
Estudo experimental das propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável

Experimental study of physical and mechanical properties of permeable concrete

Wendel Melo Prudêncio de Araújo

Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Altamira. Mestre em Engenharia dos Materiais pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. **Endereço:** Rodovia Ernesto Acioly, Km 3, S/N - Estrada do Forte. Bairro: Nova Colina, Altamira - PA, CEP.: 68.377-630. **E-mail:** wendel.prudencio@ifpa.edu.br.

Marcelo de Souza Picanço

Docente da Universidade Federal do Pará. Doutor em Geologia e Geoquímica pela Universidade Federal do Pará

Alcebiades Negrão Macêdo

Docente da Universidade Federal do Pará. Doutor em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo (EESC/USP)

RESUMO

O concreto permeável é produzido eliminando a maioria ou todo o agregado miúdo na mistura, o que permite uma interconectividade dos poros na matriz endurecida, possibilitando que, a água de precipitação ou de outra fonte, drene livremente entre o concreto permeável. Pode ser utilizado para diversas finalidades como na pavimentação, estabilização de taludes e tratamento da água por remoção de poluentes. Neste estudo foram analisadas dezoito amostras de concreto permeável variando a granulometria, tamanho do agregado graúdo e relação água-cimento, para verificar o efeito na porosidade, massa específica, permeabilidade, resistência à compressão e tração na flexão. A utilização de agregado graúdo com tamanho único diminuiu as propriedades mecânicas e aumentou a porosidade e permeabilidade do concreto permeável. O aumento da relação água-cimento, melhora suas propriedades mecânicas, mas diminui a porosidade e permeabilidade.

Palavras-chave: Massa Específica. Permeabilidade. Resistência à Compressão. Resistência à Tração na Flexão.

ABSTRACT

Permeable concrete is produced by eliminating most or all of the small aggregate in the mixture, which allows pore interconnectivity in the hardened matrix, enabling water from precipitation or other source to drain freely between the permeable concrete. It can be used for various purposes such as paving, stabilization of slopes and treatment of water by removal of pollutants. In this study, eighteen samples of permeable concrete were analyzed, varying the granulometry, large aggregate size and water-cement ratio, to verify the effect on porosity, specific mass, permeability, compressive strength and flexural tensile strength. The use of single-size aggregate decreased the mechanical properties and increased porosity and permeability of permeable concrete. The increased water-cement ratio in the permeable concrete improves its mechanical properties and decreases porosity and permeability.

Keywords: Specific mass. Permeability. Resistance to Compression. Tensile Strength in Bending.

INTRODUÇÃO

O concreto permeável também conhecido como concreto poroso é um concreto que tem alta porosidade, pouco ou nenhum agregado miúdo e apresenta apenas pasta de cimento suficiente para revestir os agregados, enquanto preserva a interconectividade dos vazios, permitindo que a água drene livremente - ao contrário do concreto convencional. (SABNIS, 2015).

A utilização do concreto permeável leva a múltiplas vantagens como: reduzir as inundações controlando a quantidade de água escoada, recarrega o lençol freático, purifica a água, elimina os efeitos das ilhas de calor, melhora a segurança rodoviária devido a uma maior resistência ao deslizamento e pode ser utilizado como um sistema de estabilização de encostas (KIM, 2010; RAHMAN *et al.*, 2015).

A agência de Proteção ao Meio Ambiente (EPA – *Environmental Protection Agency*) exige que agências públicas e privadas forneçam soluções sustentáveis para diversos problemas associados à má administração do escoamento das águas pluviais e considera o uso de concreto permeável uma das melhores práticas de gerenciamento em seu manual de tecnologias para o controle de águas pluviais. Concretos permeáveis estão também sendo promovidos pelo sistema de classificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) da Green Building Council (KIA, 2017).

Devido à menor durabilidade e resistência do concreto permeável,

em relação ao concreto convencional, sua aplicação é limitada, porém muitas pesquisas têm sido conduzidas para melhorar seu desempenho e aumentar as suas aplicações (ZHONG, 2016).

