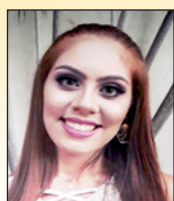


Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties

Concreto permeável de escória de forno elétrico (FEA): propriedades mecânicas e hidráulicas



G. F. B. SANDOVAL^a
gersson.barreto@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8702-8844>

I. GALOBARDES^b
isaac.galobardes@xjtlu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0002-3569-2241>

C. DIAS^a
caroldias.cdc95@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6604-1313>

A. CAMPOS^a
andre.moura@uel.br
<https://orcid.org/0000-0002-0083-4481>

B. M. TORALLES^a
toralles@uel.br
<https://orcid.org/0000-0001-8828-7250>

Abstract

The objective of this work is to make feasible the use of FEA slag instead of the conventional bulk aggregate in the pervious concrete (PC) production, reaching the minimum parameters required by NBR16416/2015 and ACI 522R-10. This substitution would minimize the use of natural aggregates, besides taking advantage of a residue that has no specific destination. In order to reach the objective, three FEAs with different grain sizes were chosen: 6-10 mm (A), 10-20 mm (B) and finally a mixture of the two previous ones (C) in the proportion 30-70 respectively. In order to evaluate its mechanical behavior, tests of compressive strength and flexural tensile tests were carried out, while the evaluation of the hydraulic behavior, porosity and constant head permeability test were performed. The compressive strength varies from 19-31MPa and 3-4MPa for flexural tensile strength was obtained. In hydraulic terms, the porosity varied from 15-20% and the permeability coefficient was 10-12mm/s. There is also a direct influence of grains of size less than 4.8 mm (small aggregate) on the compressive strength and permeability of PCs. At the end of the results, it was possible to establish a correlation between the compressive strength, the permeability and the percentage of grains inferior to 4.8mm (sand%), being this positive in relation to the studied variables, that is, the mechanical and hydraulics. Therefore, it has been concluded that the total substitution of conventional aggregates by FEA in CoPe manufacturing will comply with the minimum parameters of NBR 16416/2015.

Keywords: pervious concrete, permeability, porosity, sustainability, electric furnace slag.

Resumo

O objetivo deste trabalho é viabilizar o uso de escória de forno elétrico (FEA) em substituição ao agregado graúdo convencional na fabricação de concreto permeável (CoPe), atingindo os parâmetros mínimos exigidos pela norma NBR16416/2015. Esta substituição minimizaria a utilização de agregados naturais, além de aproveitar um resíduo que não tem destinação específica. Para alcançar o objetivo foram escolhidos três FEA's com diferentes distribuições granulométricas: 6-10 mm (A), 10-20 mm (B) e finalmente uma mistura das duas anteriores (C) na proporção 30-70 respectivamente. Para avaliar seu comportamento mecânico foram realizados ensaios de resistência à compressão e tração na flexão, enquanto na avaliação do comportamento hidráulico, índice de vazios e permeabilidade à carga constante foram realizados. Na compressão foram obtidas resistências variando de 19-31MPa e 3-4MPa na tração na flexão. Em termos hidráulicos, o índice de vazios variou de 15%-20% e o coeficiente de permeabilidade de 10-12mm/s. Também se verifica a influência direta dos grãos de tamanho inferior a 4.8 mm (agregado miúdo) na resistência à compressão e na permeabilidade dos CoPes. Ao final, a partir dos resultados obtidos foi possível estabelecer uma correlação entre a resistência à compressão, a permeabilidade e a porcentagem de grãos inferiores a 4.8mm (%areia), sendo esta positiva em relação às variáveis estudadas, ou seja, as propriedades mecânicas e hidráulica. Por tanto foi concluído que é viável a substituição total dos agregados convencionais por FEA na fabricação de CoPe cumprindo com os parâmetros mínimos da NBR 16416/2015.

Palavras-chave: concreto permeável, permeabilidade, índice de vazios, sustentabilidade, escória de forno elétrico.

^a Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Construção Civil, Londrina, PR, Brasil;
^b Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China.

1. Introdução

O crescimento das cidades tem se dado de forma rápida e acentuada nos últimos anos, trazendo consigo diversos prejuízos ao meio ambiente sendo um destes a redução das áreas permeáveis. A impermeabilização do solo reduz significativamente sua capacidade natural de absorção das águas pluviais, podendo resultar em enchentes que atingem, sobretudo, os grandes centros urbanos [1, 2]. Um material amplamente utilizado em pavimentos na construção civil é o concreto convencional, que apresenta baixo coeficiente de permeabilidade (de cerca de 1×10^{-8} m/s) devido a sua baixa porcentagem de vazios [3]. Por esse motivo, sua aplicação resulta na impermeabilização do solo. Em busca de uma alternativa que não impermeabilize o solo, pesquisas vem sendo realizadas na busca de materiais que permitam a passagem da água por sua estrutura, sem alteração nas propriedades mecânicas [1].

