

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JULIO CESAR ABREU FILHO

**CONTRIBUIÇÃO A DOSAGEM DE CONCRETO DRENANTE PARA
PAVIMENTAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JULIO CESAR ABREU FILHO

**CONTRIBUIÇÃO A DOSAGEM DE CONCRETO DRENANTE
PARA PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador:
Prof. Alexandre Lima de Oliveira, doutor.
Coorientador:
Rafael Andrade de Souza, especialista.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Filho, Julio Cesar Abreu

Contribuição a dosagem de concreto drenante para pavimentação / Julio Cesar Abreu Filho ; orientador(a): Alexandre Lima de Oliveira ; coorientador(a): Rafael Andrade de Souza. -- Florianópolis : 2026. 29 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis. Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Concreto Permeável. 2. Índice de Vazios. 3. Permeabilidade. 4. Resistência à Compressão. I. Oliveira, Alexandre Lima de. II. Souza, Rafael Andrade de. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso de Bacharelado em Engenharia Civil. IV. Título.

CONTRIBUIÇÃO A DOSAGEM DE CONCRETO DRENANTE PARA PAVIMENTAÇÃO

JULIO CESAR ABREU FILHO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 22 de Julho, 2026.

Banca Examinadora:

Alexandre Lima de Oliveira, Doutor

Rafael Andrade de Souza, especialista
Instituto Federal de Santa Catarina

Juliana Machado Casali, Doutora
Instituto Federal de Santa Catarina

Luciana Maltez Calçada, Doutora
Instituto Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

RESUMO	5
1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO NORMATIVA	6
2.1 Objeto e abrangência das normas	6
2.2 Requisitos hidráulicos e o fluxo em meios porosos	7
2.3 Requisitos mecânicos e geométricos do revestimento	7
2.4 Trabalhos desenvolvidos na área	8
3 MATERIAIS E MÉTODOS	9
3.1 Materiais	9
3.2 Massa unitária compactada	10
3.2.1 Massa unitária compactada com britas	11
3.2.2 Massa unitária compactada com britas e areia	13
3.3 Traços e dosagem	14
3.4 Moldagem e compactação dos corpos de prova	16
3.5 Ensaios	17
3.5.1 Teor de vazios	18
3.5.2 Permeabilidade	18
3.5.3 Resistência a compressão	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1 Teor de vazios, permeabilidade e resistência	20
4.2 Análise multivariável e correlações entre as propriedades	23
4.3 Análise estatística e discussão de resultados	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
ABSTRACT	27
REFERÊNCIAS	27

CONTRIBUIÇÃO A DOSAGEM DE CONCRETO DRENANTE PARA PAVIMENTAÇÃO

Julio Cesar Abreu Filho^{1*}

RESUMO

O concreto drenante é uma alternativa promissora para a pavimentação urbana, visto sua estrutura porosa que viabiliza a infiltração da água e ameniza o escoamento superficial. Diante disso, o presente artigo concentrou-se na dosagem do material, avaliando a influência da composição granulométrica e energia de compactação sobre suas propriedades físicas e mecânicas. Para isso, inicialmente, recorreu-se ao ensaio de massa unitária compactada, conduzido com dois tipos de brita e posteriormente com adição de areia, otimizando o esqueleto granular para obter um maior empacotamento. A partir disso, analisou dois traços em massa, 1:3,5 e 1:5, avaliando com 5, 10, 15 e 20 golpes. Posteriormente, obteve-se o teor de vazios, a permeabilidade e a resistência à compressão, conforme às diretrizes da norma brasileira. Constatou-se, que o teor de vazios mínimo necessário para obtenção de permeabilidade é de aproximadamente 14,5% ou superior, demonstrando facilidade para obtenção da permeabilidade mínima de norma e a dificuldade para obtenção da resistência à compressão exigida. Logo, seria necessária a busca por alternativas capazes de reduzir parcialmente o teor de vazios e densificar o esqueleto granular, que possibilitariam ganhos de resistência à compressão e manteriam o coeficiente de permeabilidade acima do limite exigido por norma.

Palavras-Chave: Concreto permeável. Índice de vazios. Permeabilidade. Resistência à compressão.

¹ * Acadêmico do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina.
julio.af@aluno.ifsc.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A rápida urbanização das cidades brasileiras, nas últimas décadas, substituiu as superfícies naturais por coberturas impermeáveis, alterando o ciclo hidrológico nas regiões urbanas. Com isso, é causado um desequilíbrio, resultando em sobrecarga das estruturas de drenagem e possibilitando que chuvas moderadas se tornem enchentes constantemente (TUCCI, 2012).

Os sistemas tradicionais de microdrenagem foram construídos com base em séries históricas e tempos de recorrência que, não necessariamente, acompanharam a evolução da ocupação urbana (ADASA, 2023). A ampliação das redes de drenagem, além de demandar elevados investimentos, tende a transferir os impactos para jusante, sem atuar diretamente na origem do escoamento (BRITO, 2006). Por essa razão, tornam-se necessárias soluções compensatórias, como o concreto drenante (ADASA, 2023).

Segundo a NBR 16416-1 (ABNT, 2026), ele é definido como “concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade”. Isso se deve à supressão de agregado fino, utilizando-se apenas a quantidade necessária para manter a coesão entre os agregados. Com índice de vazios na ordem de 15 a 35% do volume, porém esse teor de vazios tem seu custo, a resistência, devido à baixa área de contato entre as partículas (REPETTE, 2011).

2 REVISÃO NORMATIVA

No contexto brasileiro, o emprego de concreto permeável em pavimentação é orientado por duas normas. A NBR 16416-1 (ABNT, 2026), que estabelece os requisitos e procedimentos para pavimentos de concreto drenante intertravado, além das NBR 9781-1 (ABNT, 2026) e NBR 9781-2 (ABNT, 2026), que definem os requisitos dos componentes de concreto para pavimentação intertravada e os métodos de ensaio, respectivamente.

2.1 Objeto e abrangência das normas

A NBR 16416-1 (ABNT, 2026) e NBR 16416-2 (ABNT, 2026) tratam dos pavimentos de concreto permeável, sendo a primeira voltada aos sistemas compostos

por peças intertravadas, enquanto a segunda estabelece diretrizes do concreto moldado no local. As normas abrangem todo o processo do concreto, desde o projeto até execução, e especificamente a taxa de infiltração de todo o conjunto. Além disso, a NBR 9781 (ABNT, 2026), também foi recentemente atualizada, substituindo a versão anterior, publicada em 2013.

