

Contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de dosagem para concreto permeável baseada no desempenho

Ricardo Pieralisi^{a,*}, Gersson F. B. Sandoval^b, Luiz Segura-Castillo^c, Medhelin N. C. Barbosa^d, Stéphanie T. Assunção^d

^aCentro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil (PPGECC), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

^bCentro de Tecnologia e Urbanismo (CTU), Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Brasil.

^cInstituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UdelaR), Uruguai.

^dGraduanda no curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

Informações

Recebido 25 Março 2020

Manuscrito revisado recebido
14 Maio 2020

Aceito 19 Maio 2020

Palavras-chave

Concreto permeável
Metodologia de dosagem
Volume de pasta
Desempenho

Resumo

Na atualidade não existe uma metodologia consolidada que permita determinar os consumos de materiais para obter as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, isso limita a aplicação deste concreto em obras civis. Além disso, as metodologias mais utilizadas para a dosagem de concreto permeável são fundamentadas no teste e repetição de experimentos. O objetivo deste artigo é contribuir no desenvolvimento de uma metodologia de dosagem simples, versátil e baseada no desempenho (propriedades finais) do concreto permeável. Para isso foi realizado um programa experimental focado em estudar a influência do volume da pasta nas propriedades finais (porosidade, densidade, velocidade de pulso ultrassônico, permeabilidade e resistência à compressão) do concreto permeável. Os resultados apresentaram diferenças estatisticamente significativas em todas as propriedades finais, exceto a velocidade de pulso ultrassônico, entre as composições com diferentes volumes de pasta. O estudo confirma a possibilidade de uso de uma metodologia experimental simples para dosar concretos permeáveis.

Contribution to the development of design method for pervious concrete based on performance

Article info

Received 25 March 2020

Received in revised form 14
May 2020

Accepted 19 May 2020

Keywords

Pervious concrete
Design method
Paste volume
Performance

Abstract

Currently, there is no consolidated methodology that allows the determination of material consumption to obtain the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete, which limits the application of this concrete in civil construction. In addition, the most used methodologies for designing pervious concrete are based on testing and repetition of experiments. The purpose of this paper is to contribute to the development of a simple, versatile design method based on the performance (final properties) of pervious concrete. To do so, an experimental program was carried out focusing on studying the influence of the paste volume on the final properties (porosity, density, ultrasound propagation velocity, permeability and compressive strength) of pervious concrete. The results showed statistically significant differences in all final properties, except the ultrasound propagation velocity, among compositions with different paste volumes. The study confirms the possibility of using a simple experimental methodology to design pervious concrete.

Contribución al desarrollo de una metodología de dosificación para hormigón permeable basada en el desempeño

Información

Recibido 25 Marzo 2020

Manuscrito revisado recibido
14 Mayo 2020

Aceptado 19 Mayo 2020

Palabras clave

Concreto permeable
Método de dosificación
Volumen de pasta
Desempeño

Resumen

Actualmente, no existe una metodología consolidada que permita determinar el consumo de materiales para obtener las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable, lo que limita la aplicación de este tipo de concreto en las obras civiles. Además, las metodologías más utilizadas para la dosificación de concretos permeables están fundamentadas en el ensayo y repetición de experimentos. El propósito de este artículo es contribuir al desarrollo de una metodología de dosificación sencilla y versátil basada en el comportamiento (propiedades finales) del concreto permeable. Para ello, se llevó a cabo un programa experimental enfocado a estudiar la influencia del volumen de la pasta en las propiedades finales (porosidad, densidad, velocidad de pulso ultrasónico, permeabilidad y resistencia a la compresión) del concreto permeable. Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas en todas las propiedades finales, excepto la velocidad del pulso ultrasónico, entre dosificaciones con diferentes volúmenes de pasta. El estudio confirma la posibilidad de utilizar una metodología experimental sencilla para dosificar el concreto permeable.

* Autor correspondente em: Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), PPG em Engenharia da Construção Civil (PPGECC), UFPR, Brasil.

E-mail: ricpialisi@ufpr.br (R. Pieralisi)

<https://doi.org/10.47842/juts.v3i1.19>

ISSN: 2675-780X

1. Introdução

O concreto permeável pode ser definido como um tipo especial de concreto utilizado em pavimentos. Em que, a relação entre os materiais constituintes e o nível de compactação devem ser definidos para gerar uma estrutura de poros conectados (PIERALISI et al., 2016; DEBNATH e SARKAR, 2018; XIE et al., 2018). Neste tipo especial de concreto, os teores dos materiais constituintes encontrados na literatura variam em função da aplicação final (NGUYEN et al., 2014; HASELBACH et al., 2018), sendo que convergem para: um teor de agregado miúdo nulo ou baixo (0 – 300 kg/m³); uso de agregados graúdos uniformes; relação água/cimento (a/c) entre 0,28 e 0,40. Essa composição conduz a um concreto permeável com elevada porosidade (10 – 35 %), com característica seca (slump 0) e densidade no estado endurecido entre 1600 kg/m³ e 2100 kg/m³ (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016a; ZHONG et al., 2018).

