



INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DA FRAÇÃO FINA PROVENIENTE DO AGREGADO GRAÚDO NO DESEMPENHO DE CONCRETO PERMEÁVEL¹

INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE LA FRACCIÓN FINA DEL AGREGADO GRUESO EN EL DESEMPEÑO DEL CONCRETO PERMEABLE²

INFLUENCE OF PERCENTAGE OF FINE FRACTION OF COARSE AGGREGATE ON PERMEABLE CONCRETE PERFORMANCE³

Gersson Fernando Barreto Sandoval⁴

Nicole Schwantes-Cezario⁵

Geovana Souza Nogueira⁶

Berenice Martins Toralles⁷

CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018 / Colombia /pp. 126-136

Recibido: 18/04/2018

Aprobado por evaluador: 17/09/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.605



Para citar este artículo:

Barreto Sandoval, G. F. Schwantes-Cezario, N. Souza Nogueira, G. Martins Toralles, B. (2018). Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 124-136. doi: 10.18667/cienciaypoderaero.605

¹ Artigo de pesquisa do projeto de mestrado: *Desempenho do Concreto Permeável com agregados sustentáveis*.

² Artículo de investigación asociado al proyecto: *Desempeño del Concreto Permeable con agregados sostenibles*.

³ Research article associated with the project: *Performance of Permeable Concrete with sustainable aggregates*.

⁴ Engenheiro Civil formado, pela Universidade Santo Tomás de Bogotá (2011), Colômbia. Especialista em geotecnia e pavimentação da Universidade Santo Tomás de Tunja (2012), Colômbia. Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estatal de Londrina (2014) e aluno de doutorado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, Brasil. ORCID: 0000-0002-8702-8844. E-mail: gerson.barreto@gmail.com.

⁵ Engenheira Civil formada pela Faculdade Assis Gurgacz, Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estatal de Londrina (2017) e aluno de doutorado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, Brasil. ORCID: 0000-0002-3254-6396. E-mail: nicoleschwantes@hotmail.com

⁶ Formada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (2016) e Técnica em Edificações. Aluna de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina. ORCID: 0000-0002-7059-257X. E-mail: geovanasouzanogueira@gmail.com

⁷ Professor associado da Universidade Estadual de Londrina. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: concretos e argamassas especiais; patologia das construções; materiais sustentáveis e habitações de interesse social. ORCID: 0000-0001-8828-7250. E-mail: betoralles@gmail.com

Resumo: O concreto permeável (CoPe) é um dos materiais com maior importância no campo da pesquisa atual. Este material possui uma permeabilidade elevada, dada pelo seu alto índice de vazios que varia de 15-35%. A distribuição dos vazios e a permeabilidade estão diretamente ligadas a granulometria do agregado graúdo utilizado, sendo que podem ser utilizadas granulometrias, uniformes, contínuas e descontínuas. A escolha de cada uma delas vai depender da solicitação em termos hidráulicos e mecânicos que sejam requeridos no material. Porém ainda existem grandes questionamentos relacionados com a influência de agregados menores de 4,8 mm no desempenho do material, já que estes agregados são oriundos do próprio agregado graúdo. Por tanto este estudo analisa a influência da porcentagem de fração fina proveniente do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e hidráulicas do CoPe fabricado com britas de 19 mm (B1), 9,5 mm (B0) e uma mistura 50/50 (50B0/50B1) das duas britas mencionadas. Os resultados mostram que o CoPe 50B0/50B1 foi o melhor em termos de resistência alcançando 19 Mpa e em termos hidráulicos a B1 apresentou o maior coeficiente de permeabilidade de 4,27 mm/s em termos de resistência a alçando em média um valor de 10 Mpa e finalmente a B0 com permeabilidade de aproximadamente 3 mm/s e resistência mecânica de 9,5 Mpa. A melhoria no arranjo dos grãos e da fração fina própria do agregado explica os melhores resultados mecânicos. É interessante ressaltar que a baixa resistência dos CoPe's normalmente se dá pela fragilidade da interface entre os agregados.

Palavras-chave: concreto permeável, índice de vazios, permeabilidade, granulometria.

Resumen: El concreto permeable (CoPe) es uno de los materiales con mayor importancia en el campo de la investigación actual. Este material posee una permeabilidad elevada, dada por su alto índice de vacíos que varía de 15 a 35 %. La distribución de los vacíos y la permeabilidad están directamente ligadas a la granulometría del agregado grueso utilizado, siendo que pueden ser utilizadas granulometría, uniformes, contínuas y discontinuas. La elección de cada una de ellas dependerá de la solicitud en términos hidráulicos y mecánicos que se requieran en el material. Pero todavía existen grandes cuestionamientos relacionados con la influencia de agregados menores de 4,8 mm en el desempeño del material, ya que estos agregados proceden del propio agregado grueso. Por tanto, este estudio analiza la influencia del porcentaje de fracción fina proveniente del agregado grueso en las propiedades mecánicas e hidráulicas del CoPe fabricado con agregados gruesos de 19 mm (B1), 9,5 mm (B0) y una mezcla 50/50 (50B0/50B1) de los dos agregados mencionados mencionadas. Los resultados demuestran que el CoPe 50B0/50B1 fue el mejor en términos de resistencia alcanzando 19 MPa, y en términos hidráulicos la B1 presentó el mayor coeficiente de permeabilidad de 4,27 mm/s en términos de resistencia a alzar en promedio un valor de 10 MPa, finalmente la B0 con permeabilidad de aproximadamente 3 mm/seg resistencia mecánica de 9,5 MPa. La mejora en el arreglo de los granos y de la fracción fina propia del agregado explica los mejores resultados mecánicos. Es interesante resaltar que la baja resistencia de los CoPe normalmente se da por la fragilidad de la interfaz entre los agregados.

