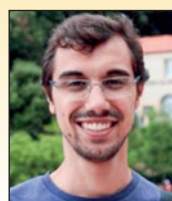


Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing

Caracterização do concreto permeável com foco em ensaios não destrutivos



S. T. MARTINS FILHO ^a
sergiotunis@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4334-399X>

E. M. BOSQUESI ^a
eduardobosquesi@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3802-0288>

J. R. FABRO ^a
julianofabro@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1680-9627>

R. PIERALISI ^b
ricpieralisi@ufpr.br
<https://orcid.org/0000-0001-8339-5324>

Abstract

This study aims to investigate the properties of pervious concrete focusing on characterization tests by the Ultrasound Method. For this, three mixtures were produced with the paste/aggregate (P/Ag) ratio ranging from 0.45 to 0.65, water to cement ratio (w/c) of 0.3, and all the specimens were compacted with a steel rod. The application of the ultrasound method deserves special attention for the characterization of pervious concrete, due to a lack of research and the potential to develop analytical models for predicting properties from ultrasonic pulse velocity (UPV) as an independent variable. The UPV obtained in this study ranged from 3642 to 4262 m/s for an approximately 12% reduction in porosity, with a correlation (R^2) of 0.91. It is noteworthy that the high porosity of pervious concrete causes attenuation of the ultrasonic wave. The measurements of UPV had higher values for specimens with higher densities ($R^2=0.87$), higher compressive and tensile strengths (R^2 of 0.79 and 0.84, resp.), and lower permeability ($R^2 = 0.91$).

Keywords: pervious concrete, ultrasound method, porosity, permeability, compressive strength.

Resumo

Neste estudo, objetiva-se investigar as propriedades do concreto permeável com foco nos ensaios de caracterização pelo Método do Ultrassom. Para isso, foram produzidos três traços com a relação pasta/agregado variando de 0,45 a 0,65, relação a/c de 0,3 e compactados por haste. A aplicação do Método do Ultrassom merece atenção especial para caracterização do concreto permeável, com carência de pesquisas e com potencial de desenvolver modelos analíticos de previsão das propriedades a partir da velocidade de pulsos ultrassônicos (VPU) como uma variável independente. A VPU variou de 3642 até 4262 m/s para uma redução de aproximadamente 12% na porosidade, com alta correlação (R^2) de 0,91 e destaca-se que a alta porosidade do concreto provoca atenuação da onda ultrassônica. As medições da VPU retrataram valores maiores para os CPs com maiores densidades ($R^2=0,87$), maiores resistências à compressão e à tração (R^2 de 0,79 e 0,84, resp.), e menores permeabilidades ($R^2=0,91$).

Palavras-chave: concreto permeável, método do ultrassom, porosidade, permeabilidade, resistência à compressão.

^a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação de Engenharia Civil, Apucarana, PR, Brasil;

^b Universidade Federal do Paraná, Centro de Estudos de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, PR, Brasil.

1. Introdução

Atualmente, o concreto permeável é utilizado nas construções de pavimentos em áreas urbanas, sendo uma maneira de minimizar os impactos provocados pela pavimentação convencional impermeável. Durante chuvas intensas, a pavimentação impermeável contribui para o aumento do escoamento das águas superficiais e com potencial de inundações repentinas [1, 2], sendo uma maneira eficaz para atender às crescentes demandas ambientais.

A permeabilidade é uma propriedade intrínseca do concreto permeável que permite a passagem de um fluido (água) por meio de sua matriz [3]. Essa característica é atribuída ao fato de possuir uma rede de macro-poros interconectados que formam canais permitindo a drenagem da água. Ainda relacionado a sua capacidade permeável, pode ser utilizado como dispositivo de drenagem em muros de arrimo [4].

O concreto permeável é utilizado para reduzir a formação de ilhas de calor em cidades [5], e auxilia como barreira de som, absorvendo o ruído provocado pela interação entre pneu e pavimento [6]. No entanto, geralmente o concreto permeável não é utilizado para pavimentos com alta solicitação de tráfego, uma vez que sua alta porosidade diminui sua resistência à compressão [5, 7, 8].

Aliado aos aspectos ambientais, as características técnicas do concreto permeável despertam um interesse cada vez maior para seu emprego em construções sustentáveis, sendo promovidas pelos sistemas de certificação de edifícios, como o LEED da Green Building Council [1]. O concreto permeável pode contribuir para algumas categorias na certificação do LEED, sendo: Locais Sustentáveis; Eficiência Hídrica; Materiais e Recursos; e Inovação em Design [9].

Visando otimizar a porcentagem de poros interconectados em relação ao volume total do elemento, as filosofias de dosagem mais tradicionais ACI 522R-10 [10] sugerem que sua composição seja