A estrutura de poros conectados possibilita a captação de águas pluviais e, se devidamente associados a sistemas de drenagem, transporte para o subleito. Isto porque, o concreto permeável tem como principal propriedade a sua elevada permeabilidade (devendo ser maior que 1 mm/s segundo a NBR 16416, 2015) como consequência do seu alto teor de vazios internos interconectados.

Apesar da ACI 522R-10 propor uma metodologia experimental baseada em teste-e-erro para dosar o concreto permeável, é comum encontrar na literatura estudos que partam de uma relação fixa entre materiais e a posterior avaliação das suas propriedades. Isso acontece porque não existe uma metodologia simples, versátil e orientada ao desempenho para dosar este tipo de concreto. Este fato tem limitado a utilização do concreto permeável no meio técnico devido à dificuldade em prever as propriedades mecânicas e hidráulicas sem ter uma noção clara dos consumos de materiais (ZHONG et al., 2018).

Algumas pesquisas (NGUYEN et al., 2014; ZHANG et al., 2020; WANG et al., 2020; XIE et al., 2020) propuseram metodologias de dosagem para facilitar/orientar a estimativa do consumo de materiais em função das propriedades requeridas.

Na Tabela 1, estão os principais trabalhos que têm estudado a dosagem do concreto permeável.

Como mostrado na Tabela 1, as metodologias de dosagem ainda estão em fase de desenvolvimento. Um ponto em comum é que todas focam na obtenção da quantidade de pasta necessária para recobrir os agregados e proporcionar as propriedades requeridas em projeto. Apesar dos avanços e boas estimativas das propriedades finais do concreto permeável, a maioria desses métodos são baseados em modelos de reconstrução ou no uso de técnicas complicadas. Esses pontos dificultam o emprego dessas metodologias em centrais de dosagem de concreto.

Nesse sentido, o objetivo deste artigo é contribuir no desenvolvimento de uma metodologia de dosagem simples, versátil e baseada no desempenho (propriedades finais) do concreto permeável. Para isso foram comparadas as propriedades finais (porosidade, densidade, velocidade de pulso ultrassônico, permeabilidade e resistência à compressão) de 3 composições (variando o volume de pasta) de concreto permeável.

2. Materiais e Métodos

2.1. Propriedade dos materiais

Cimento Portland Brasileiro CP V ARI foi utilizado na produção do concreto permeável. Foi utilizado agregado graúdo de origem basáltica, sendo peneirando para garantir que suas dimensões variassem entre 2,36 e 9,5 mm. A massa específica e absorção do agregado peneirado foram 2,64 g/cm³ e 0,27 %, respectivamente.

As três composições utilizadas neste estudo estão na Tabela 2. A principal variável relacionada à composição dos concretos permeáveis analisada foi a relação entre agregado e cimento (Ag/c) em massa, que variou de 2,79 até 3,53. A relação água/cimento (a/c) foi obtida para a composição T038 utilizando a metodologia proposta por Nguyen et al. (2014) e mantida constante para as outras misturas. Isso conduziu para relações entre pasta (cimento + água) e agregado (Pa/Ag) em massa

Tabela 1. Métodos de dosagem encontrados na literatura.

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

de 0,38 até 0,48. Segundo Pieralisi et al. (2017), a porosidade e a permeabilidade aumentam com a redução da relação Pa/Ag.

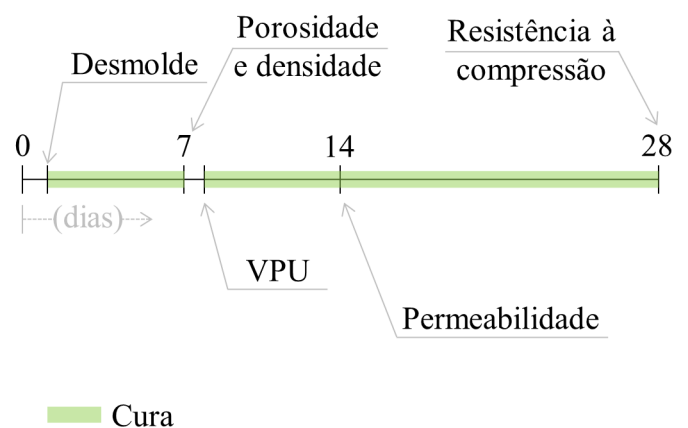
O processo de mistura foi realizado de acordo com a ASTM C192M para todas as composições. Após o processo de mistura, o concreto em estado fresco foi lançando em moldes cilíndricos (com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm), em três camadas. Cada camada foi compactada com 9 golpes do soquete Proctor (equivalente a uma energia de compactação de 128,53 kJ/m³). Foram produzidas 8 amostras para cada composição, totalizando 24 corpos de prova. Após a compactação, os moldes foram colocados em câmara úmida por um período de 24 horas. Depois, cada corpo de prova foi desmoldado e embrulhado em uma sacola plástica com água em seu interior por um período de 28 dias para garantir boas condições de cura.

Tabela 2. Composições dos concretos permeáveis.