Palabras clave: concreto permeable, índice de vacíos, permeabilidad, granulometría.

Abstract: Permeable concrete (CoPe) is one of the most important materials in the field of current research. This material has a high permeability due to its high void rate ranging from 15 to 35%. The distribution of voids and permeability are directly linked to the granulometry of the coarse aggregate used, being that granulometry, uniform, continuous and discontinuous can be used. The choice of each of them will depend on the request hydraulic and mechanical terms that are required in the material. However, there are still major questions related to the influence of aggregates smaller than 4.8 mm on the performance of the material, since these aggregates come from the own aggregate itself. Therefore, this study analyzes the influence of the percentage of fine fraction coming from the coarse aggregate on the mechanical and hydraulic properties of the CoPe manufactured with 19 mm (B1), 9.5 mm (B0) and 50/50 (50B0/50B1) mixture of the two British mentioned. The results show that the CoPe 50B0/50B1 was the best in terms of resistance reaching 19 MPa and in hydraulic terms the B1 presented the highest coefficient of permeability of 4.27 mm/s in terms of resistance to raise in average a value of 10 MPa and finally the B0 with permeability of approximately 3 mm / when mechanical resistance of 9.5 MPa. The improvement in the arrangement of the grains and the fine fraction of the aggregate itself explains the best mechanical results. It is interesting to note that the low resistance of CoPe's is usually due to the fragility of the interface between the aggregates.

Keywords: Pervious concrete, void index, permeability, granulometry.

Introdução

O concreto permeável (CoPe) surgiu como uma possível solução para a otimização da gestão das águas derivadas do escoamento superficial. A partir do crescimento do desenvolvimento urbano e do uso de materiais impermeáveis, a água encontra empecilhos para infiltrar no solo, acarretando em mudança no ciclo hidrológico (Value, Li, Ssha & War, 1973; Leming, Michael, Malcom & Rooney, 2007).

A intensificação do desenvolvimento urbano gerou graves problemas ao gerenciamento de águas pluviais nas cidades, devido à alteração do padrão de uso e ocupação do solo, que provocou um aumento de áreas urbanas impermeáveis. Como consequência, a probabilidade de incidências de alagamentos aumentou, pois, a infiltração de água no solo foi prejudicada. Dessa maneira, o concreto permeável (CoPe) surgiu como uma possível solução para a melhoria da gestão das águas derivadas do escoamento superficial (Value, Li, Ssha & War, 1973; Chandrappa & Biligiri, 2016).

Estudos e pesquisas sobre o CoPe vem sendo desenvolvidos nos Estados Unidos, Europa e Japão, porém, apenas na última década o tema despertou interesse na América do Sul, onde o Brasil vem se destacando no desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao desempenho desse material (Value, Li, Ssha & War, 1973; Yang & Jiang, 2003; Barreto, 2014).

O CoPe é considerado como um concreto especial e tem como principal característica a elevada permeabilidade, permitindo a percolação de água através do mesmo, que é decorrente do elevado índice de vazios, entre 15 a 30% (Neithalath, Weiss & Olek, 2006; Chandrappa & Biligiri, 2016; Yang & Jiang, 2003; Tennis, Leming & Akers, 2004; Martin & Putman, 2016).

Esse concreto, geralmente, é conhecido por não conter agregados miúdos, o que permite uma maior formação de vazios interconectados, contribuindo para o aumento da permeabilidade. Sendo assim, o CoPe é basicamente constituído por um aglomerante (cimento Portland), agregados graúdos e água potável, com uma relação água/cimento (*a/c*) inferior a 0,35 (Value, Li, Ssha & War, 1973; Chindaprasirt *et al.*, 2008; Ćosić, Korat & Ducman, 2015; Tennis, Leming & Akers, 2004; Zhang, Zhang, Yan & Liu, 2017; Chandrappa & Biligiri, 2016).

A composição granulométrica dos agregados graúdos, o procedimento de compactação e o consumo de cimento, estão diretamente relacionados ao índice de vazios do CoPe, pois esses fatores definem a porcentagem de vazios

interconectados e consequentemente a permeabilidade do material. Sendo assim, seus estudos são indispensáveis, tanto para a elaboração do CoPe, quanto para assegurar o desempenho do material (Chindaprasirt *et al.*, 2008; Yang, Shen & Zhuo, 2008; Mahboub *et al.*, 2009; Deo & Neithalath, 2011; Martin, Kave & Putman, 2014).

Quanto à escolha da granulometria do agregado graúdo, alguns estudos indicam a granulometria uniforme como ideal, pois agregados com tamanhos iguais formam vazios maiores, permitindo uma maior drenagem de água em um menor intervalo de tempo (Barreto, 2014). Em contrapartida, quando se procura ganhar resistência, é recomendado o uso de granulometrias contínuas, pois agregados com diferentes tamanhos aumentam os pontos de contato entre as partículas, gerando uma melhor distribuição de esforços, e consequentemente aumentam a resistência do material (Mahboub *et al.*, 2009; Lian, Zhuge & Beecham, 2011; Kim & Lee, 2010; Mrakovčić, Ceh & Jugovac, 2014).