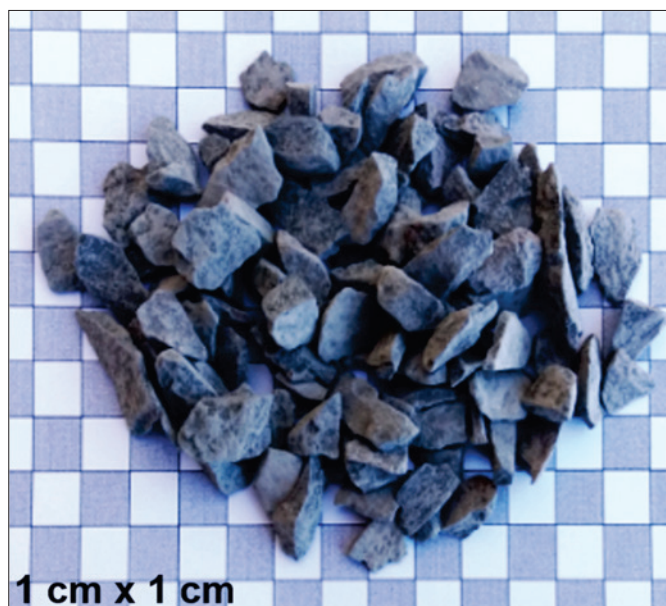


Figura 1
Aspecto superficial da fração granulométrica:
faixa 6,3 a 9,5 mm

formada por uma quantidade mínima ou nula de areia e o volume de pasta apenas o suficiente para envolver os agregados graúdos. Devido a essa proporção de materiais, possui uma consistência seca, com abatimento do tronco cone (*slump test*) próximo a zero [10-12]. A porosidade do concreto permeável é um fator relevante em seu desempenho e possui relação com outras propriedades, como a permeabilidade [12-14]. Destaca-se que atualmente não há uma normativa que regulamente o procedimento de ensaio para caracterização da permeabilidade do concreto permeável em laboratório. No entanto, para alguns pesquisadores [12, 15-19], o ensaio de permeabilidade pode ser realizado com permeâmetro de carga constante para conjuntos granulares com alta porosidade e alta permeabilidade. Por outro lado, outros autores [20-23] realizam o ensaio utilizando permeâmetro de carga variável.

As filosofias de dosagem do concreto permeável são limitadas. Não há um conhecimento teórico consolidado e universalmente aceito que relacione os materiais constituintes e seu processo de confecção com suas propriedades [24]. Além disso, segundo a ACI 522R-10 [10] as dosagens do concreto permeável têm um grande componente empírico com base nas experiências já realizadas. Nas aplicações usuais entre os pesquisadores, nota-se traços, em massa, variando 1:2 a 1:12, com consumo de cimento variando de 150 a 700 kg/m³ e relação a/c de 0,2 a 0,5, podendo obter como características porosidades de até 42 % e permeabilidade de até 33 mm/s [2].

As primeiras recomendações normativas para o concreto permeável publicadas foram: manual da PCP [1]; e ACI 522R-10 [10]. Ambas abordam aspectos técnicos do material e seus constituintes, métodos simplificados de dosagem e ensaios de caracterização. Nos últimos anos, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) lançou uma coletânea de normativas para caracterização do concreto permeável: ASTM C1754 [25], para determinar a densidade e conteúdo de vazios do concreto permeável no estado endurecido; a ASMT C1747 [26], para determinar a resistência a degradação do concreto permeável por impacto e abrasão; a ASTM C1688 [27], para determinar a densidade e conteúdo de vazios do concreto permeável no estado fresco; ASTM C1701 [28], para determinar a permeabilidade do concreto permeável. Recentemente, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), também, publicou uma normativa sobre concretos permeáveis a ASTM NBR 16416 [29], que aborda requisitos e procedimentos dos pavimentos permeáveis, com enfoque dado para blocos intertravados e o ensaio de caracterização da permeabilidade. Embora tenha normativas para caracterização do concreto permeável, não há normas ou abordagens aprofundadas na literatura sobre a utilização de ensaios não destrutivos para uma caracterização direta do concreto permeável.

O Método de Ultrassom é um ensaio não destrutivo relevante para caracterização e investigação do concreto convencional [30,47]. Em relação ao concreto permeável, existem poucas pesquisas nesta linha, o que abre possibilidade de desenvolver equações de previsão que podem auxiliar na determinação de suas propriedades.

A utilização do ultrassom permite a caracterização do concreto, detectando falhas, e monitorando seu estado de deterioração, além de obter suas propriedades mecânicas. Geralmente a frequência dos transdutores utilizados nos ensaios variam entre 25 a 100 kHz

Tabela 1
Dimensões e índice de forma da faixa granulométrica

Classes granulométricas (mm)	Comprimento (c)	Largura (l)	Espessura (e)	Índice de forma (desvio padrão)	Esfericidade (desvio padrão)	Massa unitária (kg/m³) (desvio padrão)	Índice de vazios
	Média (mm) (desvio padrão)						
6,3 - 9,5	15,96 (2,92)	10,08 (1,58)	5,09 (1,64)	3,29 (1,03)	0,59 (0,09)	1.374,01 (2,35)	0,544

e a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) para o concreto convencional é diferente dependendo da constituição da mistura, de seu proporcionamento, e das características físicas dos agregados [31]. As normas para determinação da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) no concreto seguem a ASTM C 597 [32].

O concreto permeável possui muitos poros, provocando uma atenuação da onda ultrassônica, e fazendo com que este comportamento seja diferente do concreto convencional que são inerentemente densos, sendo necessário um fator de amplificação para medir a VPU entre a faixa de 50 e 60 dB [33]. Verificou-se que para uma maior densidade do concreto permeável, menor porosidade e maior resistência à compressão, maior será a VPU. Destaca-se a viabilidade na utilização do método de ultrassom para realizar avaliações periódicas nos pavimentos de concreto permeável, preservando-o da necessidade da extração de testemunho, o que lhe causaria perturbações na estrutura porosa [34,35].

