica estimada (g/cm³) | $\rho_{f,est}$ | 2,009 |

Fonte: os autores.

Além destes, também fez parte desse método o teste de compactação, de forma a permitir que seja feita a análise da assertividade do processo e os ajustes necessários.

Esse processo teve início com a pesagem de um molde vazio, seguida da pesagem deste completamente preenchido por concreto permeável compactado até a superfície. A massa específica aparente no estado fresco (**ρ**f) pode ser determinada através da Equação 7, e a densidade teórica (dt) através da Equação 8 (ASTM C1688M, 2014).

$$\rho f = \frac{Mc - Mc}{Vm} \quad (7)$$

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

Sendo:

**ρ**f - Massa específica no estado fresco (g/cm³);

Mc - Massa do molde contendo o concreto (g);

Mm - Massa do molde vazio (g);

Vm - Volume do molde (cm³);

dt - Densidade teórica do concreto permeável (g/cm³);

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

V - Soma dos volumes de cada componente na mistura (cm³).

Ainda como formato de ajustes finais da dosagem, calculou-se a porosidade no estado fresco (Equação 9), o consumo real de cimento (Equação 10) e de agregado graúdo (Equação 11).

$$Pf = \frac{dt - \rho f}{dt} \quad (9)$$

$$Ccim,r = \left(\frac{\rho f}{1 + g/c + a/c + m/c}\right) \quad (10)$$

$$Cagg,r = Ccim,r * g/c \quad (11)$$

Sendo:
Pf - Porosidade no estado fresco (%).

Por fim, utilizou-se a Equação 12 para calcular o grau de compactação efetivo (Gc,ef) e os valores obtidos foram comparados. Caso os valores estimados para porosidade de projeto e porosidade efetiva apresentassem diferença significativa dos resultados obtidos, o processo seria reiniciado com a mudança de valor do GC,i para o GC,ef como forma de correção.

$$Gc,ef = \frac{Cagg,r}{MUc} \quad (12)$$

Como resultado do teste de compactação do traço referência, foram obtidos os valores dispostos na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Teste de compactação para traço piloto

| **Parâmetro** | | **Traço A** |
|---|---|---|
| Teor areia/cimento | m/c | 0,0 |
| Densidade teórica (g/cm³) | dt | 2,671 |
| Massa Específica medida (g/cm³) | $\rho$f | 2,025 |
| Porosidade no Estado Fresco (%) | P | 24,19 |
| Consumo real de cimento (kg/m³) | Ccim,r | 347,1 |
| Consumo real de agregado graúdo (kg/m³) | Cagg,r | 1552,9 |
| Grau de compactação efetivo | Gc,ef | 0,929 |
| Traço final | - | 1:4,63 - 0,36 |

Fonte: os autores.

Como resultado dos cálculos realizados, os teores de areia/cimento fixados foram de: 0,0; 0,25; 0,5 e 0,75. Seguindo os métodos apresentados neste item, os valores e o respectivo traço utilizados em cada um dos teores segue exposto na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Dados da dosagem

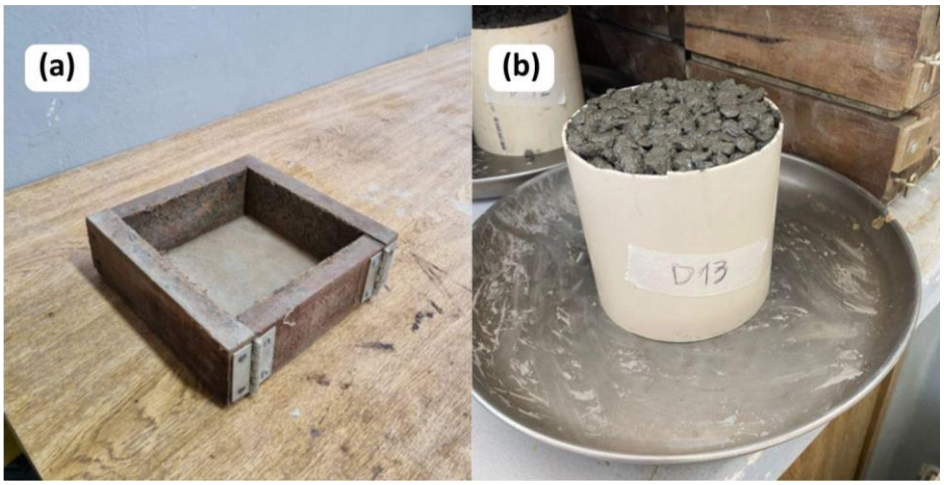
| Parâmetro | | Traço A | Traço B | Traço C | Traço D | Traço E |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Porosidade Estimada (%) | P | 25 | 25 | 25 | 25 | 20 |
| Teor de areia/cimento | m/c | 0,0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 0,25 |
| Grau de compactação efetivo | GC,ef | 0,929 | 0,931 | 0,932 | 0,933 | 0,888 |
| Relação água/cimento | a/c | 0,36 | 0,38 | 0,4 | 0,42 | 0,4 |
| Volume de vazios efetivo | Vv,ef | 47,89 | 47,82 | 47,77 | 47,73 | 50,23 |
| Volume de pasta (%) | Vp | 22,89 | 22,82 | 22,77 | 22,73 | 30,23 |
| Consumo de Cimento (kg/m³) | Cim | 335,3 | 277,4 | 236,5 | 206,1 | 313,9 |
| Consumo de agregado graúdo (kg/m³) | Cagg | 1552,9 | 1555,0 | 1556,4 | 1557,5 | 1483,2 |
| Consumo de agregado miúdo (kg/m³) | Cagm | 0,0 | 69,3 | 118,2 | 154,6 | 156,9 |
| Relação agregado graúdo/cimento | g/c | 4,63 | 5,61 | 6,58 | 7,56 | 4,73 |
| Densidade teórica | dt | 2,679 | 2,676 | 2,674 | 2,673 | 2,6 |
| Massa Específica Estimada (g/cm³) | $\rho$f,est | 2,009 | 2,007 | 2,006 | 2,005 | 2,080 |
| Traço final (Cim:Agg - a/c) | - | 1:4,63 - 0,36 | 1:5,61 - 0,38 | 1:6:58 - 0,4 | 1:7,56 - 0,42 | 1:4,73 - 0,4 |

Fonte: os autores.

## 3.3 PRODUÇÃO DE AMOSTRAS

A etapa seguinte consistiu na moldagem dos corpos de prova, tendo sido utilizados moldes no formato prismático de 15x15x6cm, simulando peças reduzidas de lajotas usadas para a produção de pavimentos. Além destes, também foram produzidos corpos de prova em formato cilíndrico com diâmetro e altura de 10 cm, de forma a tornar possível a realização do ensaio de tração por compressão diametral conforme norma definida na NBR 7222 (ABNT, 2011). Os moldes são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Moldes (a) prismático e (b) cílindrico




Fonte: os autores.

Para cada traço escolhido foram moldados 13 corpos de prova, cujo formato varia de acordo com o experimento utilizado, conforme descrito na Quadro 3, totalizando 65 corpos de prova produzidos para os 5 traços apresentados.

Quadro 3 - Quadro resumo de corpos de prova para cada traço

| **Ensaios** | **Formato** | **Dimensões (cm)** | **Quant/Traço (un)** |
|---|---|---|---|
| Permeabilidade | Prismático | 15x15x6 | 5 |
| Resistência à Compressão | Prismático | 15x15x6 | 5 |
| Resistência à Tração Indireta | Cilíndrico | 10x10 | 3 |

Fonte: os autores.