Identifi- cação	Agregado (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Ag/c	a/c	Pa/Ag
T038	1347,97	382,26	3,53	0,34	0,38
T043	1349,12	432,92	3,12	0,34	0,43
T048	1353,89	484,97	2,79	0,34	0,48

2.2. Métodos

Conforme o cronograma de ensaios ilustrado na Figura 1, todos os corpos de prova tiveram as seguintes propriedades determinadas: porosidade e densidade no estado endurecido; velocidade de pulso ultrassônico; permeabilidade; e resistência à compressão. Aos 7 dias de cura, os corpos de prova foram removidos da cura e deixados em estufa com temperatura de (38 ± 3) °C até constância de massa (M_{seco} – massa em estado seco), como previsto pela ASTM C1754. Na sequência, os corpos de prova foram submersos em água (25 ± 1) °C por (30 ± 5) min e os procedimentos de choque

**Fig. 1.** Cronograma de realização dos ensaios.

mecânico indicados pela ASTM C1754 foram realizados até constância de massa (M_{sat} – massa em estado saturado). A porosidade total (P) e a densidade (D) foram calculadas segundo as Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente. Nessas equações: ρ_w representa a densidade da água (25 ± 1) °C; r e L representam o raio e a altura do corpo de prova cilíndrico, respectivamente.

$$P = \left[1 - \frac{(M_{seco} - M_{sat})}{\rho_w \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L} \right] 100 \quad (1)$$

$$D = \frac{M_{seco}}{\pi \cdot r^2 \cdot L} \quad (2)$$

Após as medições de porosidade e densidade, a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi calculada (Eq. 3) a partir da medida do tempo de percurso da onda ultrassônica (T_u), que foi realizada com um equipamento de ultrassom da marca PROCEQ/ Pundit Lab seguindo as diretrizes da ASTM C597 e as recomendações de Chandrappa e Biligiri (2016b) e Martins Filho et al. (2020). O T_u foi medido pela transmissão direta na direção longitudinal (altura – L) do corpo de prova. O equipamento foi configurado com frequência de vibração da onda ultrassônica de 24 kHz e com um ajuste no fator de amplificação do receptor de 500 (correspondente a 54 dB).

$$VPU = \frac{L}{T_u} \quad (3)$$

Aos 14 dias de cura, todas as amostras foram caracterizadas quanto a sua permeabilidade. Destaca-se que o ensaio de permeabilidade realizado durante esse programa experimental não segue nenhuma normativa específica, e que

a comunidade técnico-científica aceita duas configurações de permeâmetros: carga constante (SANDOVAL et al., 2020; WANG et al., 2020); e carga variável (ZHANG et al., 2020; DEBNATH; SARKAR, 2020). Segundo Sandoval et al. (2017), concretos permeáveis ensaiados em permeâmetros de carga constante apresentam coeficientes de permeabilidades superiores aos valores obtidos em permeâmetros de carga variável. Além disso, o coeficiente de variação dos resultados obtidos pelo permeâmetro de carga constante é menor. Desta forma, neste estudo foi utilizado um permeâmetro de carga constante com altura de carga igual a 20 cm (correspondente a um gradiente hidráulico – i – igual a 2). O procedimento de ensaio adotado foi o mesmo apresentado por Pieralisi et al. (2017), consistindo em medir a vazão (Q) que passa pelo corpo de prova em um intervalo de tempo de 60 segundos. O coeficiente de permeabilidade (K) foi calculado utilizando a Eq. 4.

$$K = \frac{Q \cdot i}{\pi \cdot r^2} \quad (4)$$

Ao término do período de cura (28 dias), os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2018). Todas as amostras foram mantidas em cura entre os dias dos ensaios.

3. Resultados e Discussões

3.1. Resultados

Na Tabela 3 podem ser observados as médias e desvios padrão (entre parênteses abaixo da média) de todas as propriedades ensaiadas: porosidade; densidade; VPU; permeabilidade; e resistência à

Tabela 3. Propriedades dos concretos permeáveis.

Identificação	Porosidade (%)	Densidade (kg/m ³)	VPU (m/s)	Permeabilidade (mm/s)	Resistência à compressão (MPa)
T038	24,48 (1,20)	1860,21 (21,11)	3920,67 (28,42)	4,18 (0,61)	8,16 (0,45)
T043	20,47 (1,52)	1929,24 (25,38)	4056,92 (53,58)	3,01 (0,16)	9,58 (0,45)
T048	15,91 (3,62)	2004,32 (60,66)	4070,33 (156,33)	1,67 (0,32)	11,34 (1,06)