A partir do atual estado da arte, este artigo objetiva investigar as propriedades do concreto permeável com foco nos ensaios de caracterização pelo método do ultrassom.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Os agregados graúdos foram obtidos por um processo de peneiramento a partir de um conjunto granular de origem basáltica adquiridos em uma pedreira localizada na região de Apucarana/PR. O processo de peneiramento seguiu as recomendações da ABNT NBR NM 248 [36], obtendo a fração granulométrica entre 6,3 a 9,5 mm. Na Figura 1 pode ser observado o aspecto superficial dos agregados graúdos.

A fração granulométrica obtida foi caracterizada pelos seguintes ensaios: Massa unitária, ABNT NBR NM 45 [37]; Índice de forma (IF), ABNT NBR 7809 [38]; e Método de Zingg [39]. Para isso, foram realizados, com o auxílio de um paquímetro, as medições de três dimensões (comprimento, largura e espessura) de 200 agre-

gados da fração granulométrica. Na Tabela 1 podem ser observadas as características físicas dos agregados.

Segundo a classificação de Zinng [39], obtida através dos valores de alongamento (relação entre espessura e largura) e planicidade (relação entre largura e comprimento) dos agregados, o aspecto predominante dos agregados é lamelar-alongado. A classificação do agregado é de fundamental importância para o entendimento das propriedades do concreto permeável, o qual suas características físicas influenciam no processo de compactação, afetando adversamente a área de contato entre os agregados e levando, assim, a diferentes densidades e resistências [10, 40, 44].

As composições utilizadas foram definidas com o intuito de emular dosagens típicas encontradas em aplicações de concreto permeável, sendo os agregados com diâmetro uniforme e dentro do encontrado na literatura [17, 22, 40-42]. Para as ralações Pasta/Agregado (P/Ag) os valores utilizados atendem a produção de um concreto com porosidade e permeabilidade compatíveis com a aplicação prática.

Na Tabela 2 podem ser observados os 3 traços produzidos, o qual variaram o volume de P/Ag de 0,45 a 0,65, atribuindo a nomenclatura aos três traços de T0.45, T0.55 e T0.65. A faixa granulométrica utilizada foi uniforme, com diâmetros entre 6,3 a 9,5 mm, a relação água/cimento (a/c) foi constante e igual a 0,3, e foi utilizado o Cimento Portland CP II-Z regulamentado pela ABNT NBR 16697 [43]. O processo de mistura do concreto permeável seguiu as recomendações de SCHAEFER et al. [44]. Após a confecção do concreto foi realizada uma inspeção visual e verificou-se que a relação a/c utilizada deixou os agregados inteiramente cobertos com pasta e no processo de moldagem a pasta não segregou, seguindo as recomendações de TENNIS et al. [1]. A moldagem foi realizada pelo lançamento do concreto no interior do molde cilíndrico em três camadas, sendo que cada camada foi compactada com 25 golpes com haste metálica, seguindo a normativa da ABNT NBR 45 [37]. Para realização dos ensaios foram produzidos, no total, 36 CPs, sendo estes cilíndricos (com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura).

Tabela 2
Traço do concreto permeável: primeira campanha experimental

Traço	Relação P/Ag em massa	Consumo de brita (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço em massa		
				Cimento	Brita	a/c
T0,45	0,45	1.305,91	452,26	1	2,9	0,3
T0,55	0,55	1.306,85	553,35	1	2,4	0,3
T0,65	0,65	1.218,81	609,40	1	2,0	0,3

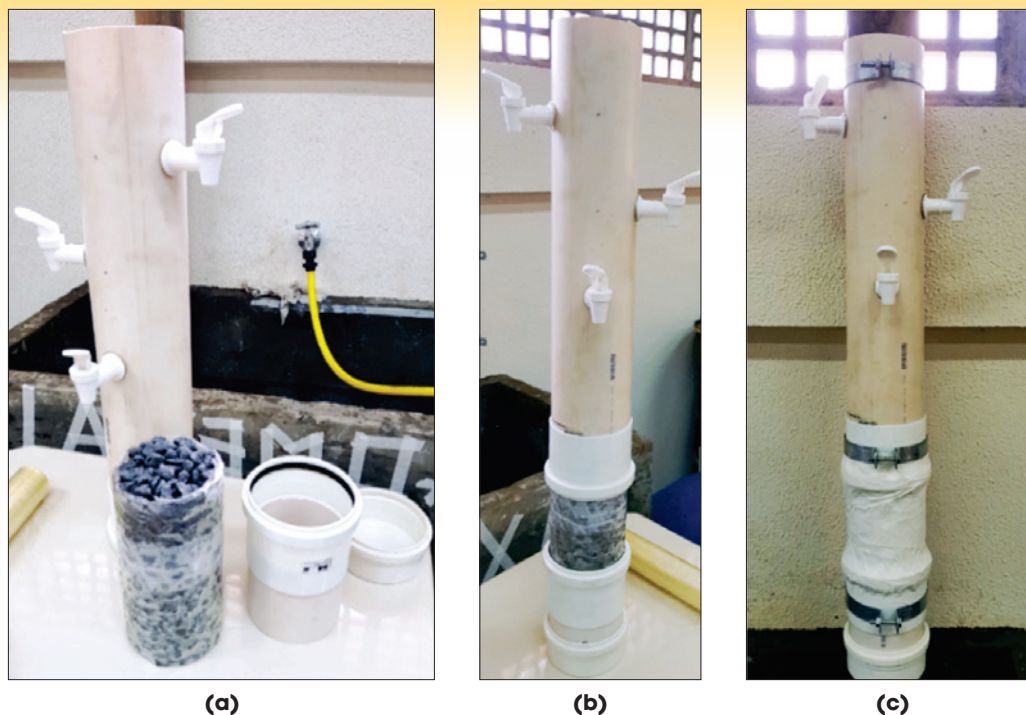


Figura 2
Processo de montagem do ensaio de permeabilidade



Figura 3
Ensaio pelo método de ultrassom: leitura realizada pela transmissão direta na longitudinal