O uso de materiais permeáveis ajuda a diminuir os impactos ocasionados pela impermeabilização, o que proporciona equilíbrio no ciclo hidrológico, que é alterado de maneira radical com os recobrimentos impermeáveis das grandes cidades, minimizando o risco de acidentes com veículos pelo fenômeno da hidroplanagem e de doenças que derivam das enchentes, garantindo a segurança do meio [1].

Entre estes materiais está o concreto permeável (CoPe) que, por sua composição tem um elevado índice de vazios dado pela carência parcial ou total de agregados miúdos na mistura. Este concreto tem uma capacidade de drenagem maior que o convencional, o que reduz a vazão das águas pluviais presente no escoamento superficial [4].

O CoPe é composto de cimento Portland, agregado graúdo e água, com pouco ou nenhum agregado miúdo, o que facilita a formação de vazios internos interconectados que permitem o escoamento rápido e seguro da água [1,2,5,6].

Em termos de resistência mecânica, este material trabalha na faixa de 3-30 MPa [7–10], podendo ser utilizado em calçadas de pedestres e vias de tráfego leve. Em termos hidráulicos, o coeficiente de permeabilidade do material varia de 1-20 mm/s, o que garante o fluxo rápido da água por sua estrutura [4, 11–14].

Atualmente tem sido implementado o uso de resíduos de construção civil como agregados na fabricação de CoPe's. Sendo que, as propriedades mecânicas alcançadas com alguns destes agregados variam de 6 a 14 MPa na compressão e 1 a 2 na flexão [15,16] ocorrendo uma redução nestas propriedades quando comparadas ao uso de agregados convencionais [1]. Porém as propriedades hidráulicas cumprem com o exigido na normativa nacional e internacional acima de 1 mm/s [17].

Com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas do concreto permeável fabricado com resíduo tem sido utilizada a escória siderúrgica (FEA), a qual é gerada na fabricação de aço de segunda linha, e possui características físicas similares aos agregados convencionais [18]. O aproveitamento de dita escória é viável já que de acordo com o Instituto Aço Brasil [19], na produção de uma tonelada de aço são gerados aproximadamente 600kg de resíduos, dentre os quais 60% correspondem à escória siderúrgica.

Quando comparados aos agregados convencionais, os agregados de escória apresentam maior massa específica e quantidade desprezível de finos em sua granulometria [18].

Em termos mecânicos os concretos permeáveis com FEA atingem resistências a compressão na faixa de 8 a 20 MPa e resistências a flexão de 2 a 4 Mpa [18,20] sendo notável a melhora nas propriedades mecânicas. Nas propriedades hidráulicas o material tem um índice de vazios na faixa de 15 a 30% e um coeficiente de permeabilidade superior a 1 mm/s.

A partir do exposto foi realizado um estudo, na Universidade Politécnica de Cataluña (UPC), de concreto permeável com FEA estabilizada. Por tanto este estudo avaliou a viabilidade do uso FEA como agregados graúdos na fabricação de CoPe's com desempenho mecânico e hidráulico.



Figura 1
Agregados siderúrgicos utilizados

lico mínimo exigido pela NBR16416/2015. Para isto foram produzidos três concretos permeáveis com três granulometrias de escória diferentes, sendo avaliadas suas resistências mecânicas (compressão e flexão) e propriedades hidráulicas (índice de vazios e permeabilidade).

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas do CoPe produzido com agregados de escória siderúrgica (Figura 1), foram escolhidas três granulometrias diferentes: a primeira com agregados de tamanho variando entre 4-10 mm (A), a segunda com granulometria de 10-20 mm (B) e a terceira correspondente a uma composição granulométrica de 30% da granulometria (A) e 70% da (B), gerando a granulometria (C). A escória utilizada é estabilizada apresentando um potencial de expansão de 0.6 sendo praticamente desprezível e podendo ser utilizada na fabricação de materiais de construção segundo a UNE-EN 1744-1:2010 [21].

Na Figura 2 e na Tabela 1 são apresentadas as curvas granulométricas e a análise granulométrica dos agregados de escória

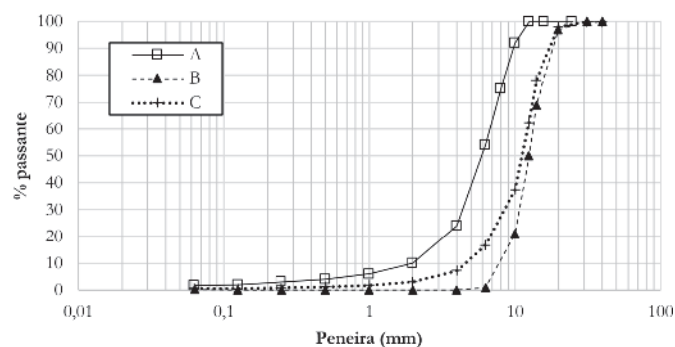


Figura 2
Granulometria dos agregados siderúrgicos

Tabela 1

Análise granulométrica dos agregados siderúrgicos

A		B		C	
Peneira (mm)	% passa	Peneira (mm)	% passa	Peneira (mm)	% passa
40	100	40	100	40	100
25	100	31,5	100	31,5	100
16	100	20	97	20	97,9
12,5	100	14	69	14	78,3
10	92	12,5	50	12,5	62,6
8	75	10	21	10	37,2
6,3	54	6,3	1	6,3	16,9
4	24	4	0	4	7,2
2	10	2	0	2	3
1	6	1	0	1	1,8
0,5	4	0,5	0	0,5	1,2
0,25	3	0,25	0	0,25	0,9
0,125	2	0,125	0	0,125	0,6
0,063	1,6	0,063	0,2	0,063	0,62
Areia (%)	50,6	1,2		15,32	
D _{máx} (mm)	10	20		20	