A porosidade desempenha um papel importante nas propriedades do concreto permeável, onde o seu valor afeta as propriedades mecânicas e sua permeabilidade no estado endurecido. Uma maior porosidade garante um aumento na permeabilidade, mas suas propriedades mecânicas tendem a perder resistência (JOSHAGHANI *et al.*, 2015). Nestes casos deve-se buscar um equilíbrio entre as propriedades de permeabilidade e resistência, para que, o concreto permeável seja competitivo.

O objetivo deste estudo foi investigar as propriedades mecânicas e físicas do concreto permeável variando a granulometria, tamanho do agregado graúdo e a relação água-cimento.

CONCRETO PERMEÁVEL

O início da utilização do concreto permeável data da Europa pós-Segunda Guerra Mundial, a escassez no fornecimento de tijolos e outros materiais de construção no momento da enorme demanda por reconstrução levou ao aumento da aceitação do concreto permeável como um material de construção viável, pois o concreto permeável utiliza uma quantidade menor de cimento em relação ao concreto convencional (ALSHAREEDAH, 2021).

As Aplicações do concreto permeável incluem calçadas, estabilização de taludes, estacionamento,

pátios, borda de piscinas e pavimentação de vias de tráfego-leve. É considerado um material de construção sustentável, fácil de instalar, e pode ser produzido utilizando os mesmos materiais do concreto convencional (ACI, 2010).

Segunda Lamb (2014), já existem esforços, no Brasil, de fabricantes associados à cadeia do cimento em introduzir o material como alternativo para atender ao que as legislações municipais solicitam em relação à infiltração e à garantia de permeabilidade parcial durante o processo de pavimentação e ocupação de terrenos.

CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL.

O concreto permeável é um material com estrutura porosa interconectada, que varia na faixa de 15 a 25%. A relação água-cimento, sendo uma variável muito importante, é menor em comparação com as usadas na dosagem do concreto convencional, variando de 0,28 a 0,40. Normalmente, o volume de agregados no concreto permeável é de cerca de 50 a 65% em comparação com o concreto convencional, que é de cerca de 60 a 75%. A permeabilidade sendo uma função das propriedades dos poros varia na faixa de 0,1 - 5 cm/s (CHANDRAPPA, 2016).

Pesquisas anteriores mostram que a gradação, a granulometria do agregado e a proporção de massa do agregado para o cimento são os principais fatores que afetam a porosidade, a permeabilidade e a

resistência à compressão do concreto permeável (HUANG *et al.*, 2010).

O uso de agregados de menor tamanho pode aumentar o número de partículas de agregado por unidade de volume de concreto, a superfície específica do agregado e a área de ligação, o que eventualmente resulta em uma melhora na resistência do concreto permeável (SINGH, 2020).

MATERIAIS

A etapa em questão constituiu na escolha do tipo de cimento que foi utilizado nas dosagens e caracterização granulométrica do agregado gráudo.

CIMENTO

Para a formulação dos traços de concreto permeável foi utilizado o cimento CP-VARI RS, em conformidade com a NBR 5733/91.

AGREGADO

Como agregado gráudo foi utilizado pedra britada, de origem basáltica, com cinco gradações diferente: 2,36, 4,75, 6,30, 9,50 e 12,50 mm, cuja massa específica é de 2810 kg/m³ e massa unitária 1400 kg/m³, verificado a partir da NBR NM - 53: 2009. A análise granulométrica foi realizada de acordo com a NBR NM - 248:2003, sendo apresentada na Tabela 1 e sua curva granulométrica na Figura 1.

Com os dados obtidos na Figura 1 e Tabela 1, observa-se que o

agregado graúdo utilizado neste estudo possui coeficiente de uniformidade igual a 1,5. Segundo Lima e Silva (2010), o coeficiente de uniformidade do agregado deve estar entre 1,4

e 1,6, para proporcionar melhor permeabilidade do concreto permeável, evitando maiores riscos de perda de eficiência por entupimento.

Tabela 1. Análise Granulometria da pedra britada.