2.2 Métodos

Os ensaios utilizados para caracterização do concreto permeável foram: densidade e porosidade no estado fresco; densidade e porosidade no estado endurecido, permeabilidade; resistência à compressão e à tração; e determinação da VPU pelo Método do Ultrassom. A densidade e porosidade do concreto permeável no estado fresco foi obtida utilizando o procedimento descrito pela ASTM C1688 [27]. Também foi utilizado o procedimento proposto pela ASTM C1754 [25] para calcular a densidade e porosidade do concreto permeável no estado endurecido. A permeabilidade do concreto permeável foi obtida através do permeâmetro de carga constante, sendo este usualmente utilizado por alguns pesquisadores [12,15-19]. Na Figura 2 pode ser observado o permeâmetro de carga constante desenvolvido para a realização do ensaio. Os resultados de permeabilidade apresentados neste estudo foram calculados com uma carga hidráulica de 30 cm.

Após a amostra ser acoplada ao permeâmetro, a abertura inferior do tubo foi fechada. Em seguida, foi medido o volume de água necessário para encher o tubo inferior e os espaços porosos da amostra (q_1). Em seguida, o aparelho foi completamente preenchido com água e o tubo inferior foi aberto. Finalmente, o volume de água que passou pela amostra em 60 s foi medido (q_2).

A permeabilidade (k) foi estimada usando a Lei de Darcy de acordo com a Equação 1. Nesta equação, q é a diferença entre os dois volumes medidos de água ($q_2 - q_1$), h é a amostra de altura (L_s) mais a carga hidráulica (30 cm), e t é o intervalo de tempo (60 s).

$$k = \frac{4 \cdot q \cdot L_s}{\pi \cdot \phi_s^2 \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

A resistência à compressão foi determinada através do rompimento de corpos de prova cilíndricos conforme estabelece a ABNT NBR 5739 [45], e o capeamento dos CPs para realizado com gesso, permitindo a regularização da superfície. A resistência à tração por compressão diametral foi determinada através do rompimento

Tabela 3

Propriedades do concreto permeável

Traços	Densidade estado fresco (kg/m ³)	Densidade estado endurecido (kg/m ³)	Porosidade total (%)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Permeabilidade com altura de 30 cm (mm/s)	VPU (m/s)
T0,45	1.914,85 (23,48)	1.893,84 (23,71)	28,44 (1,05)	7,77 (0,46)	1,49 (0,20)	8,31 (0,77)	3,719,79 (48,91)
T0,55	2.046,04 (32,80)	2.026,20 (32,41)	20,97 (1,62)	10,65 (1,07)	2,36 (0,34)	2,37 (0,99)	4,063,50 (73,28)
T0,65	2.035,27 (42,38)	2.004,08 (42,21)	20,93 (2,14)	11,73 (1,72)	2,33 (0,41)	3,15 (0,82)	4,163,00 (97,70)

de corpos de prova cilíndricos conforme às recomendações da ABNT NBR 7222 [46].

Para cada corpo de prova foi determinado o tempo de propagação de pulso ultrassônico utilizando o aparelho de ultrassom da marca PROCEQ/Pundit Lab, seguindo as diretrizes da ASTM C597 [32]. A leitura dos CPs pelo ultrassom foi realizada pela transmissão direta na longitudinal (20 cm de comprimento), 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). A configuração do teste consistiu em duas placas com furos para apoiar os transdutores para aplicação direta, assegurando que os transdutores estavam concêntricos ao corpo de prova, como pode ser observado na Figura 3. Conforme recomendação de Chandrappa e Biligiri [34], como a superfície da amostra de concreto permeável é normalmente irregular devido à baixa relação P/Ag, foi aplicada uma camada espessa de gel entre as superfícies da amostra e os transdutores. Finalmente, a média de três medidas foi usada como um único valor da VPU.

3. Resultados e discussões

Na Tabela 3 pode ser observado as médias e desvios padrão (entre parênteses abaixo da média) de todas as propriedades ensaiadas, densidade (estados fresco e endurecido), porosidade, resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade e a VPU. A partir dos dados obtidos na caracterização pelo método

do ultrassom, algumas correlações podem ser realizadas com o objetivo de entender o comportamento do concreto permeável utilizando um método não destrutivo.

Na Figura 4a pode ser observada a relação entre a VPU com a porosidade total, nota-se que a VPU aumenta à medida que a porosidade diminui. Esse comportamento é esperado pois os vazios de ar provocam atenuação da velocidade da onda ultrassônica. Além disso, quanto maior a relação P/Ag, aumenta a possibilidade da onda encontrar caminhos mais curtos para sua propagação, aumentando a velocidades da onda. A Equação 2 apresenta a relação para obter a porosidade total (P) através da variável independente VPU e da relação P/Ag.

$$P = 105.7576 + 11.8586 \cdot P/Ag - 0.022308 \cdot UPV \tag{2}$$

A Figura 4b apresenta uma comparação entre a porosidade experimental e a estimada de todas as amostras, incluindo uma linha de tendência. Os resultados revelam um erro de previsão relativo de 0,24% e um coeficiente de correlação (R2) de 0,91.