2.2 Requisitos hidráulicos e o fluxo em meios porosos

O comportamento de permeabilidade é o requisito hidráulico do material. A norma vigente elevou o coeficiente mínimo de 0,001 m/s na NBR 16.416 (ABNT, 2015) para 0,00254 m/s na NBR 16.416-1 (ABNT, 2026), tornando o requisito de permeabilidade muito mais rigoroso e impactando diretamente nas misturas com maior índice de finos. O coeficiente de permeabilidade consiste na velocidade de percolação e é obtido através da razão entre vazão e área da face. Na tabela 1, é possível observar a taxa de infiltração mínima, exigida pela norma.

Tabela 1 – Determinação do coeficiente de permeabilidade.

Tipo de revestimento	Taxa de infiltração mínima (m/s)
Peças de concreto simples com juntas alargadas (PP-JA)	$> 2,54 \times 10^{-3}$
Peças de concreto permeável (PP-CP)	
Placas de concreto permeável (PP-PCP)	

Fonte: NBR 16.416-1 (2026, p. 17).

2.3 Requisitos mecânicos e geométricos do revestimento

No requisito mecânico, a NBR 16.416-1 (ABNT, 2026) estabelece que o revestimento deve possuir uma resistência à compressão característica superior a 25 MPa para peças de concreto intertravado aos 28 dias.

Embora a norma estabeleça a idade de 28 dias para a avaliação da resistência à compressão, neste estudo os ensaios foram realizados aos 21 dias de cura, em razão das limitações relacionadas ao cronograma experimental e à disponibilidade do laboratório e dos equipamentos necessários. A antecipação dos ensaios mostrou-se necessária para viabilizar a conclusão de todas as etapas previstas no período

destinado à pesquisa. Ressalta-se, contudo, que todos os corpos de prova foram submetidos ao mesmo período e às mesmas condições de cura, preservando-se a uniformidade do procedimento e a comparabilidade entre as diferentes misturas analisadas.

A resistência a compressão ainda é complementada por um requisito de extrema importância: a espessura mínima da peça de concreto intertravado, que é fixada em 60 mm para tráfego de pedestres e 80 mm para tráfego leve pela NBR 16416-1 (ABNT, 2026), como pode-se observar na tabela 2.

Tabela 2 – Resistência mecânica e espessura mínima para peças de concreto.

Classe da peça (ABNT NBR 9781-1)	Tipo de componente	Tipo de solicitação	Espessura nominal mínima (mm)	Resistência à compressão (MPa)
PP-CP-TP-60	Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 25
PP-CP-TV-80			80	
PP-CP-TV-100			100	
PP-JA-TV-60	Peça com junta alargada	Tráfego de veículos	60	≥ 35
PP-JA-TV-80			80	
PP-JA-TV-100			100	

Fonte: NBR 16.416-1 (2026, p. 15).

2.4 Trabalhos desenvolvidos na área

Além das normas, alguns trabalhos desenvolvidos na área do concreto drenante, que indicam métodos de dosagem e estudaram a influência da distribuição granulométrica sobre o comportamento do material.

Nazaroff (2019), analisou a execução de pavimentos de concreto drenante, deslocando o foco para a execução dos pavimentos, abordando os passos necessários para a execução do pavimento, desde o projeto, até execução detalhada. Além disso, o estudo compreendeu a análise de diferentes estudos realizados por outros autores.

Entre as contribuições mais diretamente voltadas à dosagem e à distribuição granulométrica, destaca-se a de Pereira et al. (2024), que propuseram um método de dosagem racional para peças intertravadas de concreto drenante. Primeiramente

indicaram o estudo da composição das pastas cimentícias, através da avaliação pela fluidez no ensaio do cone de Kantro, posteriormente estudando a composição granulométrica através de ensaios com diferentes proporções de agregados. Realizando a medição e otimização da quantidade da pasta utilizada para envolver as partículas visualmente, os autores obtiveram composições capazes de atender simultaneamente aos requisitos de permeabilidade e de resistência da NBR 16.416 (ABNT, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a execução do concreto drenante, foi empregado cimento CP II-Z da marca Votorantim, que foi obtido com uma central de concreto. Para os agregados graúdos, foram selecionadas duas britas, comercialmente denominados brita 0 e brita 1, e enquadrados, respectivamente, nas zonas granulométricas 4,75/12,5 mm e 9,5/25 mm, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022), ambas de origem granítica, disponibilizadas pelo laboratório do IFSC. Para os agregados miúdos, foram considerados dois materiais: areia de duna, nomeada como areia 1, e areia natural média, indicada como areia 2. Com o objetivo de estudar a influência do agregado miúdo no desempenho do material, considerando as diferenças decorrentes de sua origem. Por se tratar de um concreto seco, foi adicionada a máxima quantidade de água desde que não houvesse colmatção de vazios por conta do volume ou da fluidez da pasta, exigindo que a adição fosse de forma controlada durante o processo de mistura.

A reprodutibilidade dos resultados em concreto drenante depende da caracterização das matérias-primas, as massas específicas e a composição granulométrica estão apresentadas nas tabelas 3 e 4, respectivamente, sendo a massa específica imprescindível para o cálculo do teor de vazios das misturas. Cabe destacar a ocorrência de desvios em relação aos limites estabelecidos para as faixas granulométricas dos agregados. Na brita 0, a peneira de abertura 6,3 mm apresentou retenção de 69% da massa, valor superior ao limite normativo de 65%. De modo semelhante, na brita 1, a peneira de abertura 12,5 mm reteve 73% da massa, também excedendo o limite máximo de 65% previsto na NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 3 – Massa específica dos materiais utilizados.

Material	Massa específica (kg/dm³)
Cimento Portland CP II-Z	3,100
Brita 0	2,644
Brita 1	2,642
Areia 1	2,610
Areia 2	2,565
Água	1,000

Fonte: o próprio autor, 2026.

Tabela 4 – Composição granulométrica dos materiais utilizados.