Abertura da Peneira (mm)	Material retido na peneira (g)	Material retido na peneira (%)
25	0,00	0,00
12,5	52,60	5,26
9,5	288,60	28,86
6,3	484,00	48,40
4,75	125,90	12,59
2,36	47,20	4,72
Fundo	1,70	0,17
Total	1000,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		12,50 mm

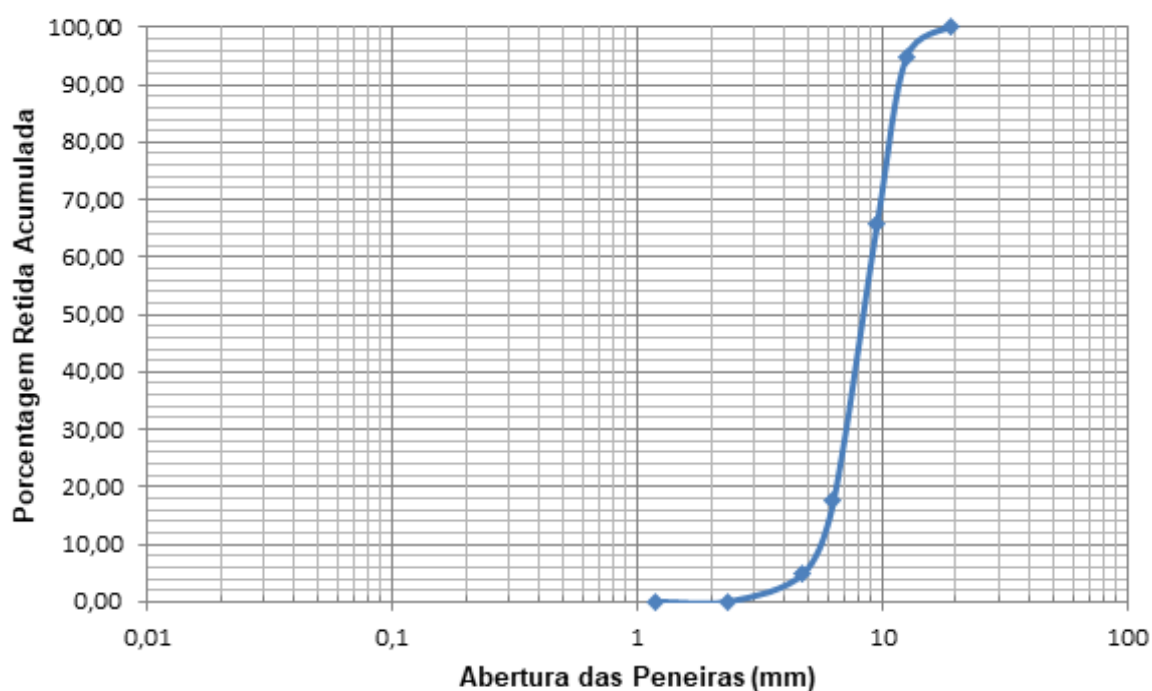


Figura 1. Curva Granulométrica da pedra britada.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente tópico visa discorrer a abordagem experimental do estudo, apresentando os tipos de corpos de prova utilizados, dosagens e metodologia dos ensaios realizados.

MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Foram preparados dois tipos de corpos de prova: cilíndricos e prismáticos. As moldagens dos corpos de prova cilíndricos foram executadas de acordo com a NBR 5738/2015 com

dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 centímetros de altura, sendo utilizados nos ensaios de permeabilidade e resistência à compressão, já os corpos de prova prismáticos foram confeccionados a partir das recomendações da NBR 16416/2016, com dimensões de 10 cm x 10 cm x 40 cm, sendo utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão.

DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL

Foram produzidos dezoito tipos de traços, as proporções experimentais detalhadas são fornecidas na Tabela 2. Três relações água-cimento (0,25, 0,30 e 0,35) foram utilizados para cobrir toda a gama de misturas utilizadas de acordo com o estudo de Chandrappa (2016). Este procedimento resultou em 108 corpos de prova para compressão (18 amostras x 6 repetições), rompidos aos 28 dias, 108 corpos de prova para tração na flexão (18 amostras x 6 corpos de prova) rompidos aos 28 dias e 108 corpos de prova para o cálculo da porosidade, massa específica e permeabilidade (18 amostras x 6 corpos de prova).

As amostras P1 a P3 apresentam granulometrias variando de 2,36 a 12,50 mm e P4 a P18 granulometria única, como mostrado na Tabela 3.

As proporções dos materiais utilizados em cada traço (Tabela 2) foram determinados para garantir o desempenho adequado do concreto permeável, obtendo uma boa cobertura de pasta envolvendo o agregado e uma melhor estabilidade. De acordo com Kia (2017), para garantir um desempenho adequado do concreto permeável, a relação ótima de água-cimento varia de 0,26 a 0,45 e, a relação agregado-cimento de 4 a 6.