Outra possível alternativa para elevar o desempenho mecânico do material é a incorporação de agregado miúdo, visando melhorar a distribuição granulométrica, e consequentemente aumentar a resistência mecânica do material em termos de tração na flexão (Ćosić *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2016). Segundo Yang *et al.* (2008) o incremento de agregados de tamanhos menores que 4,75 mm acarreta no aumento de pontos de contato entre os agregados, contribuindo na formação de pontes de aderência e melhorando o empacotamento entre as partículas do material que, por conseguinte, aumenta o desempenho mecânico.

Entretanto, ainda existem lacunas do conhecimento sobre a influência da composição granulométrica do agregado graúdo no CoPe. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo estabelecer a influência da fração fina do agregado graúdo (tamanhos de grão < 4,8 mm) no desempenho do CoPe. Para tanto foram estudados três CoPe's com agregados de diferentes porcentagens de frações finas e granulometrias distintas, sendo um com brita 9.5mm (B0), outro com brita 19mm (B1) e uma composição com 50% de cada um desses agregados (50B0/50B1).

Materiais e programa experimental

Materiais

Para a confecção dos CoPe's foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP II F-32, brita basáltica e água potável. Os agregados graúdos de basalto, foram adquiridos na região de Londrina/PR, e apresentaram diâmetro máximo característico de 9.5 mm e 19 mm, para a Brita 0 (B0) e a Brita 1 (B1), respectivamente.



Caracterização do agregado

Na tabela 1 pode-se observar as composições granulométrias da B0, B1 e da combinação 50B0/50B1, sendo que se considerou como fração fina todo material passante na peneira com abertura de 4.8 mm e retido no fundo. Além disso, os agregados foram verificados a dimensão máxima (Dmáx) e módulo de finura (MF), conforme prevê a NBR NM 248/2003 (2003).

Tabela 1. Granulometria dos agregados utilizados

Nomenclatura dos agregados	B0	B1	50B0/50B1
Abertura da peneira (mm)	Percentual retido (%)	Percentual retido (%)	Percentual retido (%)
37.5	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00
19	0,00	1.00	0.83
9.5	0.17	87.68	46.10
4.8	50.35	11.00	29.34
2.4	44.59	0.09	21.81
1.2	2.27	0.00	0.88
0.6	0.40	0.01	0.14
0.3	0.23	0.01	0.08
0.15	0.25	0.01	0.08
0.075	0.71	0.03	0,29
FUNDO	1.03	0.16	0,45
% Fração fina	49.49	0.32	23.72
Dmáx(mm)	9,5	19.0	19.0
MF	6.36	7.88	7.18

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a tabela 1, verificou-se que a B0 possui uma granulometria com predominância em dois tamanhos de grãos, de 4.8 mm e 2.4 mm, com um percentual de fração fina de 49.5%, sendo considerada de granulometria descontínua. A B1 também foi considerada com uma granulometria uniforme, pois 90% dos seus grãos tinham tamanho de 9.5mm, sendo que a porcentagem de fração fina foi de 0.3%. Na composição 50B0/50B1, por outro lado, verificou-se uma melhoria na distribuição dos grãos, com tendência continua sendo que está composição apresentou uma porcentagem de fração fina de 23.7%.

Na sequência, foram realizados ensaios quanto a caracterização dos agregados graúdos de acordo com as normas NBR 7251/1982 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9776, 1987), NBR NM 46/2003 (2003) e NBR NM 53/2003, os quais estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização agregados

Nomenclatura dos agregados	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Teor de material pulverulento (%)	Absorção de água (%)
B0	2.8	1.5	4.15	1.20
B1	2.8	1.6	2.55	1.42
50B0/50B1	2.8	1.6	3.35	1.31

Fonte: Elaboração própria

Verificou-se que a B0 apresentou maior porcentagem de material pulverulento (4.15%), quando comparada com as outras duas granulometrias utilizadas. Em termos de absorção de água os agregados não apresentaram diferenças significativas entre si, com absorção em torno de 1.4%, que são resultados condizentes com agregados de origem basáltica (Mehta & Monteiro, 2006).

Elaboração dos concretos

O traço adotado para a confecção dos CoPe's foi de 1:3.26 (cimento: agregado graúdo), em massa, com uma relação água/cimento (a/c) de 0.34, de acordo com a pesquisa de Vélez (2010). A proporção dos materiais utilizados pode ser visualizada na tabela 3, sendo que o consumo de cimento foi de 420 kg/m³, condizente com o apresentado na literatura, na qual os consumos de cimento variam entre 350 a 550 kg/m³ (Tennis, Leming & Akers, 2004; Chandrappa & Biligiri, 2016; Kia, Wong & Cheeseman, 2017).

Tabela 3. Consumo de materiais utilizados por m³

Materiais	Kg/m ³
Cimento	420.0
Agregado graúdo	1369.2
Água	136.0

Fonte: Elaboração própria

Após o cálculo do consumo dos materiais os concretos foram confeccionados, sendo que a mistura dos mesmos foi realizada em betoneira, com duração de 5 minutos. Primeiramente adicionou-se a brita e metade da água, em seguida colocou-se o cimento e a betoneira foi acionada até que a mistura estivesse homogênea e, por fim, adicionou-se o restante da água.

Ensaio em estado fresco

No estado fresco os concretos foram ensaiados quanto ao índice de consistência (*slump test*), afim de verificar a plasticidade do material. Cabe salientar que nos CoPe's o

abatimento normalmente é zero. Na figura 1 podem-se visualizar os resultados do abatimento, em (a) está ilustrado o concreto com B0, em (b) com B1 e em (c) com a composição 50B0/50B1.