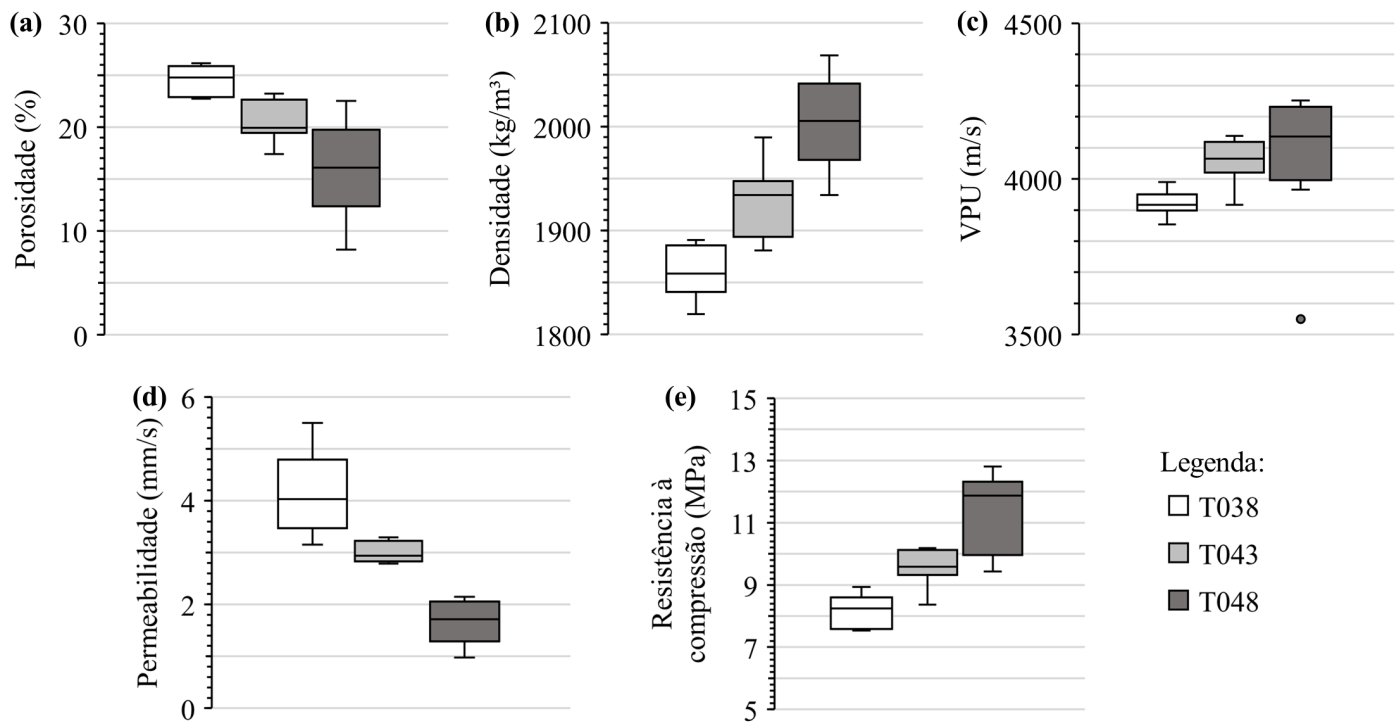


Fig. 2. Box-plot dos resultados de porosidade (a), densidade (b), VPU (c), permeabilidade (d) e resistência à compressão (e).

compressão. Foram realizados ANOVA e teste de Tukey para avaliar se a diferença dos resultados de cada propriedade foi estatisticamente significativa entre as três composições (ver Figura 2). Como pode ser observado na Figura 2a, o acréscimo no consumo de pasta gerou uma redução na porosidade total ($p\text{-valor} \leq 0,00017$ em todas as comparações ANOVA e $p\text{-valor} \leq 0,017$ em todas as comparações múltiplas no teste de Tukey). Como esperado, as misturas com maior volume de pasta (maior relação Pa/Ag) apresentaram maior porosidade. Entretanto, elas também apresentaram maior desvio padrão. A hipótese levantada é de que composições com maior quantidade de pasta conduzem a mais possibilidades que a estrutura porosa pode assumir, gerando maior variabilidade na porosidade. Por outro lado (ver Figura 2b), a densidade apresentou-se diretamente proporcional com a alteração no volume de pasta ($p\text{-valor} \leq 0,00019$ em todas as comparações ANOVA e $p\text{-valor} \leq 0,037$ em todas as comparações múltiplas no teste de Tukey).

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) não apresentou diferença estatisticamente significativa entre nenhuma das composições segundo o teste de Tukey (múltiplas comparações), como pode ser observado na Figura 2c. Isso pode estar relacionado

com a variação do volume de pasta não ter sido suficiente para ultrapassar o erro associado a sensibilidade do equipamento e a realização do ensaio. Outro ponto importante que dificulta a análise do concreto permeável com ultrassom é a heterogeneidade intrínseca do material. Nesse sentido, os resultados de VPU não serão utilizados na sequência do trabalho.

Como pode ser observado na Figura 2d, a permeabilidade, assim como a porosidade, reduziu com aumento da relação Pa/Ag ($p\text{-valor} \leq 4,40E-6$ em todas as comparações ANOVA e $p\text{-valor} \leq 0,00059$ em todas as comparações múltiplas no teste de Tukey). No entanto, a composição T038 (com menor volume de pasta) apresentou o maior desvio padrão, oposto do comportamento apresentado pela porosidade. Isso indica que a permeabilidade não está ligada somente a porosidade. Como observado por Pieralisi et al. (2017), a velocidade do fluxo de água é diretamente dependente do tamanho e conectividade dos poros. Por tanto, a permeabilidade depende tanto da porosidade quanto da tortuosidade (parâmetro que associa o tamanho e conectividade dos poros). No entanto, a tortuosidade é um parâmetro complexo de ser obtido experimentalmente (PIERALISI et al., 2017).