**Figura 3**

Processo de produção dos concretos permeáveis: a) mistura na betoneira; b) verificação visual; c) resultado final; d) ensaio de consistência

Tabela 2
Planejamento experimental

Tipo de ensaio	Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão corpo de prova (mm)	Amostras por idade		
				7 dias	14 dias	28 dias
Mechanical	Resistência à compressão (NBR 5739/1994)	Cilíndrico	150 X 300	5	–	5
	Resistência à tração na flexão (ASTM C78-02)	Viga	150 X 150 X 600	–	–	4
Hydraulic	Índice de vazios (Empírico)	Cilíndrico	150 X 300	–	–	3
	Permeabilidade a carga constante	Cilíndrico	150 X 300	–	–	3

utilizados, onde é possível observar que a escória A apresenta uma tendência mais contínua, enquanto as escórias B e C apresentam granulometrias com tendência uniforme.

Para realizar uma análise da influência dos finos no comportamento mecânico e hidráulico do material, foi considerado como agregado miúdo (areia) o material passante pelas peneiras 4,8 até a 0,063 mm, como mostrado na Tabela 1. Os agregados siderúrgicos utilizados na campanha experimental tinham curvas granulométricas diferentes, e, portanto, conteúdos de areia diferentes. A escória A apresenta uma porcentagem de areia de 50,6%, a B de 1,2% e a escória C de 15,32%.

2.2 Mistura e produção

Os concretos foram produzidos em uma betoneira de eixo vertical na empresa PROMSA (Barcelona, Espanha), com o seguinte procedimento de mistura: primeiramente foram adicionados os agregados siderúrgicos, a areia (segundo cada traço), o cimento e 50% da água, sendo estes misturados durante 1 minuto para homogeneização; em seguida adicionou-se a resina e o material foi misturado por mais 1 minuto e, finalmente, foi acrescentado o restante da água juntamente com o aditivo, misturando por 3 minutos, totalizando 5 minutos de mistura. Na Figura 3 podem ser observadas as etapas do processo de mistura dos concretos permeáveis. Durante o processo de produção das três misturas verificou-se que nenhuma delas apresentou excesso de água e que todas atingiram abatimento nulo, como esperado segundo a bibliografia para este tipo de concreto, devido às baixas relações a/c [1,2]. Na Figura 3 (c) observa-se a plasticidade da mistura, enquanto na Figura 3 (d) é mostrado o ensaio de abatimento que no caso das 3 granulometrias foi nulo.

2.3 Planejamento experimental

Após o processo de mistura foram moldados os corpos de prova

para os ensaios mecânicos e hidráulicos, respectivamente. Na Tabela 2 é apresentado o planejamento experimental.

Como mostrado na Tabela 2, os ensaios de resistência à compressão, índice de vazios e permeabilidade foram realizados em corpos de prova cilíndricos no intuito de correlacionar estas três propriedades de forma direta.

2.4 Compactação

O procedimento de compactação empregado nos corpos de prova cilíndricos e prismáticos foi o da mesa vibratória (Figura 4c), em camada única, durante 30 segundos. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura (Figura 4a e 4d), além de vigas de 150 mm por 150 mm por 600 mm (Figura 4b e 4d). A Tabela 3 apresenta o consumo de materiais por metro cúbico, utilizados na produção do concreto permeável. Como a relação a/c empregada foi muito baixa, houve a necessidade de incorporação do aditivo superplastificante polifuncional com (pH de 5, densidade de 1.180g/cm³ e conteúdo de cloretos <0.1%) [22], o que garantiu boa plasticidade na mistura e facilitou o processo de moldagem dos corpos de prova. Também foi utilizada uma resina polimérica (pH de 9, densidade de 1.05 g/cm³, viscosidade de 12cPoisés)[23] com o intuito de aumentar a aderência entre a argamassa e os agregados siderúrgicos, garantindo assim boa resistência mecânica sem prejudicar a permeabilidade.