Para a produção das amostras inicialmente a betoneira foi umedecida, seguida pela inserção do agregado graúdo e metade da quantidade de água, sendo a mistura mexida por 30 segundos. Na sequência, o cimento foi colocado, seguido pela areia e pela parcela restante de água, sendo misturada por aproximadamente 2 minutos. Não foi realizado pré-umedecimento do agregado miúdo devido a realização de ensaios para cálculo da relação a/c controlada nas peças produzidas.

O processo de moldagem dos corpos de prova foi iniciado com a passagem de desmoldante nos moldes, seguida do enchimento completo da peça e compactação

da mistura. Os corpos de prova foram compactados manualmente com uso de placa metálica (Figura 10) tendo sido preenchidos com concreto permeável até que o topo da peça estivesse nivelado ao topo da forma.

Figura 10 - Placa metálica

Fonte: os autores.

Por fim, o método de cura que foi utilizado é denominado cura úmida, consiste em simular da maneira mais próxima possível a situação em campo, onde a amostra foi umedecida e coberta por uma película plástica até a data de realização do ensaio. Neste caso, os corpos de prova foram umedecidos e colocados em saco plástico vedado até a data da realização dos ensaios, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Corpos de prova umedecidos em sacos plásticos

Fonte: os autores.

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO

Tomando como base a sequência proposta no item 3, os ensaios aplicados nesta pesquisa seguem as referências bibliográficas propostas no Quadro 4 abaixo, sendo que os métodos cuja adaptação foi necessária, estão descritos neste item.

Quadro 4 - Resumo das metodologias propostas

| ENSAIO/PARÂMETRO | METODOLOGIA PROPOSTA |
|---|---|
| Porosidade e Massa Específica no estado fresco | ASTM C1688M – 14a (ASTM, 2014) |
| Permeabilidade | NBR 16416, anexo A (ABNT, 2023)* |
| Porosidade e Massa Específica no estado endurecido | ASTM C1754M - 12 (ASTM, 2012) |
| Resistência mecânica | NBR 5739 (ABNT, 2018)<br>NBR 7222 (ABNT, 2011) |

*Ensaios adaptados
Fonte: os autores.

Para estimativa da permeabilidade da peça foi utilizado o coeficiente de permeabilidade, mencionado na NBR 16416, anexo A (ABNT, 2023). O ensaio executado no laboratório foi adaptado para as dimensões da peça, sendo um anel de infiltração com diâmetro menor que o proposto e menor quantidade de água infiltrada. O anel de infiltração, com diâmetro de 100mm (a norma prevê aproximadamente 300 mm) teve sua base completamente vedada com massa de vidro, garantindo que toda a água seja mantida dentro do local de medição (Figura 12). Além disso, a quantidade de água infiltrada foi de 2 L, sendo que a execução do ensaio seguiu os passos descritos em norma, sendo mantido o fluxo de água constante, mesma base de cálculos e ainda realizada a pré-molhagem, com volume de água de 1 L.

Figura 12 - Anel de vedação para ensaio de permeabilidade

Fonte: os autores.

A resistência mecânica, por sua vez, empregou como base a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Entretanto, este regulamento faz menção aos corpos de prova cilíndricos, de forma que se difere do ensaio executado no que diz respeito ao nivelamento das amostras, já que durante a execução desta pesquisa não foi possível utilizar o capeamento de enxofre nas bases no formato de paralelepípedo. Sendo assim, aos 15 dias após a produção, as amostras foram “capeadas” utilizando pasta de cimento em camadas de aproximadamente 1 cm, com relação a/c de 0,3 e

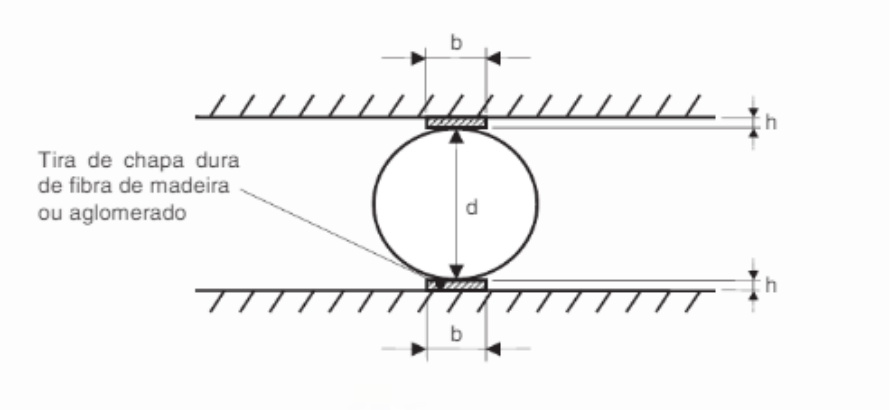
niveladas com nível de bolha para planificação da superfície (Figura 13). Após secagem da pasta, as amostras foram devolvidas ao local de cura até que atingissem 28 dias, sendo que o ensaio segue o padrão previsto pela norma mencionada.

Figura 13 - Corpo de prova nivelado

Fonte: os autores.

Para definir a resistência à tração, a normativa utilizada como base foi a NBR 7222 (ABNT, 2011), de forma que foi necessária a moldagem de corpos de prova de mesma dosagem que os paralelepípedos, porém em formato cilíndrico, permitindo a execução do ensaio conforme descrito. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios na prensa (Figura 15), de modelo YAW2000D-037, com capacidade máxima de 2000 kN, sendo que para a compressão a taxa de carregamento foi de 0,45 MPa/s, já na tração foi de 0,05 MPa/s. Com o auxílio de madeirites para o ajuste do corpo de prova, as demais instruções para estimativa da resistência seguiram o padrão descrito na norma mencionada (Figura 14).

Figura 14 - Representação de ensaio de tração indireta




Fonte: NBR 7222 (ABNT, 2011).

Figura 15 - Prensa utilizada para os ensaios

Fonte: os autores

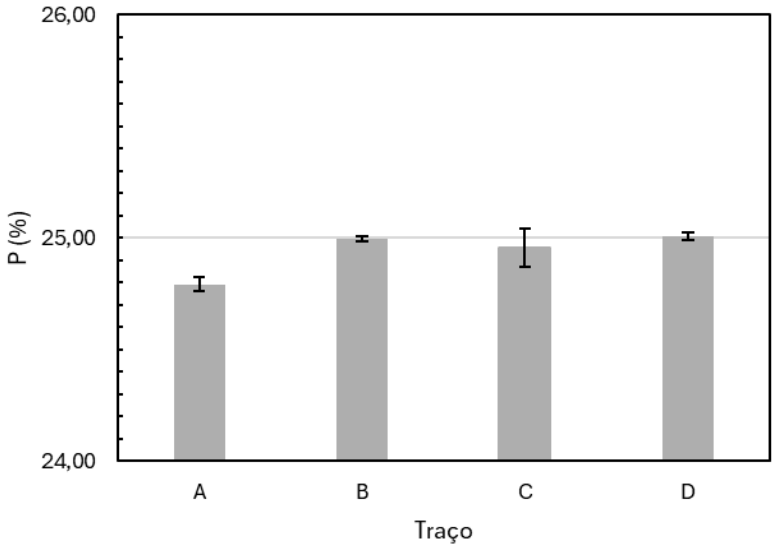
# 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme definido no item 3, as amostras foram produzidas e monitoradas através de ensaios de porosidade e massa específica, resistência mecânica e permeabilidade, sendo os 4 traços iniciais dosados com a porosidade estimada de 25% e o último traço dosado com a porosidade estimada de 20%. Os dados obtidos permitiram a análise da influência que as propriedades possuem entre si, bem como o comportamento desses parâmetros conforme a variação no teor de areia.