Por último (Figura 2e), a resistência à compressão

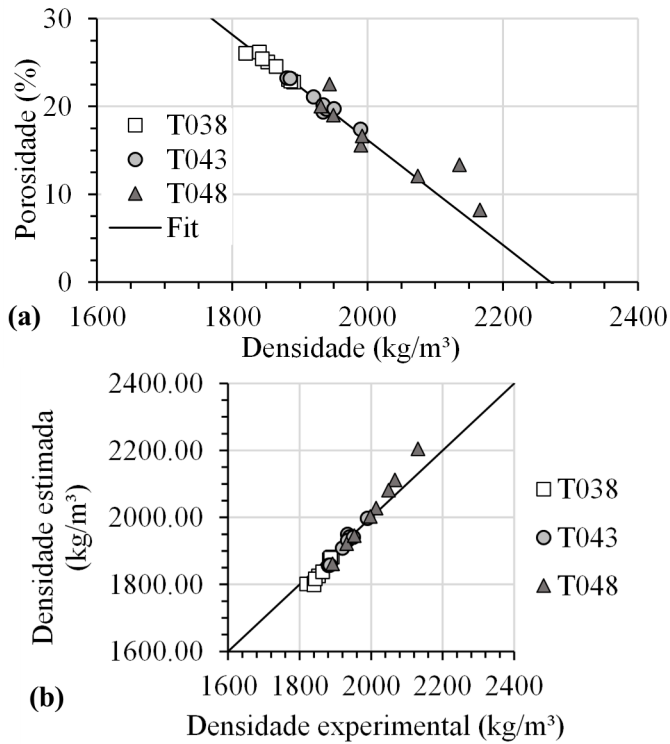


Fig. 3. Relação entre densidade e porosidade (a) e comparação entre densidade experimental e estimada (b).

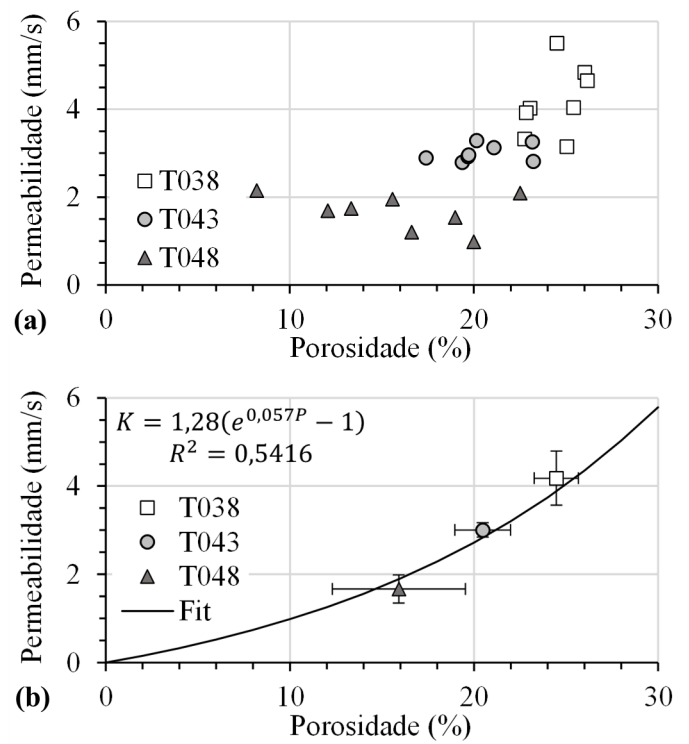


Fig. 4. Relação entre porosidade e permeabilidade.

aumentou com o aumento da relação Pa/Ag (p-valor $\leq 2,71E-5$ em todas as comparações ANOVA e p-valor $\leq 0,0094$ em todas as comparações múltiplas no teste de Tukey). O aumento do volume de pasta conduz à um incremento na ponte de união entre os agregados, distribuindo a tensão em uma área maior e evitando o efeito de resistência de ponta.

3.2. Correlações entre propriedades

A partir dos dados obtidos, algumas correlações podem ser realizadas com o objetivo de entender o comportamento do concreto permeável quando o volume de pasta (relação Pa/Ag) é alterado. Como mostrado na Figura 3a, existe uma correlação linear muito forte (acurácia de 0,696 % e precisão de 0,747 %) entre densidade e porosidade. Esse nível de correlação era esperado, uma vez que a granulometria e a mineralogia dos agregados, e a relação a/c não foram alteradas. O consumo real médio de cimento (c – já apresentado na Tabela 2) deve ser calculado com o resultado experimental de porosidade média (P – Tabela 3) e pela Eq. 5. Nessas equações: ρ_c , ρ_{ag} e ρ_a representam as densidades do cimento, do agregado e da água, respectivamente. A comparação entre a densidade experimental e a densidade estimada (derivada a

partir da Eq. 5) do concreto permeável pode ser observada na Figura 3b.