Peneira com abertura de malha	Brita 0	Brita 1	Areia 1	Areia 2
19 mm	-	2	-	-
12,5 mm	-	73	-	-
9,5 mm	5	96	-	-
6,3 mm	69	99	-	-
4,75 mm	93	100	-	-
2,36 mm	100	-	-	19
1,18 mm	-	-	-	53
600 µm	-	-	10	73
300 µm	-	-	80	89
150 µm	-	-	100	96

Fonte: o próprio autor, 2026.

3.2 Massa unitária compactada

A primeira etapa consistiu no estudo de massa unitária compactada, que teve por objetivo identificar a mistura com maior grau de compactação e menor volume de vazios, sendo avaliadas duas variáveis (somente britas e brita e areia). O estudo consistiu na introdução de dois materiais de granulometrias distintas, previamente dosados em proporções definidas de massa e, em seguida, misturados até a obtenção de uma composição homogênea. Após a homogeneização, uma parcela da mistura foi introduzida em um recipiente de volume interno conhecido (6,09 dm³), sendo

submetida ao procedimento de compactação através de impacto. Ao término dessa etapa, obteve-se a massa do material compactado.

A partir da massa unitária compactada e das massas específicas dos materiais constituintes, foi possível estimar o volume efetivamente ocupado pelas partículas sólidas e, conseqüentemente, o volume de vazios existente entre elas. Dessa forma, o procedimento permitiu avaliar a eficiência do empacotamento granular proporcionado por cada combinação, identificando as proporções em que as partículas de menor dimensão preencheram parte dos espaços existentes entre as partículas maiores.

Quanto maior a massa de material acomodada no recipiente de volume conhecido, maior o grau de empacotamento e menor o volume de vazios entre os agregados. Entretanto, no contexto do concreto drenante, a maior eficiência de empacotamento não representa necessariamente o melhor desempenho, uma vez que a redução excessiva dos vazios pode comprometer a formação da rede de poros interconectados responsável pela permeabilidade do material.

3.2.1 Avaliação somente com agregado graúdo

O processo iniciou-se utilizando agregado graúdo denominados brita 0 e 1. Primeira análise completou-se o recipiente com brita 0. A seguir analisou gradualmente frações de brita 1 até a composição 50% brita 0 e 50% brita 1. A cada adição, a mistura foi homogeneizada, inserida no recipiente, compactada e pesada (Imagem 1), posteriormente o processo foi repetido, iniciando com brita 0.

Figura 1 - Avaliação de mistura (50/50).



Fonte: o próprio autor (2026).

Após essa análise, observou-se que a mistura com as duas partes igualmente fracionadas atingiu a maior compactação, com densidade de 1,538 kg/dm³, possuindo o menor teor de vazios do conjunto (41,8%). A menor eficiência no empacotamento, das misturas foi observada na composição apenas com brita 1, possuindo a menor densidade 1,441 kg/dm³ e maior teor de vazios com 45,5%. Isso ocorre, pois, as partículas de brita 0 preenchem os espaços deixados pela brita 1 e assim o todo é preenchido.

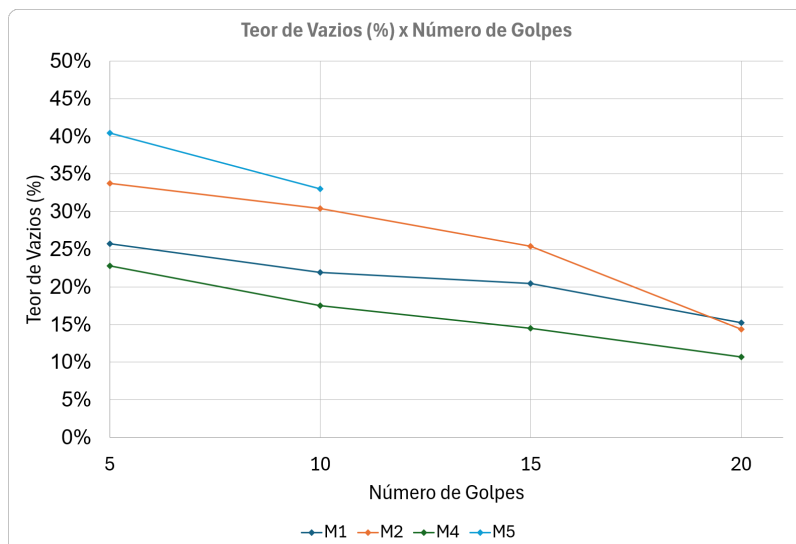
Tabela 5 – Massa unitária compactada B0 e B1.

Brita 0		Brita 1		Total	Teor de Vazios
%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	Peso (kg)	%
100	9,229	0	0	9,229	42,71
75	7,003	25	2,334	9,337	42,02
50	4,685	50	4,685	9,370	41,81
25	2,332	75	6,997	9,329	42,05
0	0	100	8,773	8,773	45,50

Fonte: o próprio autor, 2026.

A relação entre a composição dos agregados e o teor de vazios, na tabela 5, é explicada pelo empacotamento. A brita 1 tem uma granulometria maior, de modo que os interstícios não podem conter partículas de mesma granulometria, quando os grãos menores do agregado 0 são adicionados, complementando esses espaços, a maioria dos vazios é preenchida, aumentando a densidade do conjunto. No entanto, existe uma proporção ótima. Ao introduzir maior quantidade de agregados finos à mistura, os vazios entre os grãos maiores passam a ser preenchidos. No entanto, quando há excesso de finos, esses grãos menores deixam de apenas ocupar os espaços vazios e começam a deslocar as partículas maiores. Para os materiais analisados, foi possível observar que a maior compactação ocorreu na proporção de 50% de brita 0 e 50% de brita 1, resultando no arranjo com maior grau de empacotamento.

Figura 2 – Teor de britas *versus* teor de vazios (B0 e B1).



Fonte: o próprio autor (2026).