## 4.1 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO

Os dados de porosidade no estado fresco foram encontrados para os 5 traços produzidos. Todas as amostras em estudo mantiveram o seu valor próximo ao valor estimado inicialmente para a porosidade de 25%, como pode ser observado na Figura 16 abaixo. Isto se dá devido ao método de dosagem utilizado (Mikami, 2022), que é capaz de estimar a porosidade antes da produção das amostras, permitindo o refinamento do traço.

Figura 16 Porosidade média no estado fresco



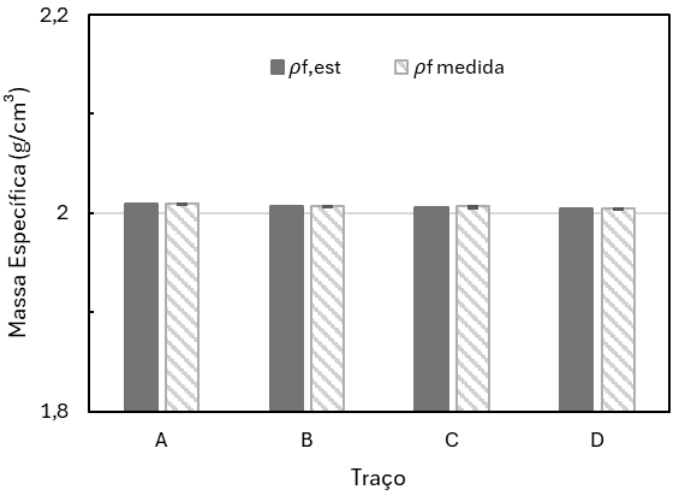

Fonte: os autores.

Além disso, também foi possível o cálculo da massa específica no estado fresco, sendo que os valores obtidos estão mostrados na Figura 17 abaixo e

demonstram pouca variação entre os traços. Tal efeito diverge do observado por Skorovinski e Carneiro (2023), onde o aumento do teor de areia gerou aumento na massa específica da mistura. Esta diferença de comportamento pode ser explicada pelo valor da densidade do próprio agregado miúdo, sendo que o valor medido para este trabalho foi de 2,08 g/cm³, menor que o valor medido pelos autores citados que foi igual a 2,62 g/cm³. Dessa forma, entende-se que um material mais denso afeta diretamente a massa obtida na mistura final e, consequentemente, também influencia no valor da sua massa específica.

Ainda, estabelecendo-se a comparação entre os valores de massa específica estimada e massa específica medida (Figura 17) é possível perceber que houve pouca variação entre os valores calculados pela Equação 8 e os valores resultantes, o que demonstra novamente a efetividade do método de dosagem escolhido.

Figura 17 - Massa específica média no estado fresco

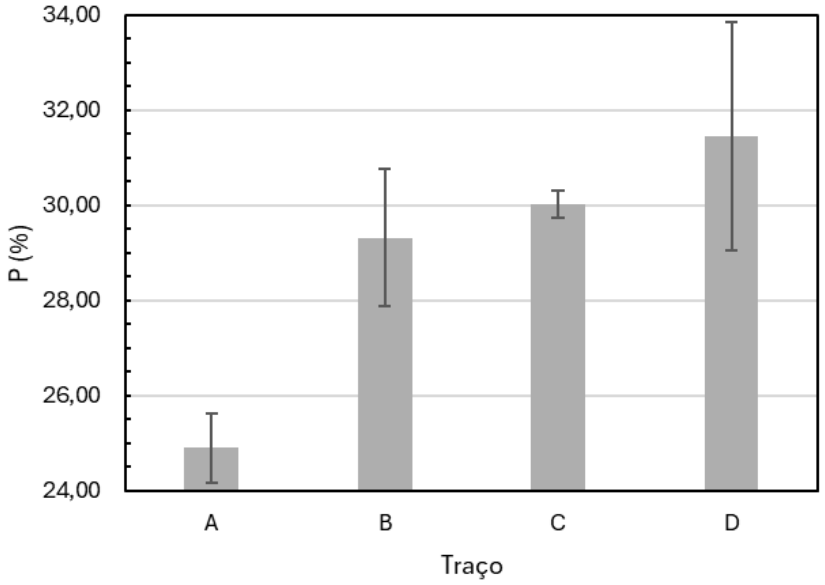



Fonte: os autores.

De forma complementar, foram produzidas amostras cilíndricas para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Nesses moldes, entretanto, não foi possível controlar com exatidão para que fosse atingida a porosidade projetada especialmente devido à altura do molde, que dificultava a compactação do material nas camadas inferiores e, consequentemente, a acomodação das partículas. Dessa forma, as amostras nestes casos apresentaram entre 25 e 35% de porosidade para os mesmos traços propostos anteriormente, conforme mostra a Figura 18. Entende-se também que, em projetos de continuidade deste tipo de ensaio com o uso de

moldes de maior altura, deve ser utilizado o método de compactação em camadas e soquete ou compactador específico, conforme dispõe a normativa NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 18 - Porosidade média dos corpos cilíndricos




Fonte: os autores.

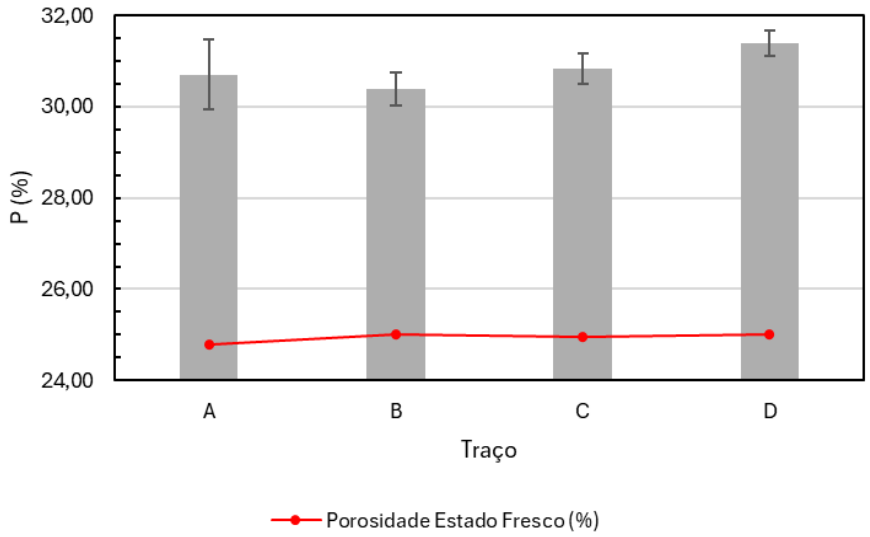
## 4.2 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO ENDURECIDO

Conforme apresentado anteriormente, foram obtidas as características do material em seu estado endurecido, sendo que todos os traços apresentaram aumento de pelo menos 5% em comparação à porosidade de projeto obtida no estado fresco da mistura, conforme mostrado na Figura 19. De acordo com Mikami (2022), em seus estudos, no estado endurecido houve um acréscimo de 3 a 4% na porosidade, tal fato é explicado pelo efeito de hidratação do concreto. No estado fresco, a porosidade do concreto permeável é predominantemente intergranular, contudo, durante o processo de endurecimento, a evaporação da água gera poros na matriz cimentícia, resultando em um aumento da porosidade total do material.

Também é percebido nos resultados o aumento no valor da porosidade no estado endurecido, proporcional ao aumento do teor de areia, em comparação com o seu valor no estado fresco. Este comportamento é divergente da maioria dos registros na literatura (Bonicelli, 2015; França e Costa, 2021; Skorovinski e Carneiro, 2022).