2.5 Índice de vazios

O índice de vazios no estado endurecido foi determinado nos mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão, sendo estes ensaiados no estado saturado superfície seca, de forma a garantir a não absorção de água. Os corpos de prova foram envoltos em filme de PVC pelas superfícies laterais e face inferior e, posteriormente, introduzidos no molde metálico

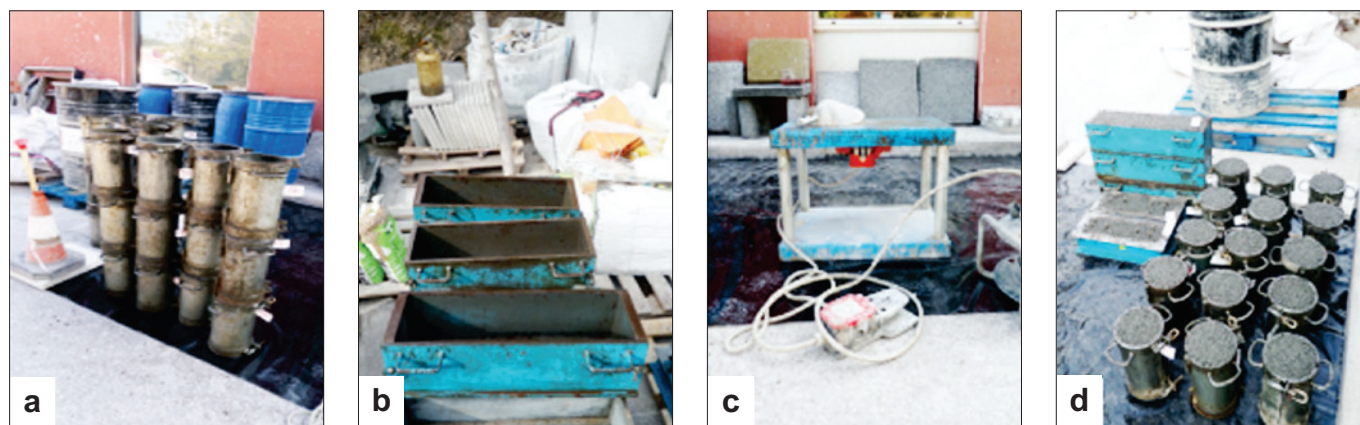


Figura 4
Moldagem e compactação corpos de prova

Tabela 3Consumo de materiais por m³

Granulometria	Cimento (kg/m ³)	Escória (kg/m ³)	a/c	Água (kg/m ³)	Res. emulsão (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)
A	350	2570	0,24	142,8	50	1,05
B	350	2570	0,24	142,8	50	1,05
C	350	771-1779	0,24	14,8	50	1,05

cilíndrico, de mesmas dimensões, para assegurar que o filme de PVC não sofresse deformações. O molde metálico com o corpo de prova teve sua massa aferida e tarada em uma balança. Por último, foi-se adicionando água até preencher os vazios internos do material e quando a água aflorou na superfície do corpo de

Onde:

V= índice de vazios (%)

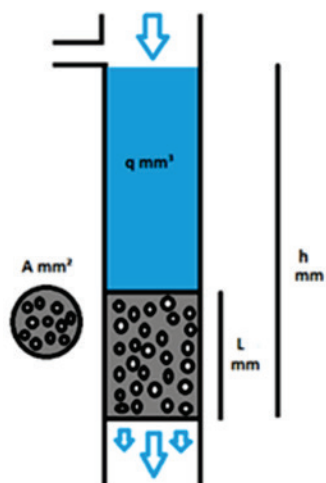
$V_{\text{água}}$ = Volume de água adicionada até aflorar na superfície do corpo de prova (l)

V_{cp} = Volume do corpo de prova de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (l)

O método utilizado é um método empírico recomendado por

2.6 Permeabilidade

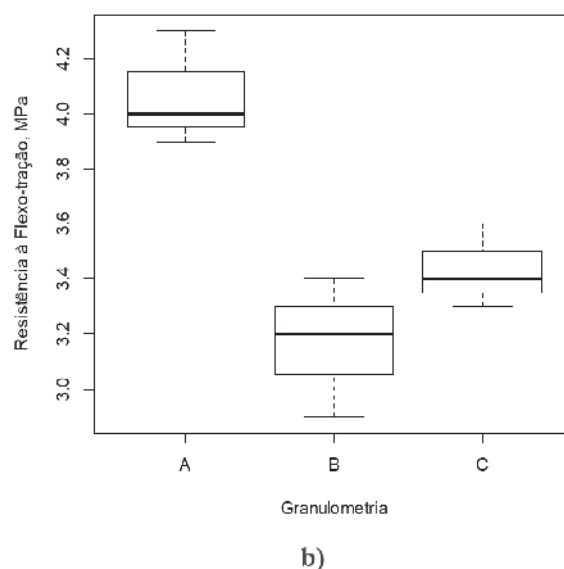
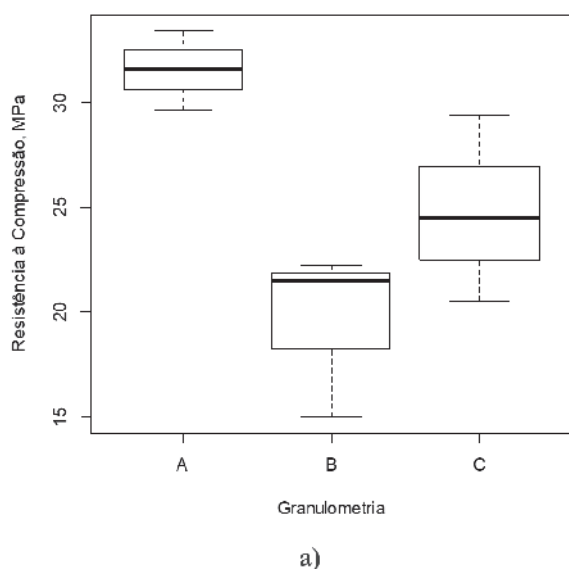
O ensaio de permeabilidade à carga constante segue o princípio da Lei de Darcy [13,25–27] e, basicamente, mede a quantidade de água que passa pelo corpo de prova em um determinado intervalo de tempo. Para este ensaio foram novamente utilizados os corpos de prova empregados no ensaio de resistência à compressão, também no estado saturado superfície seca. Os corpos de prova foram envoltos em filme de PVC, seguido de um recobrimento com fita adesiva convencional e, por fim, uma camada de fita adesiva de polietileno com tecido de algodão (Silver Tape), com o intuito de garantir a impermeabilidade [4]. O corpo de prova foi então posicionado entre dois tubos de PVC de mesmo diâmetro, sendo que o tubo superior continha um extravasor para garantir o nível da água constante durante o ensaio, como mostrado na Figura 5.