3.2.2 Avaliação com agregado graúdo e agregado miúdo

Após a determinação da porcentagem com menor teor de vazios para agregados graúdos, analisou o efeito da incorporação de areia no empacotamento, fixando 50% de brita 0 e 50% de brita 1, e variando somente o teor de agregado miúdo (areia 1). Assim, através da adição e homogeneização do mesmo, como é possível observar na figura 3. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6 e observou um aumento significativo na massa unitária e uma redução no teor de vazios, à medida que os agregados miúdos foram incorporados no esqueleto principal. O maior empacotamento foi alcançado com 40% da areia 1, resultando em uma massa unitária de $1,960 \text{ kg/dm}^3$ e no menor teor de vazios de todas as misturas testadas (25,5%), demonstrando que o agregado miúdo tem bom resultado na densificação do esqueleto granular.

Porém, esse aumento da massa unitária deve ser tratado com cuidado na execução do concreto drenante. As partículas de areia ocupam o espaço intergranular e contribuem para a resistência mecânica, no entanto, reduzem a porosidade e a continuidade da rede de poros, responsável pela percolação da água. Em níveis elevados de agregado miúdo, pode ocorrer a obstrução dos vazios interligados, interferindo na permeabilidade do concreto. Nesse caso, nem sempre é benéfica a mistura com maior empacotamento, mas se deve analisar dois fatores para definição

do teor de areia, sendo eles: densificação da estrutura granular para aumento de resistência a compressão e conservação da permeabilidade da NBR 16416-1 (ABNT, 2026).

Tabela 6 – Massa unitária compactada B0, B1 e areia 1.

Brita 0		Brita 1		Areia		Total	Teor de Vazios
%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	Peso (kg)	%
40	4,432	40	4,432	20	2,216	11,079	31,02
30	3,583	30	3,583	40	4,777	11,942	25,46
25	2,879	25	2,879	50	5,758	11,516	28,03

Fonte: o próprio autor, 2026.

Figura 3 - Homogeneização da mistura.



Fonte: o próprio autor (2026).

3.3 Traços e dosagem

A dosagem de concreto drenante é crucial para que haja o equilíbrio entre a permeabilidade e a resistência à compressão. As recomendações do ACI (2010) estabelecem alguns parâmetros para dosagem, demonstrados na Tabela 7. A partir desses critérios, foram elaboradas cinco misturas com diferentes composições de agregados, cimento Portland e água, adotando-se as proporções, em massa, de 1:3,5 e 1:5. Essas relações afastam-se parcialmente das recomendações do ACI, que indicam proporções entre 1:4 e 1:4,5, com o objetivo de ampliar a faixa de investigação e avaliar a influência do teor de agregados sobre o comportamento mecânico e hidráulico do material.

Tabela 7 – Parâmetros de dosagem recomendados pelo ACI.

Parâmetro	Faixa recomendada
Consumo de cimento	270 a 415 kg/m ³
Consumo de agregados	1190 a 1480 kg/m ³
Relação água/cimento	0,27 a 0,34
Relação agregados/cimento	4 a 4,5
Relação agregado miúdo/gráudo	≤ 1,0

Fonte: ACI, 2010.

Inicialmente foram realizadas as misturas 1 e 2, apenas com agregados graúdos, posteriormente foram realizadas as misturas 3, 4, utilizando agregado miúdo do tipo areia 1. Por fim, foi realizada mistura 5 utilizando agregado miúdo, nomeado de areia 2. As composições das misturas são apresentadas na Tabela 7.

O teor de água é muito sensível e exige que a adição seja feita lentamente, até a obtenção de uma consistência visual capaz de revestir os agregados sem resultar em escoamento. Esse fenômeno corresponde à migração da pasta de cimento para a parte inferior do corpo de prova, provocado pelo excesso de água. A fluidez é especialmente crítica, pois, na compactação da pasta de cimento Portland, há tendência de escoamento para o fundo do molde, selando os poros e eliminando a permeabilidade do pavimento. Portanto, o maior teor de água deve ser encontrado a obter a pasta de cimento Portland a ser coesa e aderir aos grãos, porém seca o suficiente para não colmatar os vazios.

Tabela 8 – Composição das misturas estudadas.

Mistura	Brita 0 (kg)		Brita 1 (kg)		Areia (kg)		Cimento (kg)	Água (kg)	a/c
1:3,5 s/ areia	50%	3,500	50%	3,500	-	-	2,000	630,23	0,315
1:5 s/ areia	50%	2,500	50%	2,500	-	-	1,000	321,71	0,322
1:3,5 c/ areia 1	30%	1,575	30%	1,575	40%	1,500	1,500	537,37	0,358
1:5 c/ areia 1	40%	2,000	40%	2,000	20%	1,000	1,000	300,00	0,300
1:5 c/ areia 2	40%	3,000	40%	3,000	20%	1,500	1,500	419,00	0,279

Fonte: o próprio autor, 2026.

Na mistura 4 e 5, verificou-se a necessidade de reduzir o teor de areia, uma vez que a maior presença de partículas finas levou o volume de vazios a praticamente zero. Como consequência, a mistura apresentou comportamento excessivamente compacto e nenhuma capacidade de permeabilidade. Dessa forma, a redução do teor de areia foi adotada com o objetivo de restabelecer uma estrutura porosa mais aberta, preservando a continuidade dos vazios necessária para o desempenho do concreto drenante.

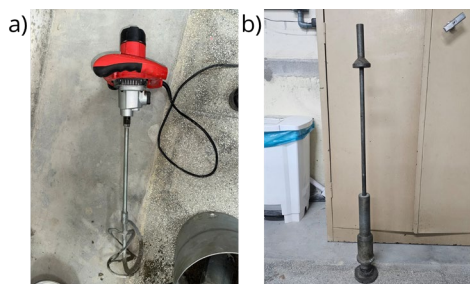
Além da proporção dos materiais, foi avaliada a influência da energia de compactação na produção de peças intertravadas quanto na moldagem local. Cabe ressaltar que a moldagem no local possui baixa trabalhabilidade e exige equipamento específico para compactação, visto isso, compreender o efeito desse esforço torna-se essencial. A compactação governa o rearranjo das partículas e, por conseguinte, o teor de vazios, a permeabilidade e a resistência a compressão. Para avaliá-la, as diferentes misturas foram submetidas a energia diferente em função dos números variados de golpes do soquete de Marshall.