De acordo com a figura 1(a), verificou-se que devido ao tamanho do agregado o concreto com brita 0 (B0) e à porcentagem de fração fina (49.5%) apresentou abatimento 0. Quando o concreto foi confeccionado com a B1 a mistura apresentou-se mais plástica, provavelmente pelos grãos terem aproximadamente o mesmo tamanho e uma baixa porcentagem de fração fina (0.3%), fazendo com que a pasta tivesse capacidade de escorregar pela superfície dos grãos. Por fim, o CoPe com a composição 50B0/50B1 mostrou-se com uma mistura mais seca, sem excesso de água.

Após o ensaio de consistência, os corpos de prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura foram moldados

na mesa de consistência, como visualizado na figura 2(a). Para garantir a maior compactação dos concretos, testou-se a compactação com diferentes números de golpes em duas camadas, verificando em cada uma das compactações as massas unitárias dos concretos estudados, conforme pode-se visualizar na figura 2(b).

A partir da análise da figura 2b, verificou-se que para os concretos com as três granulometrias estudadas (B0, B1 e 50B0/50B1) a maior massa unitária foi atingida quando os mesmos foram compactados com 20 golpes em cada camada, por tanto esse número de golpes foi escolhido na compactação final dos corpos de prova.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram mantidos dentro do molde durante 24 horas em câmara úmida com umidade relativa de 98%, após esse período foram desmoldados e imersos em tanques de água saturada com cal até as idades de ensaio.



Figura 1. Ensaio do Slump no CoPe com agregado (a) B0, (b) B1 e (c) 50B0/50B1
Fonte: Elaboração própria

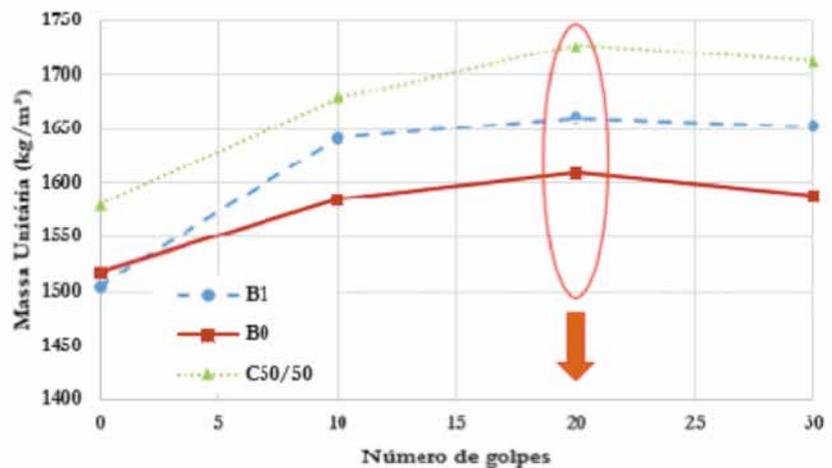


Figura 2. Adensamento dos corpos de prova. Em (a) podemos visualizar um corpo de prova sendo adensado na mesa de consistência e em (b) tem-se o gráfico que relaciona a massa unitária com o número de golpes por camada
Fonte: Elaboração própria



Ensaio no estado endurecido

Foram realizados ensaios de massa específica, desempenho mecânico (resistência à compressão, resistência à tração na flexão) e de desempenho hidráulico (índice de vazios e permeabilidade a carga variável). Na tabela 4 pode-se visualizar os ensaios realizados, os tipos de corpos de prova, suas dimensões, o número de amostras por idade e as normas que regem os ensaios.

O ensaio de permeabilidade segue a lei de Darcy, e trabalha com o princípio da carga variável, este foi realizado de acordo com a norma NBR 14545/2000 (NBR 14545, 2000), adaptada para solos finos. Neste ensaio, foi utilizado um permeâmetro onde são coletados dados do tempo e de volume de água que entra no corpo de prova, depois que o mesmo está saturado. O volume é quantificado a partir de um tubo de carga graduado e o tempo por meio de um cronômetro. Além disso, a temperatura da água no instante do ensaio deve ser quantificada para corrigir os resultados com relação à temperatura de 20 °C, padronizada para este ensaio.

Resultados e discussões

Massa específica

Na figura 3 pode-se verificar os valores de massa específica dos CoPe's no estado endurecido, em que as barras de erros representam os desvios padrão (n=7).

A partir da análise da figura 3, observou-se que os CoPe's confeccionados com a B0 e a B1 apresentaram massas específicas similares, possivelmente devido a descontinuidade e uniformidade da granulometria dos agregados. Por sua vez, o concreto 50B0/50B1 apresentou o maior valor de massa específica, tal fato ocorreu pela granulometria do agregado ser mais contínua que as demais, tendendo a melhorar a composição granulométrica e aprimorar o empacotamento da estrutura do concreto como corroborando com o estudo de Ćosić *et al.* (2015).