**Figura 5**

Ensaio de permeabilidade a carga constante

prova foi determinada sua massa. O índice de vazios foi calculado mediante a Equação 1[4,13,24].

$$V = \frac{V_{\text{água}} * 100}{V_{\text{cp}}} \quad (1)$$

**Figura 6**

Resultados propriedades mecânicas: a) Compressão; b) Flexo-tração

diferencia significativa com as outras duas granulometrias utilizadas nas duas propriedades mecânicas analisadas, apresentando em média um valor de resistência de aproximadamente 32 MPa na compressão. Este resultado pode ser explicado pelo arranjo granulométrico dos agregados da granulometria A, que possuem maior variedade de tamanho, aumentando os pontos de contato entre as partículas, o que facilita a distribuição de esforços e se traduz em um aumento da resistência mecânica. Já as granulometrias B e C não apresentam diferença significativas entre elas. No caso do concreto com agregados da escória B, sua granulometria é mais uniforme e o contato entre os grãos é pontual, o que prejudica a distribuição das cargas e diminui a resistência. Finalmente a escória C melhora a resistência mecânica, porém por apresentar predominância do tamanho de 10-20mm, é mais baixa se comparada à A.

No caso da resistência a flexo-tração a tendência foi praticamente igual a granulometria A apresentou diferença significativa com as outras duas, e a B e a C não apresentaram diferença entre elas. As três granulometrias cumprem com a resistência mínima estabelecida pela norma brasileira NBR 16416/2015 (>2MPa), para serem utilizados em pavimentos de tráfego leve ou calçadas para pedestres.

3.2 Propriedades hidráulicas

Os resultados correspondentes ao índice de vazios e coeficiente de permeabilidade à carga constante são apresentados na Figura 7. Como mostrado na Figura 7, as três granulometrias de escória utilizadas cumprem com a permeabilidade mínima requerida pela norma NBR 16416/2015, igual a 1mm/s. Com um pvalor inferior a 0,5% a granulometria A apresentou diferença significativa só com a granulometria B, e as granulometrias B e C não apresentaram diferença entre elas. Os coeficientes de permeabilidade obtidos encontram-se entre 10-12 mm/s, dentro da faixa de valores reportados na

bibliografia [28–30]. A permeabilidade do material está relacionada com a distribuição granulométrica dos grãos, o que indica que granulometrias mais contínuas exibem coeficientes de permeabilidade menores quando comparadas às granulometrias uniformes, como é o caso das escórias A e B [4].

Com relação ao índice de vazios, as 3 granulometrias apresentam diferença significativa entre elas como mostrado na Figura 7 e os valores obtidos situam-se entre 15-20%. Esta propriedade diretamente relacionada com a distribuição granulométrica e o consumo de materiais.

3.3 Correlações

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, obtidos na campanha experimental, bem como os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação de cada propriedade.

De acordo com a Tabela 4, os coeficientes de variação encontrados para as propriedades avaliadas estão em conformidade com o exposto pela bibliografia [31], devido ao controle de qualidade durante a moldagem dos corpos de prova, visto que todos os concretos foram moldados no mesmo dia, diminuindo a interferência da temperatura. Além disso, foi realizado o controle de umidade dos agregados e, pelo fato de o procedimento de compactação ter sido executado com auxílio da mesa vibratória, houve redução da variabilidade decorrente do operador humano no processo de produção. Com o intuito de interpretar melhor os resultados obtidos, foram implementadas duas análises paramétricas de correlação: a primeira relacionada às propriedades hidráulicas (índice de vazios e permeabilidade), e a segunda relacionada à influência dos agregados finos (% de areia) correspondentes a cada granulometria estudada, nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material. A Figura 8 mostra a correlação proposta entre o índice de vazios e o coeficiente e permeabilidade do concreto permeável.