$$c = \frac{1 - \bar{P}}{\left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{Ag/c}{\rho_{ag}} + \frac{a/c}{\rho_a} \right)} \quad (5)$$

A relação entre porosidade e permeabilidade (ver Figura 4a) apresentou uma correlação moderada (acurácia igual a 0,609 mm/s e precisão igual a 0,385 mm/s), evidenciando que a permeabilidade não depende unicamente da porosidade. Dentre as equações empíricas utilizadas com frequência na literatura para correlacionar a porosidade com a permeabilidade, destacam-se: exponencial (SONEBIA et al., 2016; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016a; SANDOVAL et al., 2017; SANDOVAL et al., 2019); e exponencial natural (MAGUESVARI e NARASIMHA, 2013; ZAETANG et al., 2016; PIERALISI et al., 2017). Neste trabalho, optou-se pela utilização da função exponencial natural modificada (Eq. 6). Esta equação tem a característica de apresentar a permeabilidade (K) tendendo a 0 quando a porosidade (P) tende a 0, comportamento esperado

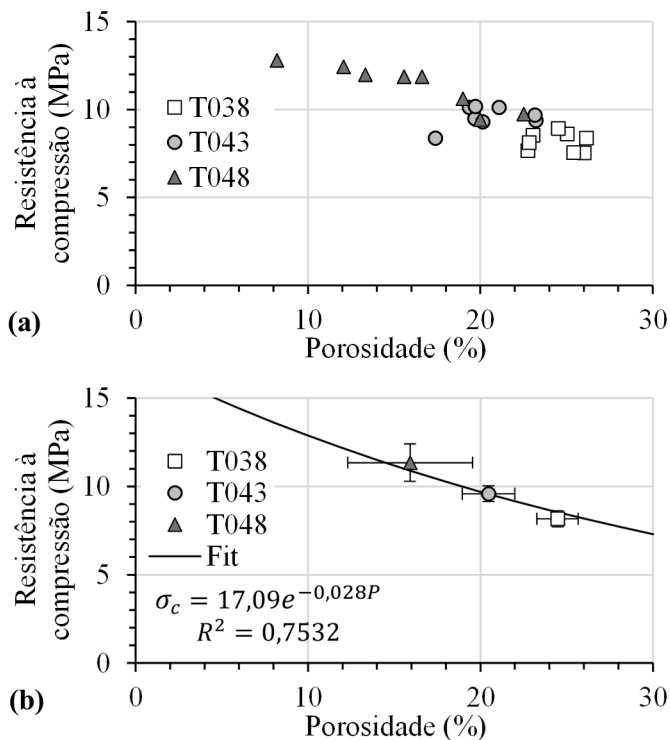


Fig. 5. Relação entre porosidade e resistência à compressão

para o concreto permeável. Na Figura 4b pode-se observar as médias e desvio padrão dos resultados experimentais e a plotagem da equação empírica ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

$$K = 1,28(e^{0,057 \cdot P} - 1) \quad (6)$$

A relação entre porosidade (P) e resistência à compressão (σ_c) para todas as amostras está apresentada na Figura 5a. A equação exponencial natural (Eq. 7) foi ajustada pelo método dos mínimos quadrado (apresentando uma acurácia de 0,632 MPa e uma precisão de 0,311 MPa) como modelo empírico para correlacionar essas duas propriedades (ver Figura 5b).

$$\sigma_c = 17,09e^{-0,028 \cdot P} \quad (7)$$

4. Proposta metodológica

Como apresentado anteriormente, existem algumas propostas (ACI 522R-10; NGUYEN et al.,

2014; ZHANG et al., 2020; WANG et al., 2020; XIE et al., 2020) de metodologias de dosagem para concreto permeável disponíveis na literatura. Sendo que a metodologia empírica apresentada pela ACI 522R-10 é mais utilizada atualmente.

A proposta metodológica apresentada neste artigo está baseada no Método IBRACON (ISAIA, 2011) para dosagem de concretos convencionais. O Método IBRACON (ISAIA, 2011) trabalha com modelos clássicos do concreto. No entanto, o modelo de Abrams não pode ser aplicado de forma direta em concretos não plásticos, como no caso do concreto permeável. Uma demonstração sobre a não aplicabilidade do modelo de Abrams foi apresentada no trabalho de Sonebi e Bassuoni (2013), que confirmou que o aumento da relação a/c conduz no aumento da resistência à compressão.