Porém, Souza (2023) apresenta resultados semelhantes, onde há aumento mais significativo em traços dosados com maior teor m/c, sendo que este fenômeno pode ser compreendido pela presença de poros isolados na estrutura, os quais não são aferidos no ensaio realizado no estado endurecido das amostras, reduzindo o valor de porosidade resultante.

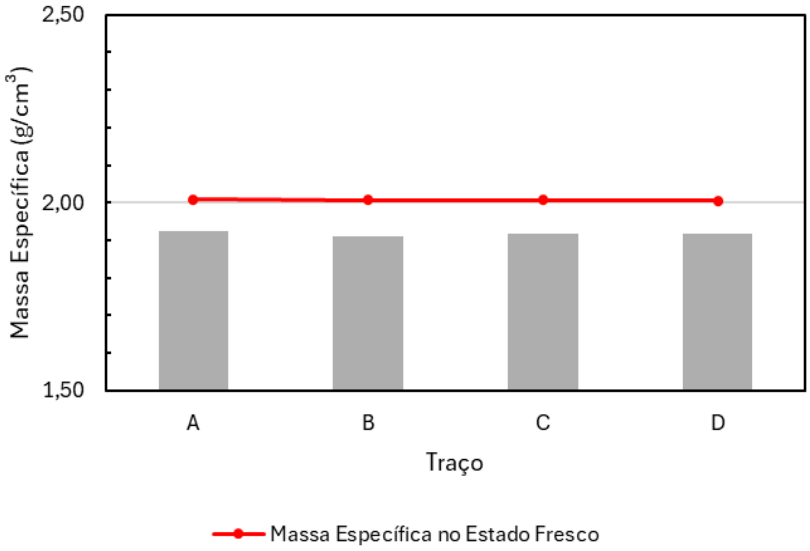
Figura 19 - Porosidade média no estado endurecido




Fonte: os autores.

A massa específica no estado endurecido, por sua vez, sofreu uma pequena redução em comparação com o valor obtido no estado fresco para todas as amostras, conforme mostrado na Figura 20 abaixo. Tal comportamento é previsto dentro do Método do Grau de Compactação, já que após o processo de cura a mistura terá parte da água evaporada e, consequentemente, menor valor em massa medida.

Figura 20 - Massa específica no estado endurecido

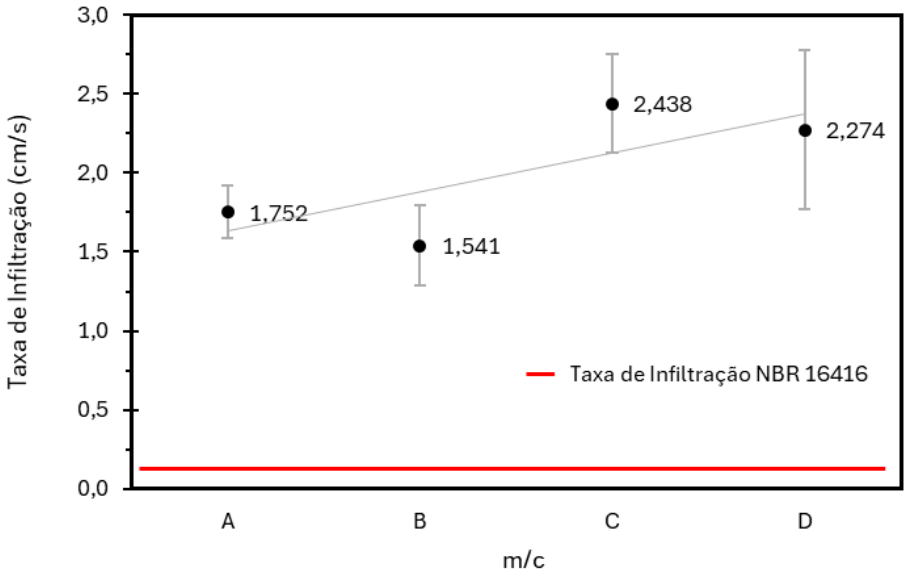



Fonte: os autores.

## 4.3 PERMEABILIDADE

A Permeabilidade é analisada através do valor da taxa de infiltração, sendo que os resultados obtidos nos traços desenvolvidos em laboratório estão expostos na Figura 21 abaixo.

Figura 21 - Permeabilidade média das misturas




Fonte: os autores.

É possível perceber a presença de desvio padrão entre as amostras de mesmo traço, sendo que tal variação pode ser explicada pela acomodação e energia de compactação variável aplicada em cada corpo de prova, de forma que existe a possibilidade de que a face permeável seja tamponada e dificulte a infiltração, sem afetar significativamente a permeabilidade. Além disso, também é possível perceber através dos resultados um aumento na taxa de infiltração juntamente com o aumento do teor de areia adicionada. Um resultado divergente do que foi encontrado nos estudos de França e Costa (2021), os quais atestaram que a incorporação da areia causa uma diminuição na permeabilidade.

Ademais, vale ressaltar o fato de que todas as amostras supriram o requisito exposto na NBR 16416, anexo A (ABNT, 2023), que determina o valor de 0,1 cm/s como o valor mínimo aceitável para a taxa de infiltração. Estando os valores significativamente acima da taxa mínima proposta, entende-se que existe a possibilidade de que a porosidade projetada para a mistura seja reduzida para fins de ganho de resistência, se necessário. Entretanto, ao efetuar a redução no valor da permeabilidade do concreto permeável, é necessário atentar-se aos parâmetros de durabilidade, sendo que a taxa de infiltração é um dos fatores mais relevantes para a vida útil do material. Uma estrutura mais porosa possui menor probabilidade de ser tamponada por resíduos materiais, fenômeno denominado colmatação, que é o responsável pela perda de funcionalidade do concreto permeável a longo prazo.

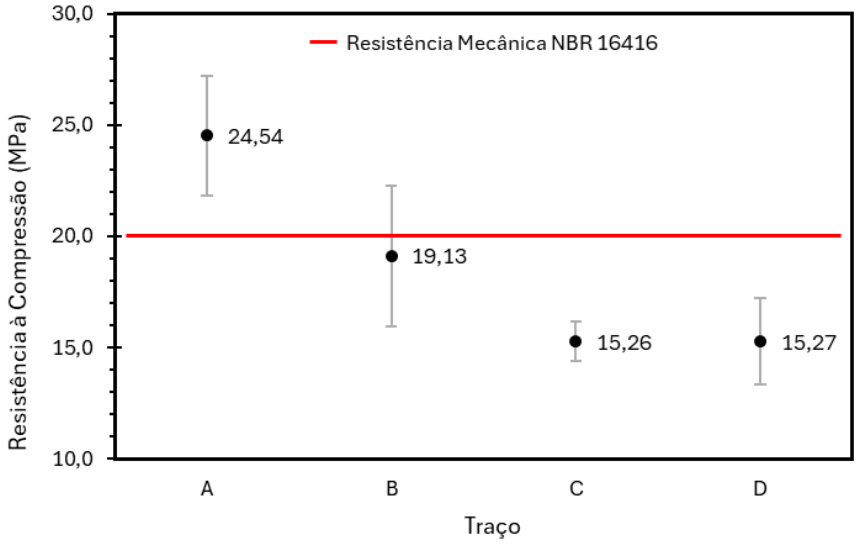
## 4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Em se tratando da resistência mecânica, as amostras foram levadas para rompimento aos 28 dias, sendo que os resultados dos ensaios de compressão estão apresentados graficamente na Figura 22. Através dos valores, é possível perceber uma redução na resistência conforme o teor de areia aumenta. Esse comportamento corrobora as pesquisas realizadas por Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015), afirmando que a inserção de areia promove a formação de uma argamassa que envolve os agregados, diminuindo a quantidade de pasta de cimento em contato direto com o agregado, com isso, essa redução da coesão entre a pasta e os agregados graúdos, resulta diretamente em uma redução da resistência à compressão do concreto. Além disso, também pode ser citado o aumento da relação a/c, sendo que

uma maior quantidade de água na mistura resulta na redução da resistência mecânica, que se dá especialmente pelo fato de que a água incorporada tende a evaporar após o processo de cura, deixando vazios na pasta de cimento.