Na composição 50B0/50B1, por sua vez, verificou-se uma melhoria da composição granulométrica, que se apresentou de forma contínua, acarretando em uma maior massa específica e consecutivamente em uma melhor

Tabela 4. Planejamento experimental utilizado

Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão Corpo de Prova (mm)	Amostras por idade 28 dias	Método
Massa específica	Cilíndrico	100x200	7	NBR 9778/2003
Resistência à compressão	Cilíndrico	100x200	7	NBR 5739/1994
Resistência à flexo-tração	Placa	750x250x50	4	NBR 15805/2010
Índice de vazios	Cilíndrico	100x200	3	Método Empírico
Permeabilidade	Cilíndrico	100x120	-	NBR 14545/2000

Fonte: Elaboração própria

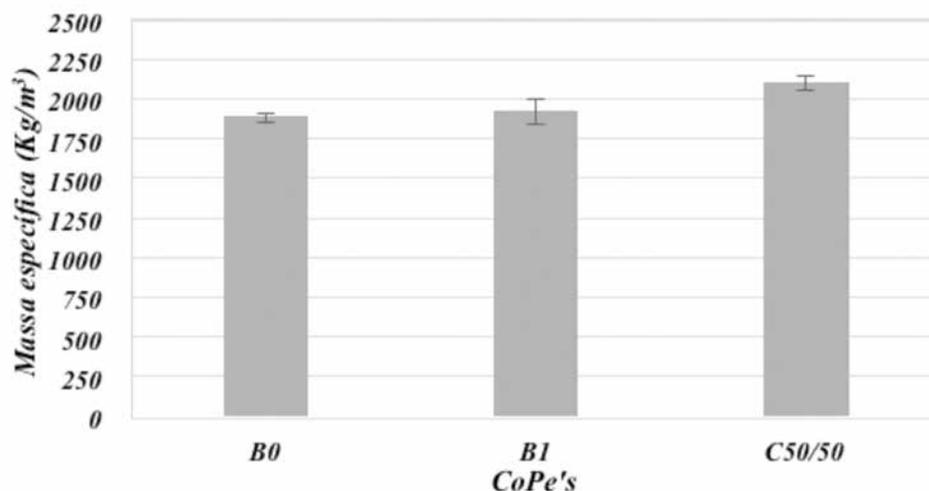


Figura 3. Massa específica dos CoPe's

Fonte: Elaboração própria

compacidade, corroborando com os estudos apresentados por Ćosić, Korat & Ducman (2015). No sentido da fração fina esta não influencia neste resultado e sim a distribuição dos grãos do material.

Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade estão apresentados na figura 4, assim como os desvios padrão (n=7) representados pelas barras de erros.

A partir da análise dos resultados, observou-se que os CoPe's com agregados de granulometria descontínua (B0 e B1) obtiveram menores valores de resistência à compressão, decorrente do contato pontual entre os agregados, sendo mais fracos quanto à aplicação de uma carga axial.

De acordo com Torres *et al.* (2015), a união entre as partículas de agregado são os pontos fracos dos concretos permeáveis, em termos de resistência. Além disso, o concreto com o agregado composto (50B0/50B1) foi o único que se diferiu significativamente dos demais, apresentando a maior resistência à compressão aos 28 dias. Tal fato provavelmente ocorreu pela melhoria na distribuição granulométrica do agregado, que conseqüentemente aumenta os pontos de contato entre as partículas de cimento e os grãos do agregado, resultando em uma melhor distribuição de esforços frente à aplicação de carga (Kia, Wong & Cheeseman, 2017).

Em termos de coeficientes de variação, observou-se que as menores variabilidades foram encontradas nos CoPe's com agregados de B0 e o com a composição

50B0/50B1. É interessante ressaltar que essas duas granulometrias de agregados continham uma fração fina de 49,5% e 23,7%, respectivamente. Com isso, verificou-se que a porcentagem de fração fina pode ajudar na homogeneização e distribuição os pontos de contato entre o agregado e a pasta de cimento, podendo diminuir o erro na medição desta propriedade. Além disso, a maior variabilidade foi encontrada no CoPe com B1, o qual tinha uma fração fina, de apenas 0,3%.

Resistência à flexo-tração

A resistência à flexo-tração foi ensaiada aos 28 dias de cura (n=4), seus resultados estão apresentados na figura 4.

Com base na figura 4, constatou-se que a maior resistência à flexo-tração foi obtida no CoPe contendo a combinação dos agregados (50B0/50B1), podendo se justificar pelo melhor arranjo dos grãos e conseqüente diminuição do diâmetro dos poros internos. Cabe ressaltar que este concreto também apresentou a maior massa específica (figura 3). Como a composição 50B0/50B1 foi constituída por grãos de diferentes tamanhos, os mesmos tendem a aumentar o travamento do concreto, resultando na melhoria da distribuição de cargas na flexão. Os CoPe's confeccionados com a B0 e a B1 tiveram resultados similares, correspondendo em média a 10% da resistência à compressão, o que é condizente com o apresentado na literatura (Ćosić, Korat & Ducman, 2015).