3.4 Moldagem e compactação dos corpos de prova

Após a homogeneização dos materiais com a utilização de uma colher de pedreiro e misturador de argamassa (Figura 4.a), realizou-se a moldagem dos corpos de prova cilíndricos nos moldes 10x20. Começando pela separação dos materiais (Figura 5.a) e posterior mistura (Figura 5.b), após isso, adicionou-se a mistura ao molde em 2 camadas, com espessura de aproximadamente 4 centímetros cada, medidas com a régua, passando então pelo processo de compactação a cada camada utilizando o soquete de Marshall (Figura 4.b), através da altura de queda (0,4572 m) e do peso do soquete (4,540 kg), padronizado pela DNER-ME 107/94 (DNER, 1994), pode-se chegar a uma energia de compactação de 20,34 Joules por golpes, dessa forma, ao converter para a energia por área, obtém-se o valor de 2.591,04 J/m².

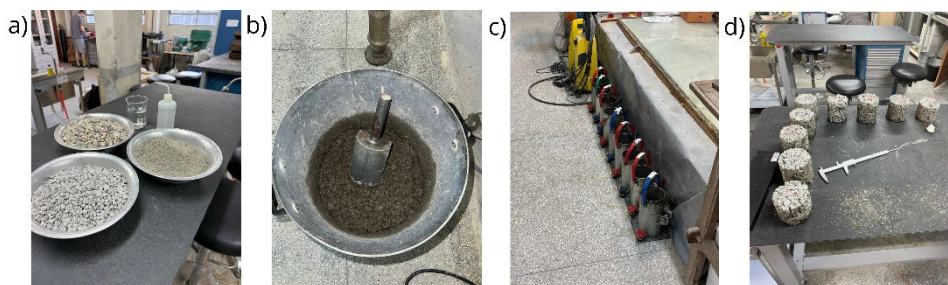
Para investigar o efeito da energia de compactação no comportamento das misturas, utilizaram-se diferentes níveis de compactação, variando entre 5 (101,70 J), 10 (203,40 J), 15 (305,10 J) ou 20 (406,80 J) golpes para cada mistura. Desse modo, foi possível analisar o efeito da energia de compactação, além da composição, no teor de vazios, permeabilidade e resistência a compressão.

Figura 4 - Misturador de argamassa e soquete de Marshall.



Fonte: o próprio autor (2026) e Souza (2026).

Figura 5 - Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: o próprio autor (2026).

Para investigar o efeito da energia de compactação no comportamento das misturas, utilizaram-se diferentes níveis de compactação, variando entre 5 (101,70 J), 10 (203,40 J), 15 (305,10 J) ou 20 (406,80 J) golpes para cada mistura. Desse modo, foi possível analisar o efeito da energia de compactação, além da composição, no teor de vazios, permeabilidade e resistência a compressão.

Os corpos de prova foram identificados de acordo com a mistura realizada e a energia aplicada, sendo mantidos no molde por 24 horas (Figura 5.c). Após a desmoldagem (Figura 4.d), foram submetidos a cura imersa.

3.5 Propriedade Avaliadas

A seguir serão apresentados como foram avaliadas as seguintes propriedades: teor de vazios, permeabilidade e resistência a compressão.

3.5.1 Teor de vazios

O teor de vazios foi determinado através da diferença entre o volume total do corpo de prova e do volume de sólidos. Para isso foram obtidas 2 medições de diâmetro e altura, utilizando um paquímetro, através da média foi determinado o volume geométrico. O volume de sólidos foi determinado através da somatória das razões entre a massa dos materiais e suas densidades, como é possível observar na fórmula 1. Para cada corpo de prova.

Fórmula 1 – Cálculo do índice de vazios.

$$V_s = \sum \frac{m}{\rho}$$

Fonte: o próprio autor (2026).

Sendo:

V_s : Volume de sólidos (dm^3);

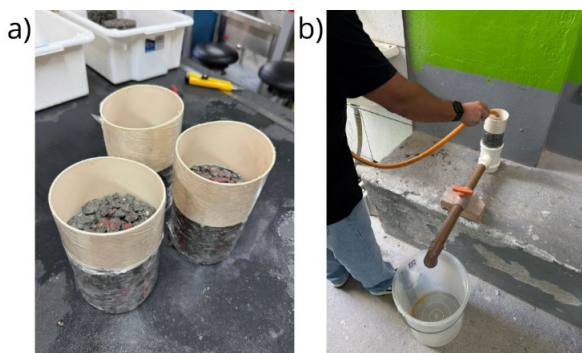
m : massa do material (kg);

ρ : massa específica do material (kg/dm^3).

3.5.2 Permeabilidade

A permeabilidade foi medida através do uso do permeâmetro, desenvolvido por Pereira et al. (2024) e disponibilizado para pesquisa. Os corpos de prova foram previamente vedados com papel filme (imagem 6.a) e saturados, garantindo que a água permeasse apenas através do corpo de prova, e não pelas suas laterais. Por fim, o corpo de prova foi inserido em um sistema de vasos comunicantes sob fluxo de água constante (Figura 6.b).

Figura 6 - Procedimento ensaio de permeabilidade com permeâmetro.

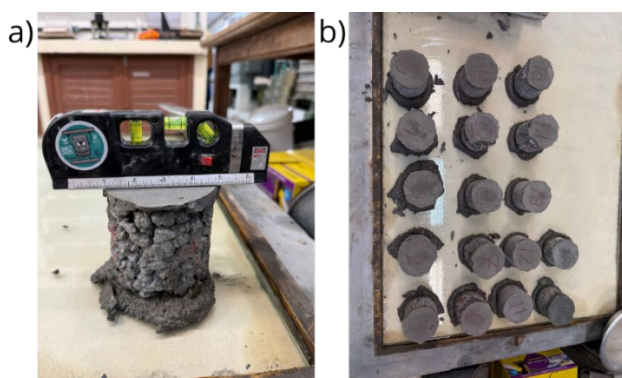


Fonte: o próprio autor (2026).

3.5.3 Resistência à compressão

Antes da avaliação da resistência à compressão, foi realizado o capeamento dos corpos de prova (figura 7.a e 7.b), a fim de proporcionar superfícies planas e paralelas, assegurando a distribuição uniforme das forças. Esse processo atua na correção das irregularidades decorrentes da moldagem, utilizando-se uma pasta de água e cimento Portland.

Figura 7 - Capeamento dos corpos de prova.



Fonte: o próprio autor (2026).

Figura 8 - Prensa hidráulica.