A Figura 5a apresenta a relação entre a VPU e a densidade no estado endurecido. Como esperado, observa-se que quanto maior a densidade do material, maior a velocidade de pulso ultrassônico, pois a onda se propaga com maior velocidade na matéria do que em estrutura com muitos vazios. A Equação 3 apresenta a relação para obter a densidade no estado endurecido (DE) através da variável independente VPU e P/Ag.

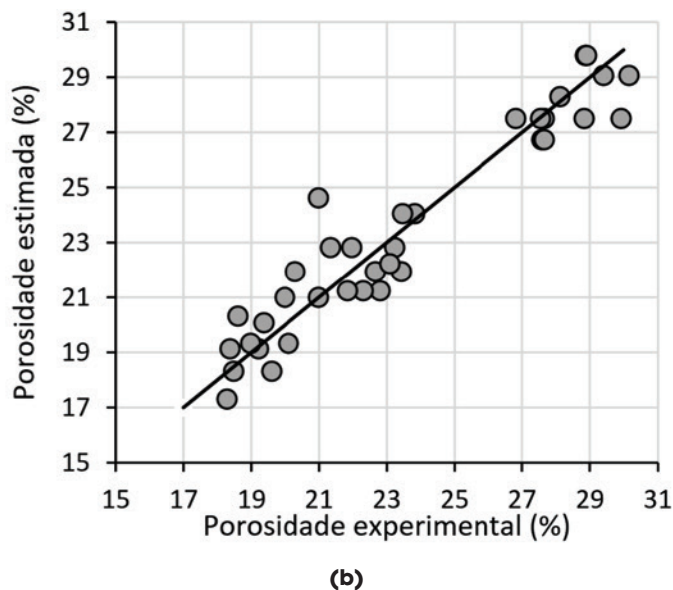
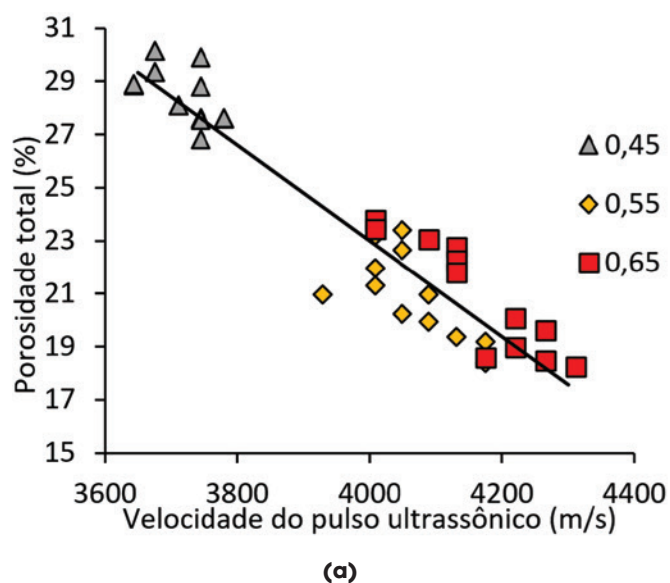


Figura 4

Relação entre a porosidade total e velocidade de pulso ultrassônico (a) e validação dos dados experimentais e estimados (b)

$$DE = 413,28 - 457,86 \cdot P/Ag + 0,45534 \cdot UPV \quad (3)$$

A Figura 5b retrata a comparação dos resultados experimentais com os estimados de todos CPs, incluindo uma linha de tendência. Os resultados revelam que um erro de previsão relativo de 0,01% e um coeficiente de correlação (R2) de 0,87.

A Figura 6a apresenta a comparação entre a permeabilidade (k), dependendo da VPU. Observa-se que os CPs com maior permeabilidade

de resultam em menores VPU, o que está relacionado a sua maior porosidade. Isso esclarece a possibilidade de estimar a permeabilidade do concreto permeável com testes não destrutivos. É possível estimar a permeabilidade (k) através das variáveis independentes VPU e razão P/Ag pela Equação 4.