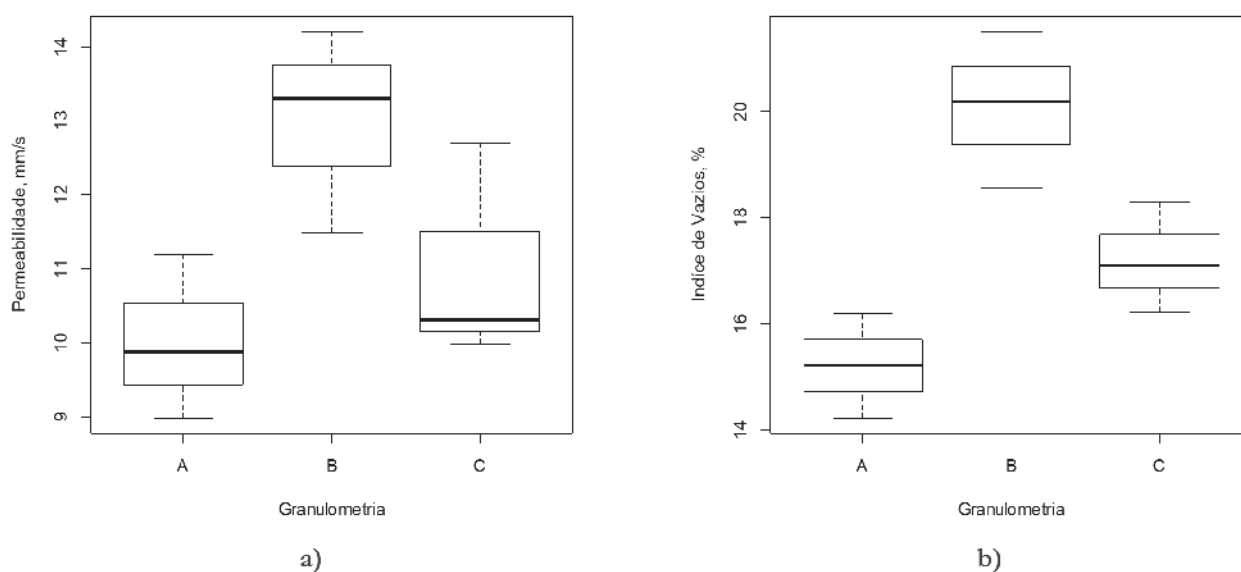


Figura 7

Resultados propriedades hidráulicas: a) Permeabilidade; b) Índice de vazios

Tabela 4

Resumo dos resultados

Granulometria	A				B				C			
Propriedade	f' _c (MPa)	f _{tt} (MPa)	Φ (%)	k (mm/s)	f' _c (MPa)	f _{tt} (MPa)	Φ (%)	k (mm/s)	f' _c (MPa)	f _{tt} (MPa)	k (mm/s)	Φ (%)
Média	31,53	4,07	15,23	10,02	18,90	3,17	20,09	12,97	23,30	3,43	11,00	17,21
DP	1,29	0,16	0,66	0,78	2,60	0,18	1,02	0,98	1,87	0,11	1,13	0,72
CV (%)	4,09	3,83	4,32	7,83	13,76	5,61	5,07	7,54	8,01	3,24	10,30	4,21

Segundo algumas pesquisas a correlação da permeabilidade e o índice de vazios para grandes intervalos e grande número de dados tem uma tendência maiormente exponencial [13,28], porém quando são considerados intervalos menores e se conta com poucos dados pode ser considerada uma tendência linear [1,32–34] que é o caso do presente trabalho, por tanto foi proposta uma correlação linear considerando um índice de vazios de 15-20% aproximadamente e um intervalo de permeabilidade de 9-14mm/s, esta correlação apresentou um bom ajuste para os materiais estudados.

Considerando que as 3 escorias utilizadas apresentavam teores diferentes de areia (<4.8mm) foi realizada uma análise para verificar a influência desta porcentagem de areia nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material. A Figura 9 apresenta a correlação proposta entre as propriedades de resistência à compressão e permeabilidade com a porcentagem de areia de cada uma das granulometrias utilizadas.

Conforme a Figura 9 existe uma correlação aproximadamente linear, para o intervalo de dados analisado, entre a resistência à compressão e a porcentagem de areia, ou seja, quanto maior a quantidade de areia maior a resistência do material, já que tamanhos inferiores a 4.8 mm melhoram a curva granulométrica, diminuindo a porosidade e aumentando a resposta mecânica do material. Por outro lado, o aumento da porcentagem de areia resulta em uma diminuição da permeabilidade do material, uma vez que isso resulta na formação de vazios menores, diminuindo a capacidade hidráulica dos condutos internos do concreto e consequentemente, a velocidade de passagem da água.