Fonte: o próprio autor (2026).

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido aos 21 dias, em razão de limitações relacionadas ao cronograma experimental, explicado anteriormente, na máquina universal de ensaio (imagem 8) em conformidade com as NBR 9781 (ABNT, 2026) e NBR 5739 (ABNT, 2018). Aos valores de tensão obtidos aplicou-se o fator de

correção, resultando na resistência à compressão corrigida, comparada ao valor mínimo de 25 MPa estabelecido pela NBR 16416-1 (ABNT, 2026).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teor de vazios, permeabilidade e resistência

A Tabela 8 demonstra os resultados experimentais individuais de cada mistura, em função do número de golpes do soquete Marshall. A mudança na energia de compactação causou alterações significativas na microestrutura interna das misturas, como era esperado. O aumento do número de golpes diminuiu o teor de vazios e a permeabilidade, enquanto aumentava a resistência à compressão, devido a maior área de contato entre os grãos.

Exceto na mistura M3, que apresentou comportamento distinto das demais, pois já se encontrava excessivamente densificada mesmo sob a menor energia de compactação. A diminuição da resistência em função do aumento da energia de compactação sugere que, após um elevado grau de compactação, a aplicação adicional de energia pode ter provocado a ruptura de ligações internas, o deslocamento da pasta e o surgimento de descontinuidades na matriz cimentícia.

Tabela 9 – Teor de vazios e resistência à compressão por número de golpes.

Mistura	Golpes	Teor de vazios (%)	Permeabilidade (m/s)	Resistência (MPa)
M1	5	25,77	0,0122	9,5
M1	10	21,06	0,0087	10,5
M1	10	22,75	0,0138	13,0
M1	15	20,44	0,0082	13,8
M1	20	15,21	0,0017	16,6
M2	5	33,77	0,0314	6,8
M2	10	30,39	0,0229	8,0
M2	15	25,37	0,0152	10,8

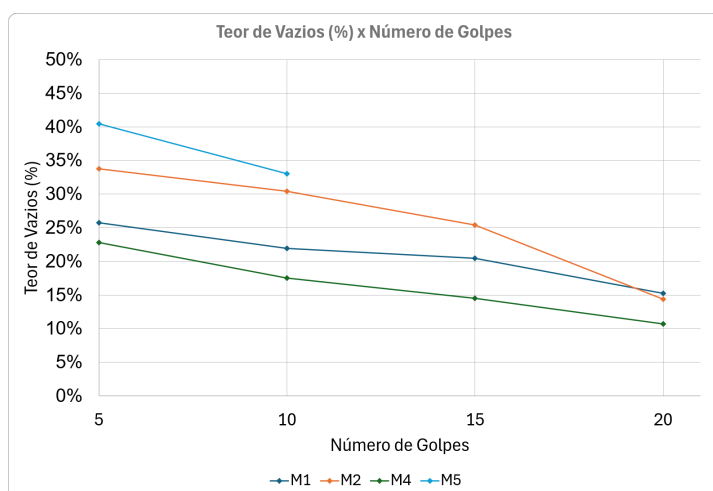
(continua)

Tabela 9 – Teor de vazios e resistência à compressão por número de golpes.

(conclusão)

Mistura	Golpes	Teor de vazios (%)	Permeabilidade (m/s)	Resistência (MPa)
M2	20	14,36	0,0006	15,2
M3	5	1,94	NÃO DRENANTE	47,9
M3	10	0,01	NÃO DRENANTE	46,7
M3	15	1,05	NÃO DRENANTE	42,1
M3	20	3,27	NÃO DRENANTE	27,9
M4	5	22,78	0,0085	9,8
M4	10	17,49	0,0028	11,3
M4	15	14,51	0,0005	15,4
M4	20	10,70	NÃO DRENANTE	25,2
M5	5	28,52	0,0086	5,0
M5	5	29,62	0,0130	3,6
M5	10	24,47	0,0044	5,5
M5	10	19,68	NÃO DRENANTE	13,0
M5	5	22,80	0,0018	9,3
M5	10	21,90	0,0026	4,6

Fonte: o próprio autor, 2026.

Figura 9 - Teor de Vazios *versus* Número de Golpes.

Fonte: o próprio autor (2026).

A influência da energia de compactação sobre o teor de vazios nas misturas permeáveis é observada na Figura 9, o aumento da energia diminuiu o teor de vazios devido provavelmente ao rearranjo e aproximação das partículas. Observa-se que a energia de compactação é uma variável de controle tão importante quanto a própria composição granulométrica.

Os traços sem agregado miúdo, M1 e M2, demonstraram viabilidade hidráulica e com permeabilidade em todas as energias de compactação. No traço M1 (1:3,5), o aumento de 5 para 20 golpes reduziu o teor de vazios em 10,7% e a permeabilidade em 86%, ao mesmo tempo em que elevou a resistência à compressão de 9,5 MPa para 16,6 MPa. No traço M2 (1:5), com menor teor de cimento Portland, observou os maiores valores de permeabilidade sob baixas energias de compactação, alcançando 0,0314 m/s com 5 golpes, porém a menor resistência a compressão (6,8 MPa). Cabe ressaltar que nenhuma das duas composições atingiu a resistência a compressão mínima de 25 MPa, exigida pela NBR 16416-1 (ABNT, 2026) para pavimentos permeáveis.

A partir da utilização do agregado miúdo (M3), com traço de 1:3,5, e adição de 40% de areia, observou um esqueleto muito compacto com índices de vazios nulos e comportamento impermeável, independente da energia de compactação. Em compensação, essa mistura apresentou as maiores resistências a compressão.