$$k = 65,842 + 10,089 \cdot P/Ag - 0,01677 \cdot UPV \quad (4)$$

A Figura 6b apresenta uma comparação entre a permeabilidade

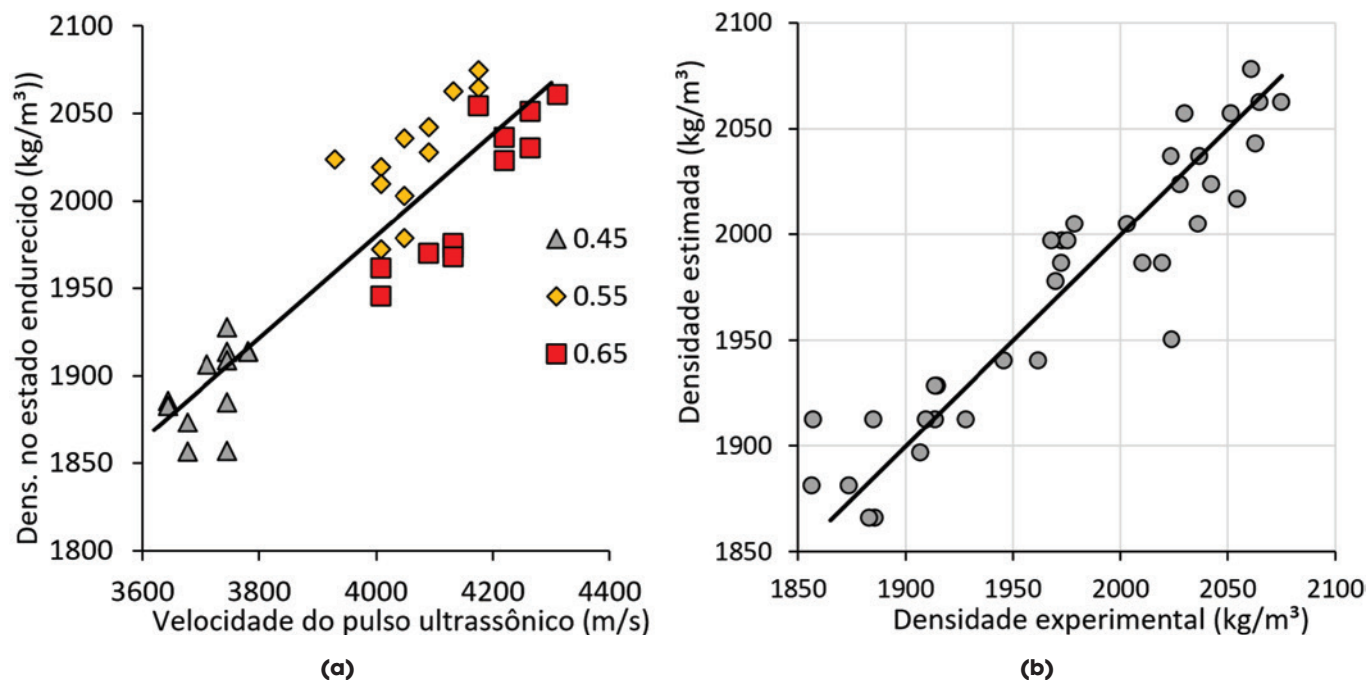


Figura 5

Densidade no estado endurecido e velocidade de pulso ultrassônico (a) e validação dos dados experimentais e estimados (b)

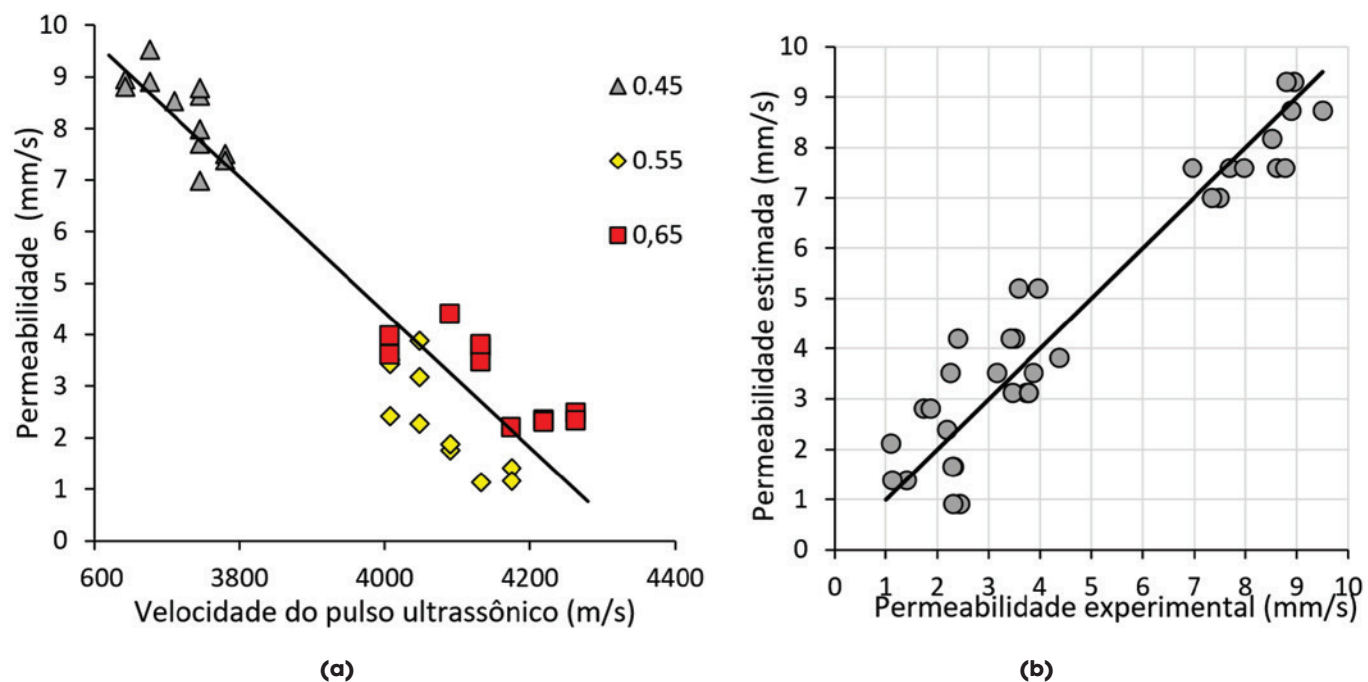


Figura 6

Relação entre permeabilidade e velocidade de pulso ultrassônico (a) e validação dos dados experimentais e estimados (b)