Tomando como base o exposto na NBR 16416 (ABNT, 2015) é estabelecido como taxa mínima de resistência à compressão do concreto o valor de 20 MPa, sem levar em conta a finalidade (tráfego de pedestres ou tráfego leve), sendo que apenas o traço A atingiu tal valor.

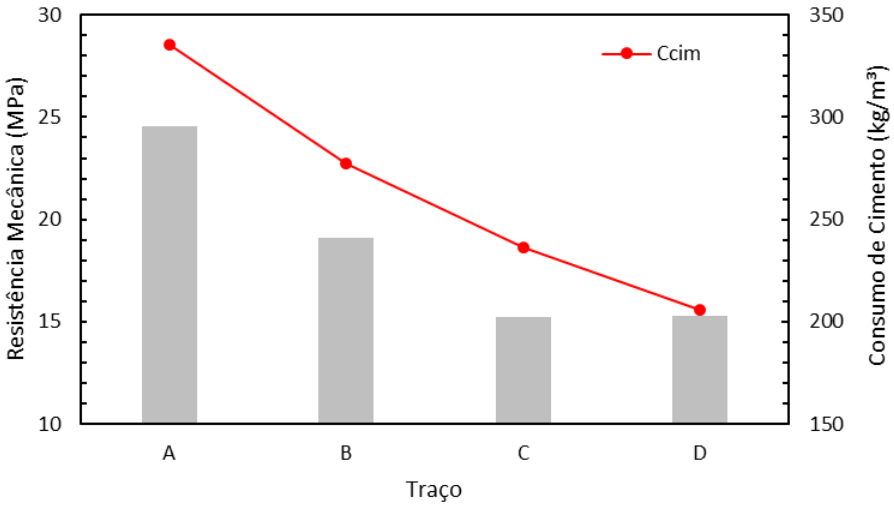
Figura 22 - Resistência à compressão média




Fonte: os autores.

Estabelecendo-se a comparação entre a resistência mecânica e o consumo de cimento (Figura 23) é possível perceber o decréscimo no valor da resistência conforme a redução na quantidade de cimento da mistura. Tal comportamento vai de encontro ao exposto por Jansen e Camacho (2022), onde os autores ressaltam o consumo de cimento como sendo o fator limitante para a aplicação do concreto permeável, já que este parâmetro determina a resistência mecânica final da mistura. Entretanto, é importante ressaltar que o excesso de pasta de cimento também pode trazer efeitos negativos para o concreto permeável, sendo capaz de obstruir os poros em sua estrutura e reduzir a sua permeabilidade.

Figura 23 - Resistência à compressão e consumo de cimento

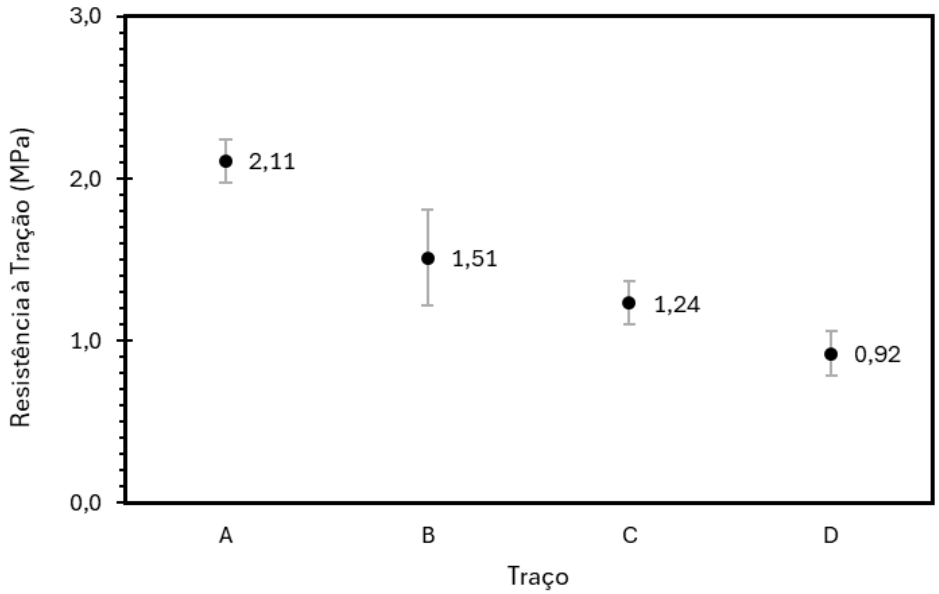



Fonte: os autores.

Os resultados de resistência à tração, por sua vez, estão apresentados na Figura 23, sendo que o comportamento também decresce conforme o aumento do teor de areia, indo de encontro com o ocorrido nos valores de resistência à compressão. Conforme especificado na NBR 16416, a propriedade da resistência à tração não é usada no controle de aceitação do pavimento permeável, entretanto, Delatte (2008) traz como uma faixa aceitável de valores entre 2,1 e 3,1 Mpa, sendo que apenas o Traço A foi capaz de atingir o valor mínimo citado.

Como resultado de sua tese, Mikami (2022) obteve comportamento similar nos valores de resistência à tração, demonstrando que esta propriedade é consideravelmente dependente da porosidade da mistura. Também é importante ressaltar o fato de que o valor obtido como resultado dos ensaios de resistência à tração foi realizado em amostras com grande discrepância em valores de porosidade, sendo que houve aumento na porosidade juntamente com o aumento do teor m/c. Sendo assim, estabelecendo a análise com base no comportamento exposto na Figura 24, fica evidente a influência exercida pela porosidade nos resultados da resistência à tração, sendo que maiores valores de porosidade tendem a reduzir a resistência da estrutura.

Figura 24 - Resistência à tração das misturas




Fonte: os autores.

## 4.5 TRAÇO COMPLEMENTAR

A partir dos valores apresentados e das referências expostas, é constatado que a resistência à compressão obtida foi insuficiente para tornar as misturas aplicáveis, ao passo que a taxa de infiltração se apresentou muito eficaz quando comparada à normativa que exige o valor mínimo de 0,1 cm/s. Dessa forma, surge a possibilidade de que a areia reciclada seja incorporada a um traço de menor porosidade, buscando um aumento na resistência mecânica da mistura e, consequentemente, reduzindo parte de sua permeabilidade.

Sendo assim, após o término do primeiro ciclo de ensaios, foi realizada a análise dos resultados obtidos e uma nova etapa da pesquisa foi iniciada, na qual o concreto foi dosado com porosidade de projeto igual à 20% (Traço E). O teor de areia escolhido para o traço mais otimizado foi de 0,25, pois este obteve valor intermediário de Intensidade de Consumo de Cimento e sua resistência mecânica foi próxima aos 20 MPa exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Os valores obtidos como resultado dos ensaios são apresentados na Tabela 10, onde é apontado o comportamento da mistura antes e depois do processo de cura, que segue o padrão das demais amostras

apresentadas anteriormente, sendo o aumento nos valores de porosidade e a redução do valor referente à massa específica.

Estabelecendo-se também a comparação entre os resultados obtidos para diferentes porosidades e mesmo teor de areia (Tabela 9) é possível perceber a redução de 29% na taxa de infiltração, sendo que o valor resultante da mistura de menor porosidade ainda se apresenta acima do valor de 0,1 cm/s exigido em norma. Além de ainda apresentar margem em sua permeabilidade que garante prolongar a vida útil do material e mitigar os efeitos da colmatação.