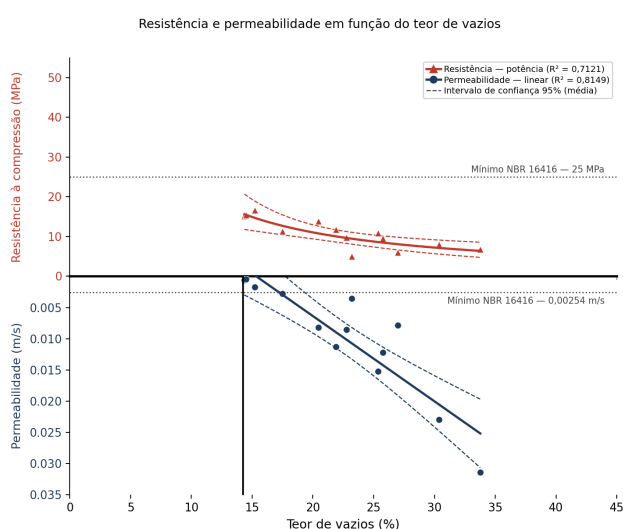
Por sua vez, a mistura M4, com traço 1:5, adição da areia 1, e redução da parte de agregado miúdo 20,0%. Observou permeabilidade na mistura de 5 golpes, (0,0085 m/s), valor dentro da norma, com resistência a compressão de 9,8 MPa. Cabe ressaltar que apenas na mistura 4 com 20 golpes, não houve permeabilidade. Esse traço evidencia claramente a influência da energia de compactação na permeabilidade e resistência a compressão das misturas.

Por fim, a mistura M5 apresentou elevada variabilidade em suas propriedades. Nos corpos de prova submetidos cinco golpes. Com a aplicação de dez golpes, observou permeabilidade de 0,0044 m/s, e comportamento não drenante, evidenciando a não uniformidade da mistura. A resistência à compressão também apresentou ampla dispersão, com coeficientes de variação de 49,6% e 59,7% para 5 e 10 golpes, respectivamente, sem tendência consistente em relação à energia de compactação. Dessa forma, obteve-se como maior resistência a compressão 13 MPa, não alcançando a resistência mínima estabelecida pela NBR 16416-1 (ABNT, 2026).

4.2 Correlações entre as propriedades

A correlação das três propriedades teor de vazios, permeabilidade e resistência a compressão observa os fatores físicos que governam o comportamento do concreto drenante. A relação entre resistência à compressão e teor de vazios é possível observar na Figura 10, indicando que a porosidade é o fator determinante na resistência a compressão. A dispersão indica que outros fatores também são relevantes no desempenho, como distribuição granulométrica e teor de pasta.

Figura 10 - Resistência à compressão e permeabilidade *versus* teor de vazios.



Fonte: o próprio autor (2026).

A correlação entre a permeabilidade e o teor de vazios (Figura 10) apresentou comportamento linear, resultando em R^2 elevado (0,8149), indicando que o teor de vazios calculado é um estimador confiável da permeabilidade, explica a forte proporcionalidade observada. A dispersão remanescente em torno da reta pode ser atribuída aos vazios não conectados, e a eventuais heterogeneidades decorrentes da homogeneização do material durante a mistura.

A diferença da mistura 5, que utiliza areia 2 mostrou, no entanto, a fragilidade desse sistema. Além da baixa resistência à compressão, com um valor máximo de apenas 13,0 MPa, a mistura teve 52% de coeficiente de variação no desempenho mecânico. Este desvio acentuado mostra a suscetibilidade do concreto drenante a diversidades na distribuição da pasta de cimento Portland, e condições locais de

moldagem, enfatizando a necessidade mais ajustes na granulometria ou na energia de compactação ou em mais de um dos parâmetros.

O confronto entre os gráficos da Figura 10 resume o principal desafio da dosagem, as composições que atingiram o coeficiente mínimo de permeabilidade de 0,00254 m/s, exigido pela NBR 16416-1 (ABNT, 2026), estavam abaixo do limite de resistência a compressão de 25 MPa, conforme Figura 10. Apesar de obtermos composições que excederam esse valor de resistência à compressão, das 23 misturas. Especialmente nas misturas M3 que possuíam com maior teor de areia e e M4 com 20 golpes, com alta energia de compactação, essas não mantiveram a capacidade de drenagem.

4.3 Análise estatística e discussão de resultados

A análise conjunta dos resultados apresentados de resistência à compressão e permeabilidade no concreto drenante, permitiu compreender o equilíbrio necessário entre resistência à compressão e permeabilidade. As M1 e M2, somente com agregado graúdo, em sua maioria, preservaram a rede de vazios interconectados e, com ela, a permeabilidade, porém apresentando uma resistência à compressão inferior a 13,8 MPa. Por outro lado, a mistura M3, cujo esqueleto é mais compacto inviabilizando a permeabilidade, obteve-se resistência a compressão igual a 47,9 MPa. Por sua vez, a mistura 4, à medida que aumentava de 5 para 20 golpes, diminuía a permeabilidade e aumentava a resistência à compressão. Observou que os dois comportamentos dependem não apenas da proporção dos materiais, mas também da energia de compactação.

A relação entre o teor de vazios e a resistência à compressão (Figura 10) apresentou R^2 igual a 0,7121, confirmando que o aumento do teor de vazios resulta na redução da resistência a compressão. Esse comportamento decorre do esqueleto granular do concreto drenante: os vazios reduzem a área de contato e concentram as tensões, de modo que a resistência decresce de forma acentuada à medida que a porosidade se eleva. O coeficiente de determinação obtido, embora expressivo, é inferior ao verificado para a permeabilidade, o que reflete a natureza multifatorial da resistência. Diferente da permeabilidade, governada pelos vazios interconectados, a resistência à compressão depende do teor da pasta de cimento, da distribuição granulométrica dos agregados, das características do agregado utilizado e, sobretudo,

da integridade da zona de transição interfacial. Esses fatores adicionais resultam em dispersão nos resultados e respondem pela parcela da variação da resistência não explicada pelo teor de vazios, justificando o R^2 inferior ao anterior.

Enquanto, a relação entre permeabilidade e teor de vazios apresentou comportamento linear (Figura 10), com R^2 elevado (0,8149). O teor de vazios foi determinado pela diferença entre o volume total do corpo de prova, obtido a partir de suas dimensões geométricas, e o volume de sólidos, calculado com base nas massas dos materiais e em suas respectivas massas específicas. Esse procedimento quantifica a porosidade total do corpo de prova, não apenas os vazios interconectados. Logo, a dispersão remanescente em torno da reta pode ser atribuída aos vazios não interconectados, que é contabilizada na medição sem contribuir para a permeabilidade, além das eventuais heterogeneidades da mistura.