A variação granulométrica observada em cada traço (Tabela 3), se faz necessária para analisar a influência do tamanho do agregado nas propriedades do concreto permeável. Para manter vazios suficientes no material, o concreto permeável é geralmente composto de tamanhos de agregados na faixa de 19 a 9,5 mm, no entanto, tem-se utilizado agregados graúdos de tamanho 9,5-2,36 mm com o objetivo principal de aumentar as propriedades de resistência (NGUYEN *et al.*, 2014).

Tabela 2. Proporção dos materiais nas amostras.

Traços	Cimento (kg/m³)	Agregado (kg/m³)	Água (kg/m³)	Traços	Cimento (kg/m³)	Agregado (kg/m³)	Água (kg/m³)
P01	1	3,00	0,25	P10	1	5,00	0,25
P02	1	4,00	0,30	P11	1	3,00	0,30
P03	1	5,00	0,35	P12	1	4,00	0,35
P04	1	3,00	0,25	P13	1	4,00	0,25
P05	1	4,00	0,30	P14	1	5,00	0,30
P06	1	5,00	0,35	P15	1	3,00	0,35
P07	1	4,00	0,25	P16	1	5,00	0,25
P08	1	5,00	0,30	P17	1	3,00	0,30
P09	1	3,00	0,35	P18	1	4,00	0,35

Tabela 2. Granulometria das amostras, em porcentagem.

Identificação das Amostras	Granulometria (mm)					Identificação das Amostras	Granulometria (mm)				
	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36		12,5	9,5	6,3	4,75	2,36
P01	5,26	28,86	48,4	12,59	4,72	P10	0	0	100	0	0
P02	5,26	28,86	48,4	12,59	4,72	P11	0	0	100	0	0
P03	5,26	28,86	48,4	12,59	4,72	P12	0	0	100	0	0
P04	100	0	0	0	0	P13	0	0	0	100	0
P05	100	0	0	0	0	P14	0	0	0	100	0
P06	100	0	0	0	0	P15	0	0	0	100	0
P07	0	100	0	0	0	P16	0	0	0	0	100
P08	0	100	0	0	0	P17	0	0	0	0	100
P09	0	100	0	0	0	P18	0	0	0	0	100

MÉTODOS DE ENSAIO

Para o cálculo da massa específica do concreto permeável, no estado fresco, foi considerado as informações de acordo com a NBR 9833/2008. A determinação da porosidade do concreto permeável foi calculada de acordo com Joshaghani *et al.* (2015), onde são medidos os índices de vazios abertos e fechados, a partir do cálculo do peso seco, saturado e submerso, do corpo de prova cilíndrico com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Na determinação da resistência à tração na flexão utilizou-se a NBR 12142/2010, onde os corpos de prova são submetidos a um esforço empregando o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão (Figura 2a).

A resistência a compressão foi determinada segundo a norma NBR

5739/2007. Cada corpo de prova foi posicionado na máquina de ensaio de modo que ficasse, rigorosamente, centrado em relação ao eixo de carregamento, que foi aplicado a uma velocidade de 2 mm/min. A resistência à compressão de cada corpo de prova foi calculada a partir da divisão da carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova (Figura 2b).

Para medir o coeficiente de permeabilidade utilizou-se o método descrito pela American Concrete Institute - ACI 522 R-10, que utiliza um permeâmetro de carga variável. Saturou-se o corpo-de-prova, antes do início do ensaio, e após isto, foram cronometrados os tempos para uma coluna de água descer da marca de 290 mm até 70 mm da superfície da amostra. O procedimento foi repetido três vezes e considerado o tempo médio (Figura 2c).