Índice de vazios

A medição do índice de vazios no estado endurecido foi realizada em corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Para este ensaio, os corpos

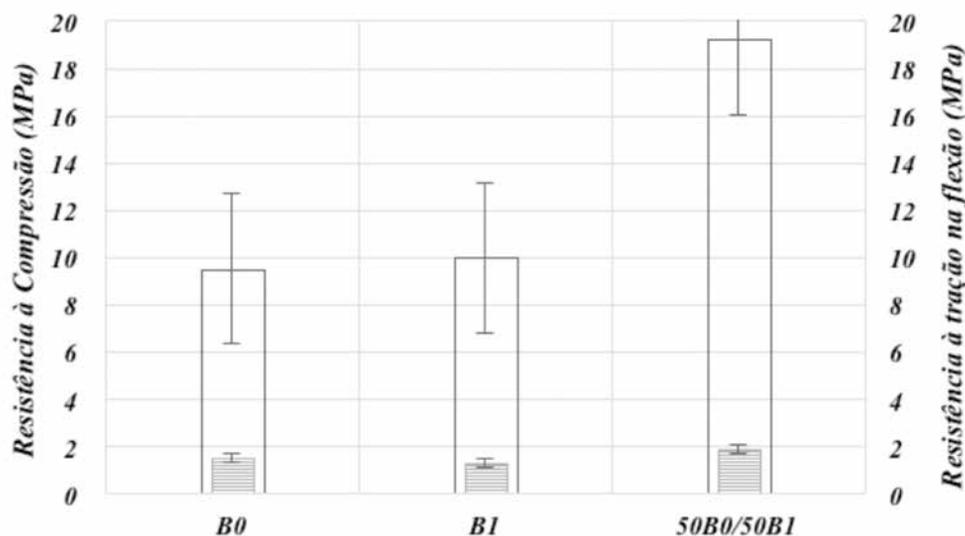


Figura 4. Resistência à compressão (n=7) e a tração na flexão (n=4) dos CoPe's aos 28 dias
 Fonte: Elaboração própria



de prova estavam em condição saturada com superfície seca para que não houvesse absorção da água. Os corpos de prova foram envoltos com filme plástico de PVC, na superfície lateral e pela face inferior. Em seguida, foram introduzidos em um molde metálico cilíndrico, com as mesmas medidas do corpo de prova, para garantir que o filme de PVC não sofresse deformações.

Posteriormente, os moldes com os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão e, por fim, adicionou-se água até preencher os vazios internos do material, quando a água aflorava na superfície tomou-se a medida da sua massa.

Este ensaio foi utilizado porque foi uma proposta nas pesquisas realizadas por Neithalath *et al.* (2006); Deo & Neithalath (2011); Sumanasooriya & Neithalath (2011); Neithalath *et al.* (2006). Os resultados do mesmo estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Índice de vazios dos CoPe's (n=3)

Parâmetro	Índice de vazios		
	B0	B1	50B0/50B1
Média	19,42	19,10	13,05
DP	0,32	1,39	0,32
CV%	1,64	7,26	2,44

Fonte: Elaboração própria

Como era de se esperar, o concreto contendo a composição 50B0/50B1 obteve uma redução na sua porcentagem de vazios, quando comparado aos demais. Tal fato pode ser explicado pela granulometria mais contínua do agregado graúdo e pelo arranjo dos grãos depois do processo de compactação (Ćosić, Korat & Ducman, 2015; Neptune, Putman, 2010; Brake, Allahdadi & Adam, 2016).

De acordo com Mehta & Monteiro (2014) em materiais cimentícios a porosidade e a resistência de um material são grandezas inversamente proporcionais. Nesse sentido, buscou-se uma relação entre a resistência e o índice de vazios dos CoPe's (figura 5), afim de verificar como essa relação se comportava.

A partir dos dados da figura 5, observou-se que a menor porcentagem de vazios corresponde ao concreto com a maior resistência a compressão, sendo que o CoPe confeccionado com a composição granulométrica 50B0/50B1 apresentou os melhores resultados, corroborando com o apresentado por Kevern *et al.* (2009) que afirma que com o aumento dos vazios no CoPe há uma diminuição dos pontos de contato entre as partículas, por tanto quando uma carga é aplicada a distribuição de esforços não é homogênea.

Coefficiente de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade a carga variável foi realizado aos 28 dias de cura, o resultado deste ensaio nos fornece o coeficiente de permeabilidade (k), que pode ser calculado

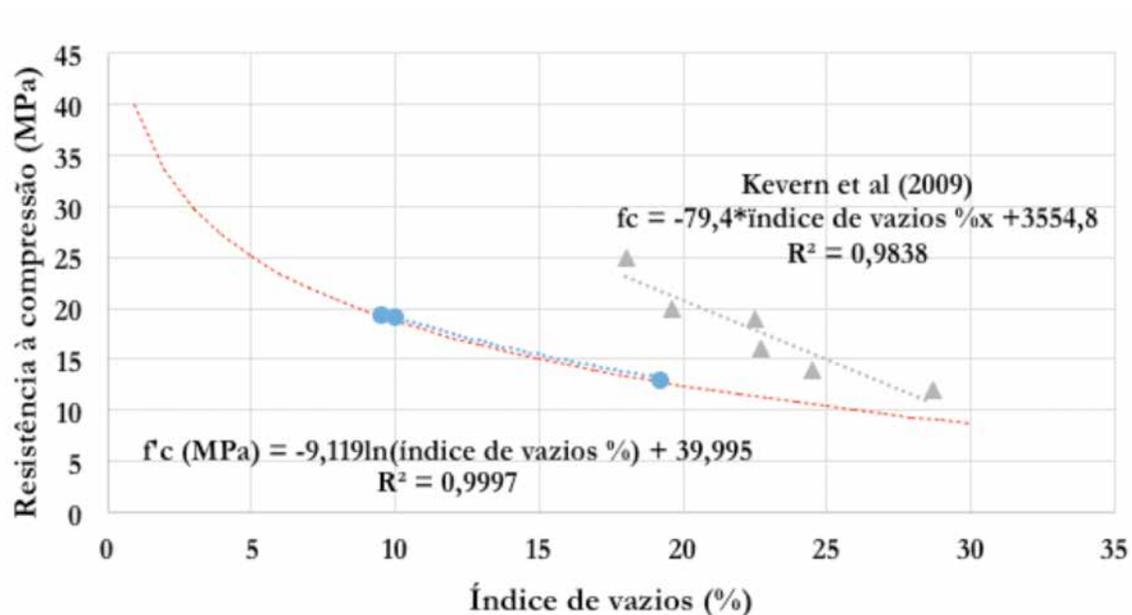


Figura 5. Correlação da resistência a compressão e o índice de vazios (%)