A variabilidade da mistura M5, produzida com a areia 2, apresentou desempenho inferior. Esse comportamento pode estar associado as características do agregado utilizado e ao método de moldagem, que resultaram em valores de resistência à compressão inferiores a 13,0 MPa e em um coeficiente de variação de 59,78% para os corpos de prova com 10 golpes.

Dessa forma, destaca-se a importância do coeficiente de variação como indicador da dispersão dos resultados, bem como a necessidade de uma padronização rigorosa em todas as etapas de produção, condição essencial para o uso confiável do material.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, observou-se que a determinação da massa unitária compactada se mostrou eficaz para determinação do ponto de máximo empacotamento granular, porém não completamente eficiente para a execução do concreto drenante. Por sua vez, a energia de compactação, por sua vez, revelou-se variável de mesma relevância que a composição granulométrica na resistência à compressão e permeabilidade da mistura.

Ficou evidente que, para os agregados selecionados e o cimento Portland CP II-Z empregados, nenhuma das misturas atendeu à permeabilidade mínima de 0,00254 m/s e à resistência à compressão característica mínima de 25 MPa, aos 21 dias, pela NBR 16.416 (ABNT, 2026). A relação entre as propriedades analisadas,

evidenciada pela correlação inversamente proporcional entre o teor de vazios e a resistência à compressão, e pela correlação direta entre o teor de vazios e a permeabilidade, mostrou-se como o principal fator limitante para a obtenção de um material totalmente adequado aos requisitos estabelecidos.

Conclui-se, portanto, que entre as composições avaliadas, a mistura 2 submetida a 15 golpes apresenta ampla margem de permeabilidade: com coeficiente de 0,0152 m/s, muito superior ao mínimo de 0,00254 m/s exigido pela NBR 16416, enquanto a resistência à compressão, de 10,8 MPa, permanece abaixo do valor mínimo exigido pela NBR 16.416 (ABNT, 2026) de 25 MPa. Essa margem na permeabilidade permite intervir em outros fatores da mistura para elevar a resistência sem comprometer a permeabilidade. Nesse sentido, o aumento do teor da pasta de cimento Portland ou a redução da relação água/cimento constituem alternativas capazes de reduzir parcialmente o teor de vazios e densificar o esqueleto granular, possibilitando ganhos de resistência à compressão e mantendo o coeficiente de permeabilidade acima do limite exigido. Contudo, caso tais medidas não sejam suficientes, para a execução do concreto drenante com mínima resistência a compressão, torna-se necessário o estudo de outras dosagens.

A incorporação de agregado miúdo melhorou de modo expressivo a resistência à compressão, porém a sua dosagem deve ser rigorosamente controlada, uma vez que o excesso colmata a estrutura de vazios e compromete a permeabilidade. Os resultados apontam pela Figura 10, um teor de vazios de, aproximadamente, 14,5% ou superior para obtenção da permeabilidade mínima exigida pela NBR 16.416 (ABNT, 2026), esse patamar, aliado ao adequado controle da energia de compactação, constitui direção promissora na busca do equilíbrio entre os requisitos de permeabilidade e resistência à compressão.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar outras faixas granulométricas, composições de massa unitária, além diferentes tipos de agregados, principalmente grossas. Além disso deve-se avaliar o emprego de aditivos químicos, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre a sua influência.

CONTRIBUTION TO THE MIX DESIGN OF PERMEABLE CONCRETE FOR PAVEMENT

ABSTRACT

Permeable concrete is a promising alternative for urban paving, given its porous structure, which allows water to infiltrate and reduces surface runoff. In light of this, this article focused on the material mix design, evaluating the influence of particle size distribution and compaction energy on its physical and mechanical properties. To this end, the study initially employed a compacted unit weight test, conducted with two types of crushed stone and subsequently with the addition of sand, optimizing the granular skeleton to achieve greater packing density. Based on this, two mass mix proportions—1:3.5 and 1:5—were analyzed, with compaction performed using 5, 10, 15, and 20 blows. Subsequently, the void content, permeability, and compressive strength were determined in accordance with the guidelines of the Brazilian standard. It was found that the minimum void content required to achieve permeability is approximately 14.5% or higher, demonstrating that it is relatively easy to achieve the minimum permeability required by the standard but difficult to achieve the required compressive strength. Therefore, it would be necessary to seek alternatives capable of partially reducing the void content and densifying the granular skeleton, which would enable gains in compressive strength while maintaining the permeability coefficient above the limit required by the standard.

Keywords: Permeable concrete, Void ratio, Permeability, Compressive strength.

REFERÊNCIAS

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

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

ABNT. **NBR 7211: agregados para concreto — requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. **NBR 9781-1: componentes de concreto para pavimentação intertravada – parte 1: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ABNT. **NBR 9781-2: componentes de concreto para pavimentação intertravada – parte 2: métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ABNT. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. **NBR 16416-1: pavimento permeável – parte 1: execução de pavimento permeável intertravado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ABNT. **NBR 16416-2: pavimento permeável – parte 2: execução de pavimento permeável de concreto moldado no local.** Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ABNT. **NBR 16416: pavimento permeável de concreto – Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal.** 2. ed. Brasília, DF: ADASA; UNESCO, 2023. Disponível em: fonte citada. Acesso em: 7 jul. 2026.

BRITO, Débora Silva de. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem.** 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. Disponível em: repositório da UnB. Acesso em: 11 jul. 2026.

DNER. **DNER-ME 107/94: mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica: ensaio Marshall.** Rio de Janeiro: DNER, 1994. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me107-94.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2026.

NAZAROFF, Jordana Pietrowski Pimenta. **Pavimento de concreto drenante: uma análise de execução.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

PEREIRA, Raquel Serquiz Arruda et al. **Contribuição ao estudo de dosagem de peças intertravadas de concreto permeável para pavimentação.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 65., 2024, Florianópolis. Anais [...]. São Paulo: IBRACON, 2024.

REPETTE, Wellington L. **Concretos de última geração e para fins especiais.** In: IBRACON (org.). *Concreto: ciência e tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1807-1842.

TUCCI, Carlos E. M. *Gestão da drenagem urbana.* Brasília, DF: CEPAL; IPEA, 2012. 50 p. (Textos para Discussão CEPAL-IPEA, n. 48). Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs_Ipea_Cepal/tdcepal_048.pdf. Acesso em: 7 jul. 2026.