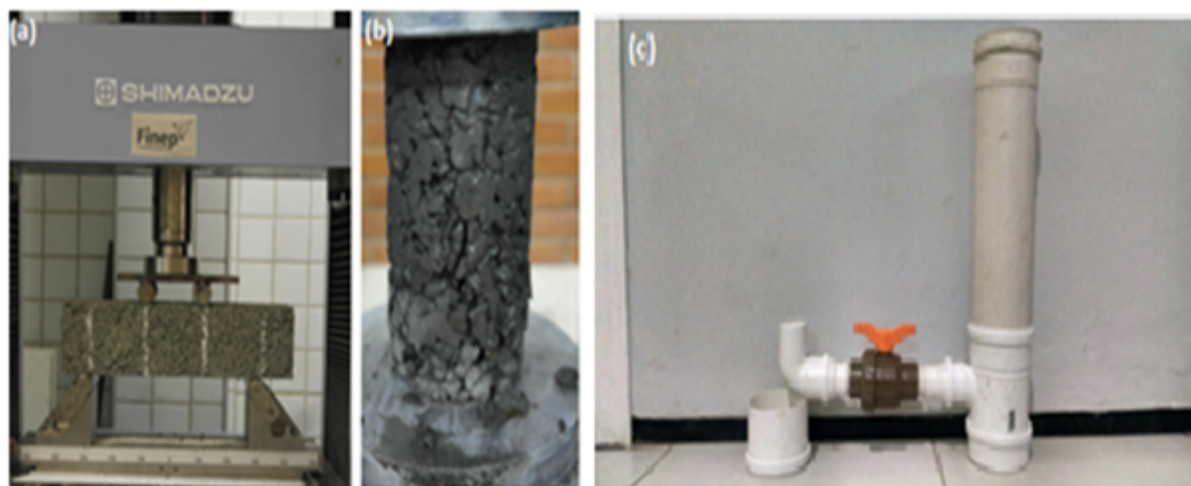


Figura 2. Realização do ensaio de Tração na flexão (a), Compressão (b) e Permeabilidade (c).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos nos ensaios foram tratados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA), para a verificação dos efeitos significativos em um nível de 95% de confiança, além do teste de comparações múltiplas de médias (Teste de Tukey), para verificação de quais médias apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA

Os valores médios da porosidade e massa específica obtidos neste estudo variam de 15,25% a 31,89% e 1565,53 kg/m³ a 2082,29 kg/m³, respectivamente, Figura 3. O coeficiente de determinação (R^2) obtido, igual a 0,97, indica que há boa correlação entre as variáveis envolvidas, ou seja, a porosidade exerce significativa influência na massa específica do concreto permeável.

Por meio da Figura 3, pode-se

observar ainda que a relação massa específica e porosidade está mais próxima ao limite inferior do gráfico, assemelhando-se aos concretos permeáveis que possuem na sua composição um agregado graúdo com granulometria única, o que implica em um valor mais baixo de massa específica. Meddah *et al.* (2017) verificaram que, dosagens de concreto permeável, com agregados graúdos de granulometria variada apresentam uma maior massa específica, devido a uma maior compactação.

Com relação aos resultados de massa específica, observa-se que foram na ordem de 25% inferiores a valores característicos de concretos convencionais, que variando de 2.400 a 2.500 kg/m³. Tanto a porosidade quanto a massa específica do concreto permeável dependem dos tipos de materiais utilizados na mistura, do procedimento empregado para compactação e adensamento do concreto. Além disso, estes são parâmetros essenciais no estudo desse tipo de material, uma vez que os parâmetros de maior importância para projeto, como resistência mecânica e permeabilidade,

estão intimamente ligados a porosidade do concreto permeável (BATEZINI, 2015).

O efeito da graduação e tamanho do agregado graúdo em relação a porosidade e massa específica é mostrado na Figura 4. As amostras P3 e P4 obtiveram a maior e menor massa específica, respectivamente, em relação as 18 amostras analisadas neste estudo. Isso indicou que o aumento da granulometria dos agregados graúdos,

com uma menor relação água-cimento, ofereceu mais resistência à compactação, o que diminuiu a massa específica e aumentou a porosidade, que de acordo com Ibrahim et. al. (2014) à medida que a relação cimento-agregado aumenta, o volume de vazio intragranular reduz devido à diminuição da resistência na compactação oferecida pela quantidade reduzida de agregados, o que evidenciou-se com os teste realizados.