Desta forma, propõe-se a montagem de um diagrama de desempenho (ver Figura 6) como proposta metodológica para a dosagem do concreto permeável. Esse diagrama busca relacionar a razão entre materiais (sendo que este artigo está limitado no estudo da relação Pa/Ag) com as principais propriedades no estado endurecido (porosidade, permeabilidade e resistência à compressão). O ábaco foi construído pela: relação entre Pa/Ag e porosidade realizada pelo ajuste de uma equação linear (Eq. 8 – acurácia de 2,09 % e precisão 1,48 % ao considerar todos as amostras; acurácia de 0,12 % e precisão de 0,04 % ao realizar a análise com a média dos valores experimentais); relação entre permeabilidade e porosidade feita utilizando a Eq. 6; e relação entre permeabilidade e resistência à compressão feita utilizando a Eq. 6 e a Eq. 7. Com o ábaco construído, pode-se obter a composição otimizada entrando com a permeabilidade ou resistência à compressão requerida em projeto. Sendo que o ábaco pode ser utilizado desde que a propriedade requerida esteja entre os valores mínimo e máximo obtidos experimentalmente – a curva extrapolada (em tracejado) não pode ser empregada na dosagem.

$$P = -85,61(Pa/Ag) + 57,1 \quad (8)$$

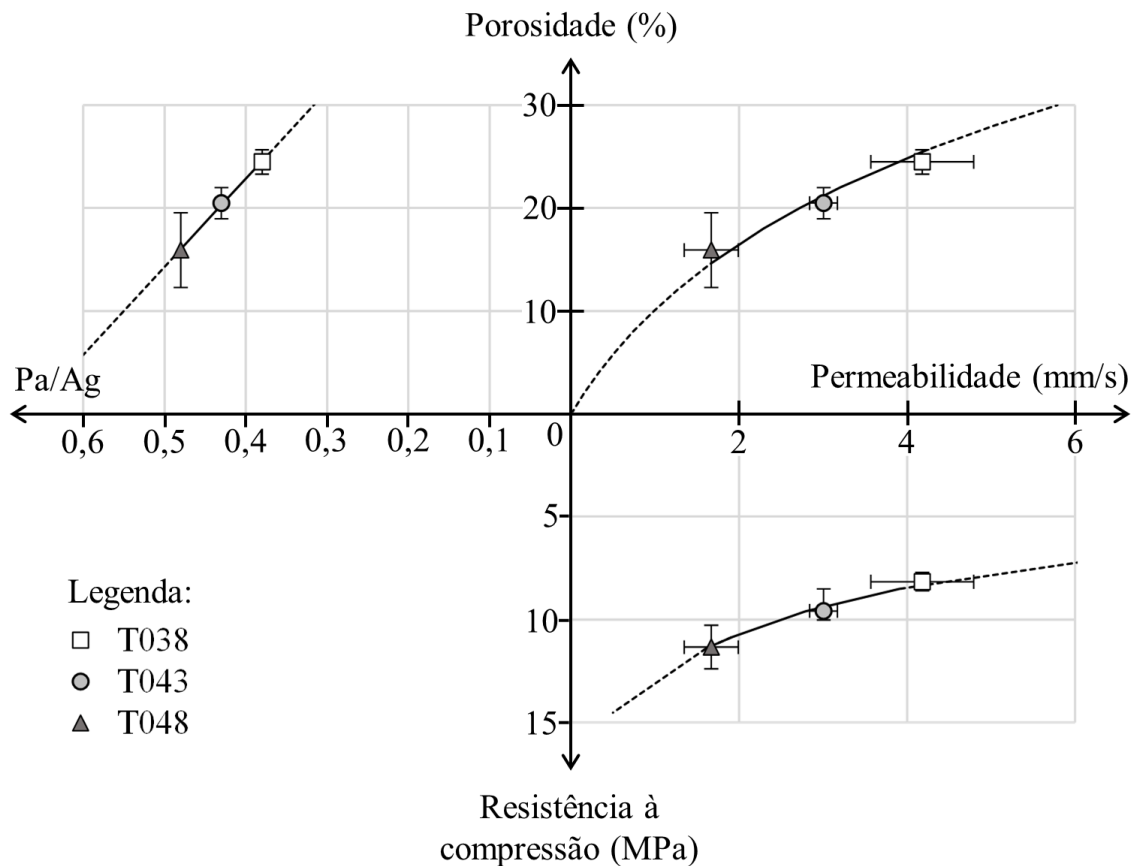


Fig. 6. Diagrama de desempenho.

O fluxograma dos passos necessários para obter a dosagem otimizada segundo uma determinada propriedade (permeabilidade ou resistência à compressão) a partir da metodologia de dosagem baseada no desempenho proposta neste trabalho está na Figura 7. O método inicia com a escolha do agregado e sua granulometria, que normalmente está relacionada com a disponibilidade do material, e da definição da propriedade (permeabilidade ou resistência à compressão) requerida em projeto. Vale ressaltar que o método pode ser estendido para outras propriedades, como: módulo de elasticidade; resistência à tração (na flexão ou indireta); resistência ao desgaste superficial; resistência à abrasão.

Na sequência, no mínimo 3 composições (relação Ag/c em massa) precisam ser escolhidas. Este trabalho utilizou o método proposto por Nguyen et al. (2014) para definir a relação a/c. Caso uma análise da relação a/c queira ser feita, 3 relações Ag/c deveriam ser preparadas para cada relação a/c em estudo. As misturas devem ser preparadas e as propriedades finais devem ser analisadas nas idades correspondentes.

Com todos os dados de composição associado às propriedades finais, o diagrama de desempenho (similar ao apresentado na Figura 6) pode ser construído. Com o diagrama de desempenho construído, a dosagem otimizada em relação à propriedade final requerida pode ser obtida.