Por meio dos resultados expostos também é possível perceber o aumento da resistência mecânica quando comparado ao traço com 25% de porosidade, sendo que o resultado obtido supera o limite mínimo estabelecido, viabilizando a utilização do traço em questão.

Tabela 9 - Resultados obtidos para o Traço E em comparação com o Traço B

| **Parâmetro** | **Valor (Traço B)** | **Valor (Traço E)** | **Desvio Padrão Traço E (±)** |
|---|---|---|---|
| Teor areia/cimento | 0,25 | 0,25 | - |
| Porosidade de Projeto (%) | 25 | 20 | - |
| Porosidade no Estado Fresco (%) | 25,0 | 22,20 | 0,014 |
| Massa Específica no Estado Fresco (g/cm³) | 2,007 | 2,08 | 0,0004 |
| Porosidade no Estado Endurecido (%) | 30,39 | 24,30 | 0,84 |
| Massa Específica no Estado Endurecido (g/cm³) | 1,92 | 1,99 | 0,001 |
| Taxa de Infiltração (cm/s) | 1,541 | 0,710 | 0,277 |
| Resistência à Compressão (MPa) | 19,13 | 24,27 | 5,54 |
| Resistência à Tração (MPa) | 1,51 | 2,25 | 0,24 |
| Consumo de Cimento (kg/m³) | 277,4 | 313,9 | - |
| Consumo de Areia (kg/m³) | 69,3 | 156,9 | - |
| Consumo de Pedrisco (kg/m³) | 1555,0 | 1483,2 | - |

Fonte: os autores

A partir do apresentado, entende-se que uma menor porosidade resulta em maior eficiência no consumo de cimento, ou seja, a utilização de uma mistura com

porosidade muito elevada pode não apresentar bons resultados no quesito de economia de consumo de cimento. Sendo assim, como o valor de porosidade apresentado não se mostrou um fator limitante para o traço dosado, existe a possibilidade de que sejam realizados novos testes com traços de menor porosidade a fim de que sejam obtidas amostras com maior volume de pasta e, consequentemente, melhor interação com o agregado miúdo de RCD. Nesse caso, a porosidade deve ser reduzida através da adição de areia, sendo utilizado como parâmetro de comparação o teor m/c de 0,25 e as porosidades de 20 e 25%, de forma a manter o consumo de cimento constante.

Ainda, no aspecto ambiental, pode-se dizer que o concreto permeável permitiu a incorporação de areia reciclada, obtendo melhor resultado no traço com menor porosidade. Deve ser ressaltada também a redução no consumo de cimento registrada no traço otimizado de 20% de porosidade, o que se mostra positivo em comparação aos demais traços produzidos, mesmo com a perda de parte da permeabilidade da mistura.

Por fim, ainda existe a possibilidade de que sejam testados os traços deste trabalho com o uso de aditivo, visando uma redução na relação a/c e consequente aumento da resistência mecânica. Bem como existe a possibilidade de que sejam testados traços com menor porosidade para avaliar o comportamento das demais propriedades do concreto permeável.

## 4.6 CONSUMO DE CIMENTO

Em se tratando do consumo de materiais, o valor utilizado para cada teor de areia está descrito na Tabela 10 abaixo. Através dos números apresentados, é possível perceber a redução no consumo de cimento (Ccim) juntamente com o aumento do consumo de areia (Cmiúdo), enquanto o consumo de pedrisco (Cagg) apresenta-se praticamente constante, com pouco crescimento. A partir dos resultados obtidos, é possível perceber uma redução no consumo de cimento conforme o crescimento na adição de areia, entretanto, apenas o traço com teor 0,25 se manteve próximo da resistência prevista em norma. Nesse caso, em se tratando da utilização de agregado miúdo de RCD, este teor se apresenta como um bom receptor e pode ser otimizado para atingir melhores resultados.

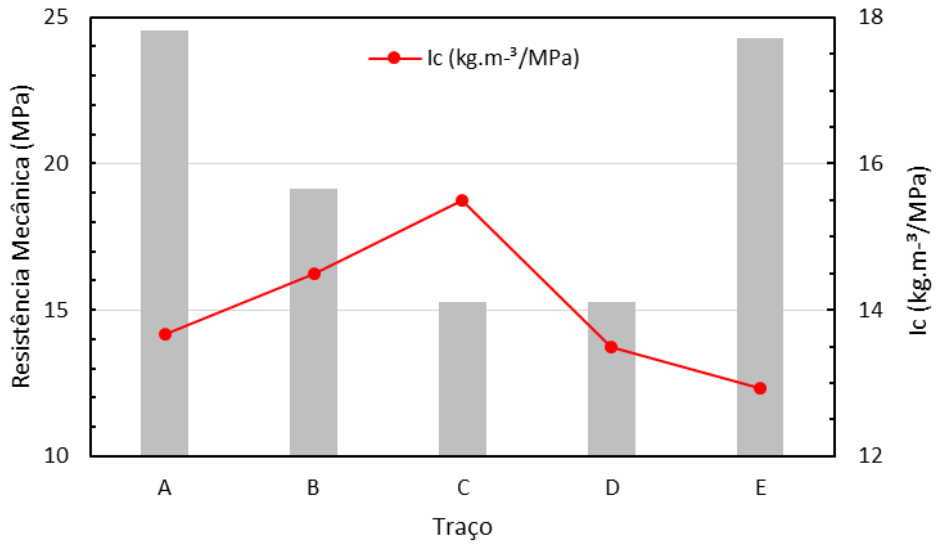
Tabela 10 – Consumo real de materiais

| Traço | Ccim (kg/m³) | Cmiúdo (kg/m³) | Cagg (kg/m³) |
|---|---|---|---|
| A | 335,3 | 0,0 | 1552,9 |
| B | 277,4 | 69,3 | 1555,0 |
| C | 236,5 | 118,2 | 1556,4 |
| D | 206,1 | 154,6 | 1557,5 |
| E | 313,9 | 156,9 | 1483,2 |

Fonte: os autores.

Este valor, entretanto, pode ser interpretado de outra forma quando analisado sob parâmetros de otimização da mistura, conforme proposto por Damineli *et al*. (2010), onde os autores propõem uma razão entre o consumo de cimento (Ccim) e a resistência mecânica obtida. Este valor, denominado Intensidade de Consumo de Cimento (Ic), representa a eficiência da mistura e está representado na Figura 25. Através desse índice, é possível compreender a possibilidade de um aumento da resistência mecânica do concreto sem que necessariamente haja aumento no consumo de cimento, já que estabelece a análise do consumo de cimento por MPa da mistura.

Figura 25 - Intensidade de consumo de cimento




Fonte: os autores.

A partir do gráfico é possível perceber que o traço D apresentou a menor resistência média entre as amostras testadas. Entretanto, este mesmo teor apresentou, sem grande discrepância, o menor Ic por MPa, igualando-se ao traço A, sem adição de areia, no quesito de eficiência. Há também um baixo índice de consumo de cimento no traço A, diferentemente dos resultados apresentados no trabalho de Skovronski e Carneiro (2023), no qual o traço piloto foi responsável pelo maior índice de consumo de cimento.

Porém, estabelecendo a comparação com o trabalho citado anteriormente, é possível perceber a diferença na relação a/c empregada, sendo que Skorovinski e Carneiro (2023) fizeram a utilização de aditivo superplastificante, a fim de que fosse mantida a quantidade de água. Sendo assim, existe a possibilidade de que o agregado miúdo de RCD seja testado em amostras com aditivo, visando aumentar o parâmetro de eficiência em consumo de cimento.