Fonte: Elaboração própria

a partir da Equação 1 e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 6 (Chandrappa y Biligiri, 2016).

$$k_f = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \tag{1}$$

Tabela 6. Coeficiente de permeabilidade dos CoPe's

Parâmetro	Permeabilidade k (mm/s)		
	B0	B1	50B0/50B1
Média (mm/s)	2.89	4.27	2.36
Desvio Padrão (mm/s)	0.58	1.05	0.6
CV (%)	20.05	24.57	25.35

Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar na tabela 6 que os coeficientes de permeabilidade cumprem o valor mínimo de 1.35mm/s, de acordo com norma americana ACI 522R-10 (American Concrete Institute (ACI), 2010).

Notou-se a partir da tabela 6 que a combinação 50B0/50B1 obteve o menor coeficiente de permeabilidade de quando comparado com as outras duas granulometrias utilizadas (B0 e B1). Acredita-se que pela B1 apresentar uma baixa porcentagem de fração fina (0.3%) e ter grãos de tamanho maior formam-se vazios maiores, aumentando o coeficiente de permeabilidade do material, concordando com os valores obtidos no índice de vazios.

Com o intuito de verificar a influência da fração fina nas propriedades hidráulicas dos CoPe's, na figura 6 foi correlacionado o coeficiente de permeabilidade (k) com a porcentagem de fração fina presente no próprio agregado.

Como pode-se verificar na figura 6, a porcentagem de fração fina do próprio agregado graúdo influencia o coeficiente de permeabilidade. Primeiramente observou-se que a carência de areia e/ou finos na granulometria aumenta o coeficiente de permeabilidade do material. No caso do CoPe com a B1 o coeficiente de permeabilidade foi 4.27 mm/s (sendo aproximado ao K da brita em estado natural (Das Braja, 2013), neste caso a B1 apresentou uma porcentagem de fração fina de 0.3%, mostrando que esses dois parâmetros são inversamente proporcionais. Por outro lado, o excesso de finos pode proporcionar o fechamento dos poros, diminuindo a permeabilidade. Neste sentido, torna-se necessário um estudo para verificação de uma porcentagem ótima de fração fina, que auxilie nas propriedades mecânicas, melhorando a interface entre os agregados e não prejudicando as características hidráulicas do CoPe. O ensaio de permeabilidade foi realizado de acordo com a norma NBR 14545/2000, adaptada para o CoPe.

Conclusões

- O Concreto Permeável (CoPe) 50B0/50B1, apresentou maiores resistências, tanto a compressão quanto a flexo-tração. Isso pode ser decorrente da melhoria no arranjo dos grãos e da fração fina própria do agregado que neste caso estava na faixa média das 3 granulometrias.

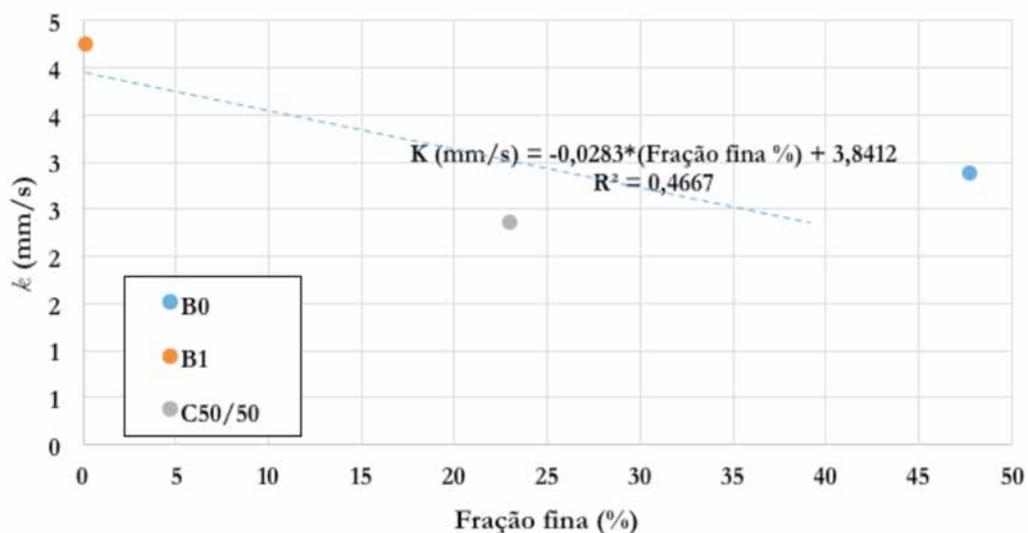


Figura 6. Correlação entre o coeficiente de permeabilidade (K) e a porcentagem de fração fina do agregado graúdo

Fonte: Elaboração própria



metrias utilizadas. É interessante ressaltar que a baixa resistência dos CoPe's normalmente se dá pela fragilidade da interface entre os agregados.