Dessa forma, existe um equilíbrio entre a porcentagem de areia e as duas propriedades anteriormente analisadas, o que significa que dependendo do uso final do material, pode ser implementada

ou não a adição de grãos inferiores a 4.8mm para aumentar a resistência mecânica sem um elevado prejuízo à permeabilidade do material.

Tendo em vista avaliar as possíveis relações entre os resultados experimentais obtidos, os resultados de resistência à compressão (f'_c), permeabilidade (k) e porcentagem de areia (s) foram coletados para cada mistura estudada. Esses dados podem ser consultados na Tabela 5.

Para estudar as relações entre os parâmetros, foi realizada uma análise em três fases (1, 2, 3). Os resultados das três características são utilizados para obter uma equação que os relacione através de uma regressão não-linear (Equação 2) usando o software experimental de ajuste da curva de dados (LAB Fit).

$$f'_c = 19.274 \cdot k^{0.004 \cdot (\% \text{ areia})} \quad (2)$$

Considerando o coeficiente de correlação obtido, as estimativas apresentam boa adequação, uma vez que R² é igual a 0.98. O erro relativo médio da estimativa de f'_c, apresenta um valor de 2.07%, o que não pode ser considerado significativo em relação à variabilidade intrínseca apresentada pelo concreto anterior. Assim, usando essa abordagem, obteve-se uma correlação aceitável para o intervalo dos dados analisados (análise empírica).

4. Conclusões

Segundo os resultados obtidos no presente trabalho foram obtidas as seguintes conclusões:

- As três granulometrias de escoria utilizadas satisfazem os parâmetros mínimos exigidos pela norma NBR 16416/2015, cumprindo facilmente com os valores de permeabilidade e

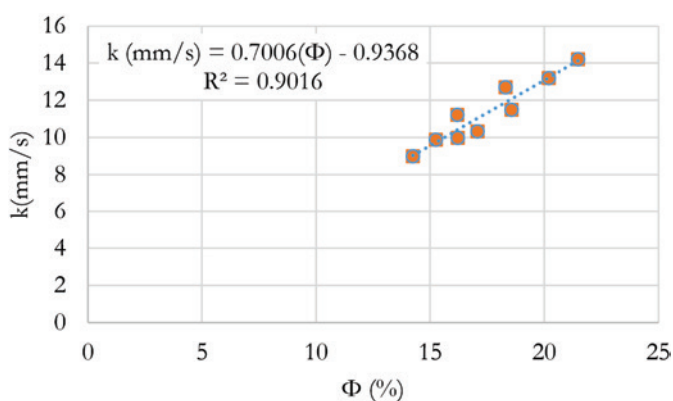


Figura 8
Correlação permeabilidade e índice de vazios

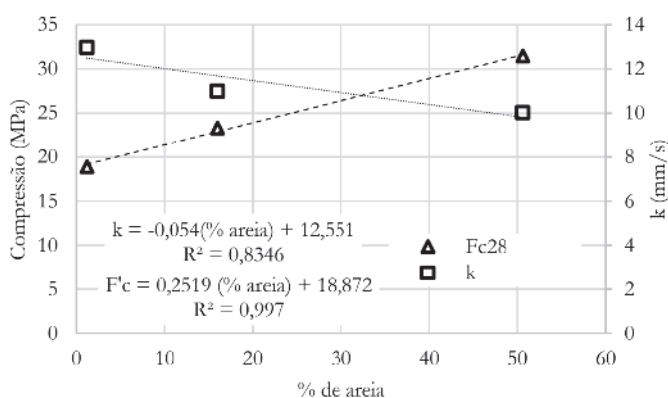


Figura 9
Correlação F'c e k vs % de areia

Tabela 5

Resultados experimentais obtidos

CoPe	f'_c (MPa)	k (mm/s)	areia (%)
A	31,50	10,02	50,60
B	18,90	12,97	1,20
C	23,30	11,00	16,02

- resistência, viabilizando o uso deste tipo de agregados na fabricação de calçadas para pedestres e pavimentos de tráfego leve.;
- Na resistência à compressão foi preponderante o tamanho máximo dos grãos de escoria. No caso da faixa 6-10 mm, obteve-se o melhor resultado, devido principalmente à sua composição granulométrica com 50.6% de areia, fato que levou a um maior ganho de resistência;
 - Em termos hidráulicos, a correlação entre a permeabilidade e o índice de vazios do material concorda com o encontrado na literatura para concretos permeáveis com índice de vazios entre 15-25%, já que são propriedades diretamente proporcionais e estão relacionadas com a granulometria do tipo de agregado utilizado;
 - Existe uma influência direta da porcentagem de areia relativa a cada granulometria nas propriedades mecânicas e hidráulicas do CoPe, por tanto pode ser encontrada uma faixa ótima de areia a qual aporte na resistência sem prejudicar a permeabilidade do material.