Ainda, é possível perceber o valor de 12,93 $kg.m^{-3}/MPa$ obtido no traço E, sendo este o menor índice dentre todos os traços moldados, evidenciando a eficiência do traço produzido e mostrando a oportunidade de novos estudos neste sentido.

## 4.7 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir do exposto, é possível compreender o comportamento do concreto permeável conforme a incorporação e aumento do teor de areia reciclada em sua dosagem. Este material foi estudado em parâmetros de resistência à compressão, porosidade e taxa de infiltração, sendo que o resumo dos resultados obtidos pode ser visto na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Resumo dos resultados obtidos

| m/c | ρf ($g/cm^3$) | Pf (%) | fc (MPa) | k (cm/s) | ρ ($g/cm^3$) | P (%) | Ic ($kg.m^3/MPa$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 2,009 | 24,79 | 24,54 | 1,752 | 2,009 | 30,70 | 13,66 |
| 0,25 | 2,007 | 25,00 | 19,13 | 1,541 | 2,007 | 30,39 | 14,49 |
| 0,5 | 2,007 | 24,96 | 15,26 | 2,438 | 2,006 | 30,83 | 15,49 |
| 0,75 | 2,005 | 25,01 | 15,27 | 2,274 | 2,004 | 31,40 | 13,49 |
| 0,5 | 2,080 | 22,20 | 24,27 | 0,710 | 2,080 | 24,30 | 12,93 |

Fonte: Os autores.

Notas: m/c – Relação agregado miúdo/cimento; ρf – Massa específica no estado fresco; Pf – Porosidade no estado fresco; fc – Resistência à compressão; k – Taxa de infiltração; ρ – Massa específica no estado endurecido; P – Porosidade no estado endurecido; Ic - Intensidade de consumo de cimento.

Nota-se a uniformidade nos valores de massa específica no estado fresco nos traços dosados com 25% de porosidade. O traço dosado com 20%, por sua vez, apresenta aumento neste parâmetro, o que permite o entendimento de que tal propriedade é influenciada diretamente pelo volume de pasta da mistura. A porosidade no estado fresco, da mesma forma, apresenta valores próximos entre os traços, especialmente pelo método de dosagem escolhido, já que este permite os ajustes e garante que a porosidade fixada seja atingida, além de se mostrar eficiente para dosagem de concreto permeável com a inclusão de agregado miúdo.

No estado endurecido, é possível perceber um aumento de, pelo menos, 5% no valor da porosidade em todos os traços produzidos. Esse efeito é previsto para o material devido ao processo de cura, onde a água presente na mistura evapora e torna o material mais poroso.

A taxa de infiltração, por sua vez, apresentou resultados muito satisfatórios em comparação com o valor de 0,1cm/s estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015). A distância entre os resultados e o valor mínimo citado permite a avaliação da possibilidade de que seja reduzida a porosidade dos traços a fim de obter melhores resultados no quesito de resistência mecânica. Além disso, também se apresenta positivo em questão de durabilidade, sendo que o principal fator atuante contra a vida útil do material é a colmatação, que tende a ser mais lenta em traços com maior taxa de infiltração.

Em se tratando da resistência à compressão, é perceptível a redução dos valores conforme há aumento no teor de agregado miúdo, o que pode ser compreendido, em especial, pelo aumento da relação a/c da mistura. De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), é solicitado o valor de 20 MPa de resistência para peças de pavimentação, sendo que apenas o traço piloto foi capaz de atingir este limite. Dessa forma, um novo traço foi dosado com porosidade menor, a fim de que a redução do volume de vazios fosse capaz de aumentar o valor da resistência mecânica. Essa proposição foi atendida, como é notado no segundo traço dosado com teor m/c de

0,25 e porosidade de projeto igual a 20%, onde o resultado mostra um valor superior de resistência, que se aproxima do traço piloto e supera o limite mínimo estabelecido.

Por fim, a intensidade de consumo de cimento também foi avaliada, sendo que o resultado obtido nas amostras de 25% de porosidade não se mostrou tão eficiente para a redução do consumo de cimento. Apesar de não ter sido apresentada uma economia significativa, este valor demonstra que a presença de agregado miúdo de RCD não afeta negativamente a resistência mecânica do material, já que o valor aferido para o Ic foi próximo ao obtido no traço piloto. No último traço, entretanto, foi notada a redução neste índice, tornando as amostras dosadas com 20% de porosidade mais eficientes que as demais, inclusive em comparação com o traço piloto.

# 5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram o impacto da inclusão de agregado miúdo de RCD no concreto permeável através do aumento da relação a/c, especialmente pela natureza porosa deste material. Além disso, também é notado que a presença de areia reciclada, apesar de aumentar o volume de agregados na mistura, não afeta negativamente a permeabilidade obtida. Entretanto, em se tratando de resistência mecânica, é necessário atentar-se à dosagem para que o produto resultante seja capaz de atingir o valor mínimo proposto em norma, a fim de viabilizar sua utilização como pavimento.

A partir dos dados expostos, conclui-se também que é possível realizar a incorporação de areia reciclada no concreto permeável com o intuito de reduzir o consumo de cimento Portland na produção da mistura através da dosagem pelo Método do Grau de Compactação. A redução do uso de cimento nas moldagens é positiva para parâmetros ambientais, por se tratar de material que demanda grande impacto para sua extração, bem como também pode ser vista como vantajosa economicamente, já que o cimento representa a parte de maior custo na composição do traço do concreto.

Levando em consideração a aplicabilidade prática da pesquisa, para o traço otimizado encontrado, temos que é viável executá-lo em campo, tendo em vista que a sua resistência, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), está dentro dos parâmetros aceitáveis para suportar tráfego leve e de pedestres. Entende-se como tráfego leve, segundo a norma, estacionamentos residenciais onde há baixa circulação de veículos pesados, calçadas, ciclovias, vias de pedestre e passeios públicos.

Por fim, entende-se que para possíveis trabalhos futuros ainda há campos de pesquisa a se explorar, como a possibilidade da dosagem de concreto poroso utilizando traços com a porosidade reduzida e diferentes teores de areia reciclada, além da possibilidade da inclusão de aditivo superplastificante em diferentes porosidades, visando reduzir ainda mais o consumo de cimento e otimizar a dosagem de peças de concreto permeável.

# REFERÊNCIAS


ADRESI, Mostafa, YAMANI, Alizera, TABARESTANI, Motjaba Karimi, ROOHOLAMINI, Hamed. **A comprehensive review on pervious concrete.** Constr. Build. Mater., 407 (2023), Article 133308.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil.** Brasília - DF, 2018.

ANGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, Antônio D. de. **Concreto com agregado reciclado. In: Livro Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo, edição II, capitulo 47, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011. Disponível em: . Acesso em: 10 mai. 2018.

ANTONIO, I. O. **Avaliação da captura de $CO_2$ devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com RCD**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. 2011.

ANGULO, S. C., **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos.** Tese D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** - **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 Solo — Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função Estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Lixo: Brasil gerou mais de 40 mil toneladas de resíduos de construção.** Disponível em: https://www.abrema.org.br/2024/06/18/lixo-brasil-gerou-mais-de-40-mil-toneladas-de-residuos-de-construcao/. Acesso em: 20 de agosto de 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **ANEPAC amplia presença no cenário Nacional.** Revista areia e brita, ano 28 edição 80 janeiro 2024.

ALENCAR, P.C.D. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável** emergente. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

BECHARA, Lourenço. **CONCRETO POROSO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL: ALTERNATIVA DE DRENAGEM URBANA NÃO ESTRUTURAL À REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM**. Universidade Federal Do Pará. Belém, 2017.