5. Conclusões

As seguintes conclusões podem ser feitas baseadas nas análises dos resultados:

- Os resultados obtidos indicam que o aumento no volume de pasta (consumo de cimento), sem alterar a relação a/c, conduz na redução da porosidade com aumento da variabilidade.
- O consumo real de cimento deve ser corrigido a partir da porosidade média obtida experimentalmente e da relação entre materiais (agregado/cimento e água/cimento).
- Os resultados obtidos pelo método do ultrassom (velocidade de pulso ultrassônico) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as composições estudadas, mostrando que o método

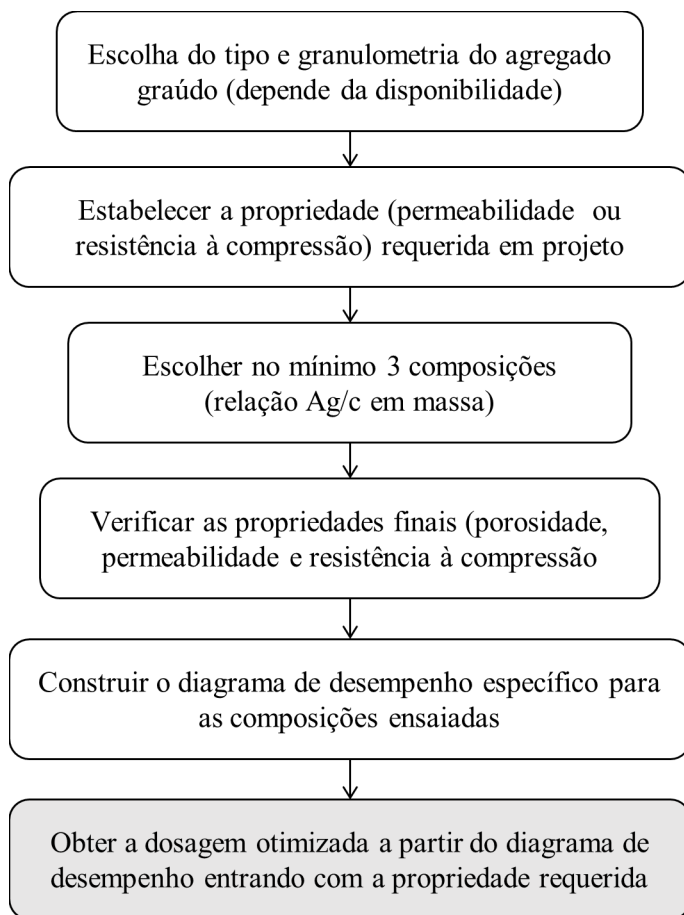


Fig. 5. Relação entre porosidade e resistência à compressão

do ultrassom tem restrições quando aplicado em concretos permeáveis.

- A correlação entre os resultados de porosidade e permeabilidade indicou que a permeabilidade não depende unicamente da porosidade, outros fatores como o tamanho e conectividade dos poros podem ser importantes na análise.
- Um ábaco de desempenho pôde ser construído a partir de equações empíricas ajustadas pelos resultados experimentais. Com ele, pode-se obter a composição otimizada entrando com a permeabilidade ou resistência à compressão requerida em projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) e ao Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo apoio durante a realização do programa

experimental.

Referências bibliográficas

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10**, Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**, Pulse velocity through concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754 / C1754M**, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C192 / C192M**, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627-637, 2016a.
- CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity. **Materials and Structures**, v. 49, p. 5255-5271, 2016b.
- DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete

as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1–16, 2018.

HASELBACH, L. et al. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, p. 1–11, 2018.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1a ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

MAGUESVARI, U. M.; NARASIMHA, V. L. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 198–207, 2013.

MARTINS FILHO, S. T. et al. Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 3, p. 483–500, 2020.

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.

PIERALISI, R.; CAVALARO, S.H.P.; AGUADO. A Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 149–160, 2017.

PIERALISI, R.; CAVALARO, S.H.P.; AGUADO. A. Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 90, p. 6–18, 2016.

SANDOVAL, G. F. B. et al. Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, e00354, 2020.

SANDOVAL, G. F. B. et al. Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). **DYNA**, v. 86, n. 209, p. 151–159, 2019.

SANDOVAL, G. F. B. et al. Comparison between the falling head and the constant head permeability

tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 317–328, 2017.

SONEBI, M.; BASSUONI, M.; YAHIA, A. Pervious Concrete: Mix Design, Properties and Applications. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 109–115, 2016.

SONEBI, M.; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147–154, 2013.

WANG, Z. et al. A novel method to predict the mesostructure and performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120117, 2020.

XIE, X. et al. Mixture proportion design of pervious concrete based on the relationships between fundamental properties and skeleton structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103693, 2020.

XIE, X. et al. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 732–746, 2018.

ZAETANG, Y. et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15–21, 2016.

ZHANG, Q. et al. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**, v. 259, 119776, 2020.

ZHONG, R. et al. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 544–553, 2018.