5. Referências

- [1] G.F. Barreto Sandoval, DESEMPENHO DO CONCRETO POROSO COM, Universidade Estadual de Londrina, 2014. <http://www.uel.br/pos/engesp/portal/pages/arquivos/dissertacao/GERSSON BARRETO SANDOVAL 2013-1.pdf>.
- [2] P.D. Tennis, M.L. Leming, D.J. Akers, Pervious Concrete Pavements, 2004. http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf.
- [3] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, 2006. doi:10.1036/0071462899.
- [4] G.F.B. Sandoval, I. Galobardes, R.S. Teixeira, B.M. Toralles, Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes, Case Stud. Constr. Mater. 7 (2017) 317–328. doi:10.1016/j.cscm.2017.09.001.
- [5] P. Chindaprasit, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa, Cement paste characteristics and porous concrete properties, Constr. Build. Mater. 22 (2008) 894–901. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007.
- [6] A.K. Chandrappa, K.P. Biligiri, Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review, Constr. Build. Mater. 111 (2016) 262–274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.
- [7] O. Deo, N. Neithalath, Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, Mater. Sci. Eng. A. 528 (2010) 402–412. doi:10.1016/j.msea.2010.09.024.
- [8] R. Zhong, K. Wille, Compression response of normal and high strength pervious concrete, Constr. Build. Mater. 109 (2016) 177–187. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051.
- [9] O. Deo, N. Neithalath, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities, Constr. Build. Mater. 25 (2011) 4181–4189. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055.
- [10] R. Zhong, K. Wille, Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete, Cem. Concr. Compos. 70 (2016) 130–138. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.03.016.
- [11] B. Huang, H. Wu, X. Shu, E.G. Burdette, Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 818–823. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025.
- [12] J.T. Kevern, Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete, J. Test. Eval. 43 (2015) 20130180. doi:10.1520/JTE20130180.
- [13] N. Neithalath, M.S. Sumanasooriya, O. Deo, Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction, Mater. Charact. 61 (2010) 802–813. doi:10.1016/j.matchar.2010.05.004.
- [14] H. Li, M. Kayhanian, J.T. Harvey, Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods, J. Environ. Manage. 118 (2013) 144–152. doi:10.1016/j.jenvman.2013.01.016.
- [15] M. Aamer Rafique Bhutta, N. Hasanah, N. Farhayu, M.W. Hussin, M.B.M. Tahir, J. Mirza, Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate), Constr. Build. Mater. 47 (2013) 1243–1248. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022.
- [16] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, G. Khoshnaw, S. Ipek, Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers, Constr. Build. Mater. 63 (2014) 206–213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046.
- [17] G.F.B. Sandoval, I. Galobardes, R.S. Teixeira, B.M. Toralles, Case Studies in Construction Materials Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes, Case Stud. Constr. Mater. 7 (2017) 317–328. doi:10.1016/j.cscm.2017.09.001.
- [18] W. Yeih, T.C. Fu, J.J. Chang, R. Huang, Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates, Constr. Build. Mater. 93 (2015) 737–745. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.104.
- [19] Instituto Aço Brasil, Relatório de Sustentabilidade 2014 - Sabesp, (2014) 246. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [20] K. Čosić, L. Korat, V. Ducman, I. Netinger, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, Constr. Build. Mater. 78 (2015) 69–76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073.
- [21] UNE EN 1744-1, Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico., ([s.d.]).
- [22] BASF, POZZOLITH 475 N, BASF Constr. Chem. España, S.L. (2010) 1–2.
- [23] PROPAMSA, Propam emulsión®, (2010) 102–103.
- [24] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, Characterizing Enhanced

- Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 2074–2085. doi:10.1016/j.cemconres.2006.09.001.
- [25] J.T. Kevern, V.R. Schaefer, K. Wang, Predicting Performance of Pervious Concrete using Fresh Unit Weight J.T. Kevern 1, V.R. Schaefer 2, and K. Wang 3 1, (2009).
- [26] A.K. Chandrappa, K.P. Biligiri, Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 627–637. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035.
- [27] American Concrete Institute (ACI), Report On Pervious Concrete (ACI 522-R10), 2010.
- [28] W.D. Martin, N.B. Kaye, B.J. Putman, Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 59 (2014) 78–84. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034.
- [29] R. Pieralisi, S.H.P. Cavalaro, A. Aguado, Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete, *Cem. Concr. Res.* 102 (2017) 149–160. doi:10.1016/j.cemconres.2017.09.009.
- [30] K.H. Fwa, T.F.;Lim Emiko; Tan, Comparison of Permeability and Clogging Characteristics of Porous Asphalt and Pervious Concrete Pavement Materials, (2014).
- [31] A. Kia, H.S. Wong, C.R. Cheeseman, Clogging in permeable concrete: A review, *J. Environ. Manage.* 193 (2017) 221–233. doi:10.1016/j.jenvman.2017.02.018.
- [32] C. Gaedicke, A. Marines, F. Miankodila, A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 494–503. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.043.
- [33] B.J. Putman, A.I. Neptune, Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 3480–3485. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.039.
- [34] A.I. Neptune, B.J. Putman, Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures, *ACI Mater. J.* (2010).