BEZERRA, Diego. **PROPRIEDADES DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO RESÍDUO DE CAULIM**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

BONICELLI, Alessandra, GIUSTOZZI Filippo, CRISPINO Maurizio**, Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete, Construction and Building Materials**, Volume 91, 2015, p. 102-110.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - **CONAMA.** Resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002.

CAMPOS, Valéria Nagy de Oliveira. **Soluções baseadas na natureza (SbN) e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluídas em ambientes rígidos**. Revista Labverde, [v. 11, n. 1, p. 73-94, 14 dez. 2021. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestao da Informacao Acadêmica (AGUIA).

CASARIN, R. P.; ARAGÃO, L. C.; ZAPPE, A. P. S.; THOMAS, M.; PASSUELO, A. C. B. **Avaliação das emissões de $CO_2$ de pavimento de concreto permeável: comparação entre o uso de agregados de RCD e naturais**. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 28., 2021, Porto Alegre. Anais do 28º ENEC**.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

COELHO, J. F. **Incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto em misturas de concreto permeável para a produção de peças de pavimentação.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2023.

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

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL SEGUNDO A NBR 15116**. Gramado, 2013.

COSTA, J. Y. **Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto**. Universidade São Judas Tadeu. São Paulo, 2018.

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

DITZ, J. D.; AMARO, L. C. **Análise das propriedades mecânicas do concreto de alta resistência com agregados de construção e demolição**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 11, n. 4, p. 56, dez. 2019. ISSN 2176-7270

Ferreira, R. L. S.; Anjos, M. A. S.; Pereira, J. E. S.; Fonseca, N. J. M.; Nóbrega, A. K. C. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (≤150 μm) do agregado reciclado de RCD. Cerâmica, Natal, v. 65, n. 1, p. 139-146, 2019.

FRANÇA, A. P. M.; COSTA, F. B. P. **Evaluating the effect of recycled concrete aggregate and sand in pervious concrete paving blocks.** Road Materials and Pavement Design, 2021.

FREITAS, G. S. de. **Agenda 2030: o desafio para a indústria da construção civil referente ao seu resíduo**. Revista UNG - Geociências, v. 22, n. 1, p. 06 - 11, 2023. doi: 10.33947/1981-741X-v22n1-5131.

FROTTÉ, C.; DI NUBILA, C. S. A.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L. O. S. de. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD**. Revista Matéria, v. 22, n. 2, art. e11811, 2017.

HE, B.-J.; WANG, J.; ZHU, J.; Qi, J. **Beating the urban heat: Situation, background, impacts and the way forward in China, Renewable and Sustainable Energy.** Reviews 161 (Jun. 2022), 112350.

IBGE, **Coordenação Técnica do Censo Demográfico. Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados.** [S.l.], [s.d.]. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102011. Acesso em: 05 de agosto de 2024.

JANSEN, B; CAMACHO, F. **DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO DE CONCRETO POROSO PARA A PRODUÇÃO DE LAJOTAS PERMEÁVEIS POR CONTROLE DE POROSIDADE.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2022.

KEVERN, JOHN T. **Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete**, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 43, No. 3, 2015.

KIM, H. K.; LEE, H. K. **Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete**. Applied Acoustics, v. 71, n. 7, p.607-615, 2010.

KRUGER, P., *et al*. **Influência do teor de material pulverulento (< 75 µm) do agregado miúdo de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland.** Cerâmica, v. 66, n. 380, p. 507-515, dez. 2020.

LEITE, M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEITE, M.B., MOLIN, D.D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D.** Sitientibus, Feira de Santa, n. 26, pp. 111-130, 2002.

LIAN C., ZHUGE Y., BEECHAM S., **The relationship between porosity and strength for porous concrete**, Construction and Building Materials, Volume 25, 2011, p. 4294-4298.

LIMA, J. M.; FAGUNDES, F. P. **Potencial de utilização do RCD nas propriedades mecânicas de argamassas para revestimento**. REA - Revista de estudos ambientais (Online), v. 24, n. 2, p. 36-47, jul./dez. 2022. doi: 10.17689/1801-1583.v24i2.24047.

LOVATO, Patrícia. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LYRA, D. M.; ASSIS, R. G.; VIEIRA, G. L. **Caracterização de Agregado Reciclado De Resíduo De Construção Civil Segundo a NBR 15116**. In: 55 Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado, 2013. IBRACON, 2013.

MARTINS, R. M. (2015) **"Análise da Capacidade de Infiltração do Pavimento Intertravado de Concreto".** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

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

MIKAMI, R. J.; PIERALISI, R.; PEREIRA, E. **Influence of compaction energy on pervious concrete properties and vertical porosity distribution / Influência da energia de compactação nas propriedades do concreto permeável e na distribuição vertical da porosidade.** Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 17, no. 2, e17203, 2024.

MONTEIRO, A. C. **CONCRETO POROSO: DOSAGEM E DESEMPENHO**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

NGUYEN, D.H. *et al*. **A modified method for the design of pervious concrete mix**.Construction and Building Materials, v.73, p. 271-282, 2014.

RAMOS, Gustavo**. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DE AGREGADO MIÚDO E RESÍDUO (CINZA DE MADEIRA).** UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Joinville, 2018.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil**. Universidade de Pernambuco - Recife, 2014.

SANDOVAL, G. F. B. *et al*. **Hydraulic and morphological characterization of clogged pervious concrete (PC).** Construction and Building Materials, v. 322, 126464, 2022.

SCARDUA, O. **PAVIMENTO PERMEÁVEL COMO MEDIDA SUSTENTÁVEL DE CONTROLE DO ESCOAMENTO NA FONTE DE UMA EDIFICAÇÃO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

SILVA, A. da. **Avaliação Experimental de Pavimentos Permeáveis e dimensionamento de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável: Estudo de caso da bacia do canal do Congo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2021.

SILVA, R. B. **Estudo da reciclagem cíclica do resíduo de concreto para análise de eficiência como agregado miúdo.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2023.

SKOVRONSKI, A. P.; CARNEIRO, M. A. **Otimização de misturas para a produção de peças de concreto permeável por dosagem de agregado miúdo.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2023.

SOUZA, B. C. G. de; TRIGO-P, A. P. M.; FURINI, R. C. B.; SIMÕES-MERANDA, M. N.; ANON, L. G. **Dosagem de pavers de concreto permeável com agregado reciclado misto (ARM)**. Concreto, v. 76, n. 2, p. 78-82, out. 2022. doi: 10.4322/2237-8991.2022.0005.

SOUZA, V. **INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE AREIA EM COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS GRAÚDOS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO PERMEÁVEL.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2022.

STRIEDER, Helena. **ESTUDO DO USO DE AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO EM CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTOS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SUMANASOORIYA Milani, NEITHALATH Narayanan. **Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction**. Cement and Concrete Composites, Volume 33, 2011, p. 778-787.

TAVARES, K. **UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE TRATAMENTO EM RCD PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS.** Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, 2021.

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

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, fev. 2019

YU, F., GUO J., LIU J., CAI H., HUANG J. **A review of the pore structure of pervious concrete: Analyzing method, characterization parameters and the effect on performance**. Constr. Build. Mater., vol. 365, no. September 2022, p. 129971, Feb. 2023.

ZHANG, J.; WANG, Z.; XIONG, J.; JIN, Q.; HOU, D.; SONG, Z.; SHEN, Y.; HU, N. **Evaluation of in-situ permeability measurement methods for pervious concrete pavement**. Urban Water Journal, v. 20, n. 2, p. 184-192, 2023. DOI: 10.1080/1573062X.2022.2155852.