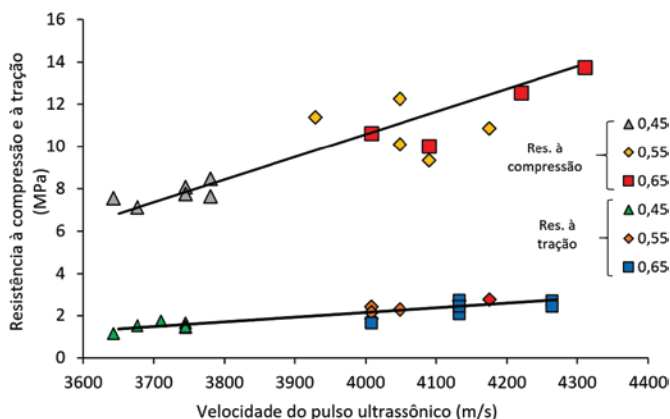


Figura 7
Relação entre resistência à compressão e tração com velocidade de pulso ultrassônico para três volumes P/Ag

experimental e a estimada de todas as amostras, incluindo uma linha de tendência. Os resultados revelam que um erro de previsão relativo de 5,06% e um coeficiente de correlação (R²) de 0,91. A Figura 7 mostra a comparação entre as forças de compressão e tração, dependendo da VPU. Essa correlação fornece uma estimativa dessas propriedades sem a necessidade de testes destrutivos. As Equações 5 e 6 apresentam as relações para obter a resistência à compressão e à tração, respectivamente, através das variáveis independentes VPU e razão P/Ag.

Na Figura 8 pode ser observado a linha de tendência retratando a concordância entre os resultados. A comparação dos resultados

mostrou um erro de previsão relativo é de 0,63% e 0,81%, e um coeficiente de correlação (R²) de 0,79 e 0,84, para a resistência à compressão e à tração, respectivamente.

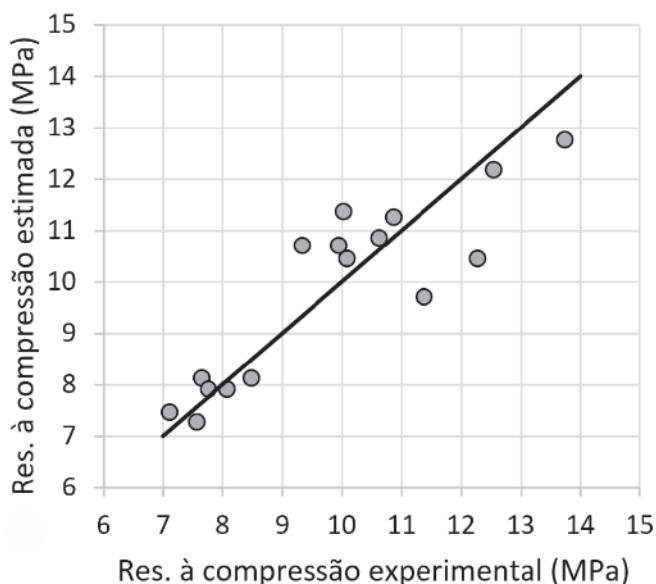
$$\sigma_C = -18.56 + 6.418 \cdot P/Ag + 0.006297 \cdot UPV \tag{5}$$

$$\sigma_T = -9.4996 - 3.237 \cdot P/Ag + 0.003354 \cdot UPV \tag{6}$$

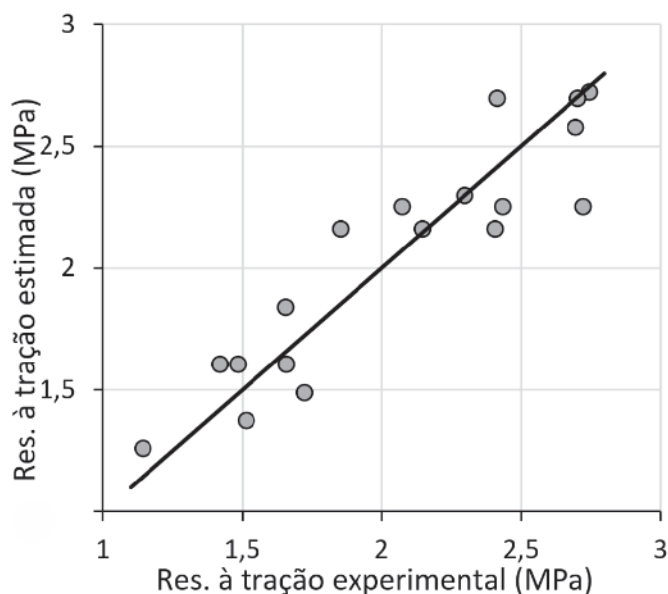
Vale destacar uma característica particular do concreto permeável em relação a sua ruptura, na qual predominantemente foram os agregados graúdos que sofreram falhas e não a camada de ligação P/Ag, comportamento também observado por outros autores [21]. As correlações apresentadas sugerem o potencial que a aplicação dos ensaios não destrutivos tem para caracterização do concreto permeável, evitando a necessidade de extração de testemunho e permitindo estabelecer correlações com suas propriedades. Assim, propõem-se estudos com maior profundidade a fim de verificar a influência dos materiais constituintes do concreto permeável na VPU. Ressalta-se que as equações encontradas são apenas compatíveis com os materiais utilizados nesta pesquisa, assim, materiais de diferentes características físicas e químicas precisam ser testados e validados para as equações apresentadas.