- Os coeficientes de permeabilidade encontrados em todos os concretos estudados cumprem com os parâmetros mínimos da norma ACI 522R-10, que estabelece que para um concreto ser considerado permeável, seu coeficiente de permeabilidade (k) deve ser de pelo menos de $1.35 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ou 4821 mm/h .
- O acúmulo de pasta no CoPe confeccionado com B1 se deve à falta de materiais finos, o que acarretou em uma pasta muito fluida. Fazendo com que a pasta preenchesse os vazios, levando a uma queda na permeabilidade.
- Para melhorar o desempenho dos CoPe's tanto nas propriedades mecânicas quanto em suas características hidráulicas, seria necessário estudar mais a fundo sobre a porcentagem de fração fina ótima a ser utilizada, de modo que nem o desempenho mecânico e nem o hidráulico seja prejudicado.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento do Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e ao seu Laboratório de Materiais de Construção. Além disso, o primeiro autor agradece ao apoio econômico proporcionado pelos estudos de doutorado da Capes.

Referências

- ABNT, NBR NM 248. (2003). *Composição Granulométrica dos Agregados*, (p. 1-3).
- ABNT, NBR NM 46. (2003). *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem*, Abnt Nbr Nm 462003, (p. 6).
- American Concrete Institute (ACI). (2010). *Report on Pervious Concrete (ACI 522-R10)*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9776. (1987). *Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco*. Rio de Janeiro. Disponível em <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17827/material/NBR%20NM%2052%20-.pdf>
- Barreto, G. F. (2014). *Desempenho do concreto poroso com. Universidade Estadual de Londrina*. Disponível em <http://www.uel.br/pos/enges/porta/pages/arquivos/dissertacao/GERSON%20BARRETO%20SANDOVAL%202013-1.pdf>
- Brake, N. A., Allahdadi, H., & Adam, F. (2016). Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 113, 536-543. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V., Netinger, I. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 78, 69-76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. *Constr. Build. Mater.* 123, 627-637. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, P. K. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.*, 111, 262-274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.
- Chindapasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., & Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Constr. Build. Mater.*, 22, 894-901. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007.
- Das Braja. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, (p. 658). doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Deo, O., & Neithalath, N. (2011). Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Constr. Build. Mater.*, 25, 4181-4189. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055.
- Haselbach, L. M., Valavala, S., & Montes, F. (2006). Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *J. Environ. Manage.*, 81, 42-49. doi:10.1016/j.jenvman.2005.09.019.
- Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2009). *Predicting Performance of Pervious Concrete using Fresh Unit Weight* J. T. Kevern 1, V.R. Schaefer 2, and K. Wang 3.
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, S. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *J. Environ. Manage.*, 193, 221-233. doi:10.1016/j.jenvman.2017.02.018.
- Kim, H. K., & Lee, H. K. (2010). Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. *Appl. Acoust.*, 71, 607-615. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
- Leming, P. D., Michael, L., & Malcom, H. (2007). *Rooney; Tennis, Hydrologic Design of Pervious Concrete*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Constr. Build. Mater.*, 25, 4294-4298. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005.
- Mahboub, K. C., Canler, J., Rathbone, R., Robi, T., Davis, B., Robl, T., & Davis, B. (2009). Pervious concrete: Compaction and aggregate gradation. *ACI Mater. J.*, 106, 523-528.
- Martin, W. D., & Putman, B. J. (2016). Comparison of methods for measuring porosity of porous paving mixtures. *Constr. Build. Mater.*, 125, 299-305. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.038.

- Martin, W. D. Kaye, N. B., & Putman, B. J. (2014). Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 59, 78-84. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. doi:10.1036/0071462899.
- Montes, F., & Haselbach, L. (2006). Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete, *Environ. Eng. Sci.*, 23, 960-969. doi:10.1089/ees.2006.23.960.
- Mrakovčić, S., Čeh, N., & Jugovac, V. (2014). Effect of aggregate gradation on pervious concrete properties. *Građevinar*, 66, 107-113. doi:10.14256/JCE.977.2013.
- NBR 14545. (2000). *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*.
- Neithalath, N., Weiss, J., & Olek, J. (2006). Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. *Cem. Concr. Res.*, 36, 2074-2085. doi:10.1016/j.cemconres.2006.09.001.
- Neptune, A. I., & Putman, B. J. (2010). *Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures*. ACI Mater. J.
- Sonebi, M., & Bassuoni, M. T. (2013). Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling, *Constr. Build. Mater.*, 38, 147-154. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044.
- Sumanasooriya, M. S., & Neithalath, N. (2011). Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cem. Concr. Compos.*, 33, 78-787. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements. EB302.02*. USA: Portland Cement Association, Skokie, Illinois and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland. Disponível em http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf
- Torres, A. Hu, J., & Ramos, A. (2015). The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.*, 95, 850-859. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.
- U-value, T., Li, W. W., Ssha, T., & War, W. (1937). *No-fines building gives energy-conserving homes*.
- Vélez, L. M. (2010). Permeabilidad y porosidad en concreto. *Rev. Tecno Lógicas*, 169-187. Disponível em <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5062984&info=resumen&idoma=SPA>
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cem. Concr. Res.*, 33, 381-386.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cem. Concr. Res.*, 33, 381-386.
- Yang, Z., Ma, W., Shen, W., & Zhou, M. (2008). The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 23, 391-394. doi:10.1007/s11595-007-3391-4.
- Zhang, Z., Zhang, Y., Yan, C., & Liu, Y. (2017). Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete, *Constr. Build. Mater.*, 135, 112-118. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.203.