4. Conclusões

A aplicação do Método do Ultrassom merece atenção especial para caracterização do concreto permeável, com carência de pesquisas e com potencial de desenvolver modelos analíticos de previsão das propriedades a partir da VPU como uma das variáveis independentes. Os resultados de velocidade de pulsos



(a)



(b)

Figura 8
Validação dos dados de resistência à compressão (a) e à tração (b) estimada e experimental

ultrassônicos (VPU) ficaram entre 3642 e 4262 m/s para uma variação de aproximadamente 12% na porosidade. À medida que a porosidade aumentou, a VPU diminuiu, uma vez que os vazios provocam atenuação da onda ultrassônica. Além disso, as medições da VPU retrataram valores maiores para os CPs com maiores densidades e maior desempenho mecânico. Com os valores de VPU de todas as amostras, foi realizado uma regressão linear para estimar as características e propriedades do concreto, obtendo alto coeficiente de correlação, sendo: 0,91 (Porosidade); 0,87 (Densidade); 0,91 (Permeabilidade); 0,79 e 0,84 (Resistência à compressão e tração, respectivamente).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação de Engenharia de Construção Civil, PPGCEC, da UFPR. Ao Departamento de Engenharia Civil da UTFPR/Apucarana.

6. Referências bibliográficas

- [1] TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. Pervious concrete pavements. Technical report, EB302.02. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 32p, 2004.
- [2] KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C.R. Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, v.193, p. 221-233, 2017.
- [3] CAPUTO, H.P. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações-Fundamentos*, v. 1, 234p, Rio de Janeiro, 1988.
- [4] OSPINA, C. M. M.; ERAZO, C. H. B. Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según el tipo de granulometría. Medellín, 2007.
- [5] FERGUSON, B. K. *Porous pavements*, Boca Raton: CRC Press, London, 577p, 2005.
- [6] KIM, H. K.; LEE, H. K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. *Applied Acoustics*, v. 71, p. 607-615, 2010.
- [7] HAGER, A. S. *Sustainable Design of Pervious Concrete Pavements*. PhD Dissertation, University of Colorado Denver, Department of Civil Engineering, Denver, CO, 2009.
- [8] SABNIS G.M. *Green building with concrete. Sustainable design and construction*, 1ª Ed. Boca Raton, 320p, 2012.
- [9] ASHLEY, E. Using Pervious Concrete to Achieve LEED Points. *Concrete Infocus*. National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD, p. 1-6, 2008.
- [10] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), 2010. Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522. Report number: ACI 522R-10.
- [11] NEITHALATH N.; DEO, O. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 4181-4189, 2011.
- [12] 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.
- [13] MEININGER, R. C. No-Fines Pervious Concrete for Paving. *Concrete International*, v.10, p. 20-27, 1988.
- [14] GHAFUORI, N.; DUTTA, S. Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 7, n. 3, p. 183-191, 1995a.
- [15] THO-IN, T.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Pervious highcalcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 366-371, 2012.
- [16] SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 42, p. 33-39, 2013.
- [17] ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 585-591, 2013.
- [18] BHUTTA, M. A. R.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUS-SIN, M. W.; TAHIR, M. B. M.; MIRZA, J. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1243-1248, 2013.
- [19] KUO, W. T.; LIU, C. C.; SU, D. S. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, v.37, p. 328-335, 2013.
- [20] NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials Characterization*, v. 61, p. 802-813, 2010.
- [21] YAHIA, A.; KABAGIRE, D. New approach to proportion pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 62, p. 38-46, 2014.
- [22] NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL. M.; LE-LEYTER, L.; BARAUD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 271-282, 2014.
- [23] COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS*, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, 2018.
- [24] CAVALARO, S. H. P.; BLANCO, A.; PIERALISI, R. Holistic modelling approach for special concrete: from fresh-to hardened-state. *RILEM Technical Letters*, v. 3. p. 84-90, 2018.
- [25] 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.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1747 / C1747M, Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1688 / C1688M, Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS...ASTM C1701 / C1701M, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos, Rio de Janeiro, 2015.
- [30] OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete —the possibility of NDE. *Ultrasonics*, v. 38, p. 546-552, 2000.
- [31] MALHOTRA, V.M., N. J. E. CARINO, N. J. E. Handbook of Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2nd edition, 2004.
- [32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C597, Pulse velocity through concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989.
- [33] CHANDRAPP, A. K.; BILIGIRI, K. P. Investigations on Pervious Concrete Properties Using Ultrasonic Wave Applications. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 45, n.5, p.1736-1749, 2017.
- [34] CHANDRAPP, 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, 2016c.
- [35] AMINI, K.; WANG, X.; DELATTE, N. Statistical Modeling of Hydraulic and Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Nondestructive Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 6, p. 1-8, 2018.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados -Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006.
- [39] ZINGG, T. Beitrag zur schotteanalysis. Diss.-Druckerei A.-O. Gebr. Leemann & Co., 107p., 1935.
- [40] LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. *Journal of Environmental Management*, v.193, p. 221-233, 2017.
- [41] LIM, E.; TWAN, K. H.; FWA, T. F. Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for use in pavement. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 9, p. 1565-1575, 2013.
- [42] IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 524–529, 2014.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.NBR 16697: Cimento Portland- Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.
- [44] SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. Mix design development for pervious concrete in cold weather climates. National Concrete Pavement Technology Center, 83p, 2006.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.
- [47] CARRIÓN, A.; GENOVÉS, V.; GOSÁLBEZ, J.; MIRALLES, R.; PAYÁ, J. Ultrasonic signal modality: A novel approach for concrete damage evaluation. *Cement and Concrete Research*, v. 101, p. 25-32, 2017.