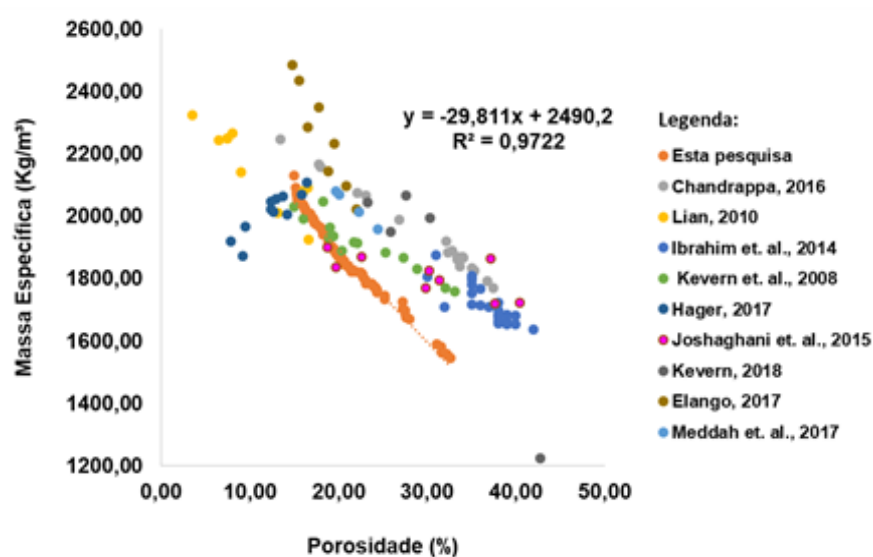


Figura 3. Relação entre Porosidade e Massa Específica.

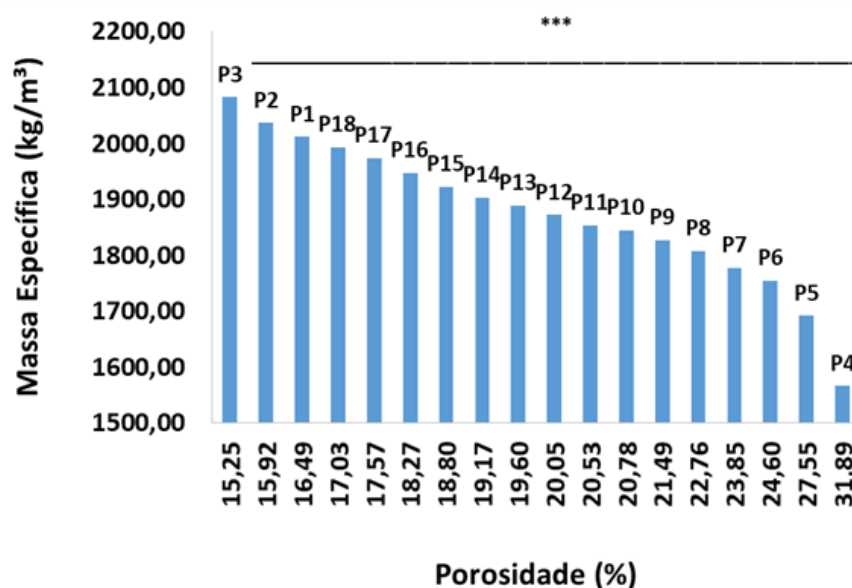


Figura 4. Média da Porosidade em relação a Massa Específica.

*** Diferença estatística significativa pelo teste Tukey $p < 0,001$.

As misturas que possuíam na sua composição granulometria variada (P1 a P3), apresentaram as maiores massas específicas devido ao fato que, os vazios gerados pelos agregados com maiores granulometrias (12,5 mm), pode ter sido suficiente para acomodar os agregados menores (4,75 e 2,36 mm), resultando em um maior fator de compactação, que já fora constatado por Ibrahim *et. al.* (2014) onde os valores de massa específica, obtidos em diferentes relações água-cimento são funções do método de compactação e do grau de lubrificação da amostra.

PERMEABILIDADE

Observa-se que os valores médios de permeabilidade obtidos neste estudo variam de 0,74 a 18,68 mm/s. Estes valores se apresentam dentro da faixa de valores obtidos pela grande maioria dos autores que testaram esse parâmetro em concretos permeáveis (Figura 5). O coeficiente de determinação (R^2) obtido, igual a 0,91, indica que há boa correlação entre as variáveis envolvidas, ou seja, a porosidade exerce significativa influência na permeabilidade do concreto permeável.

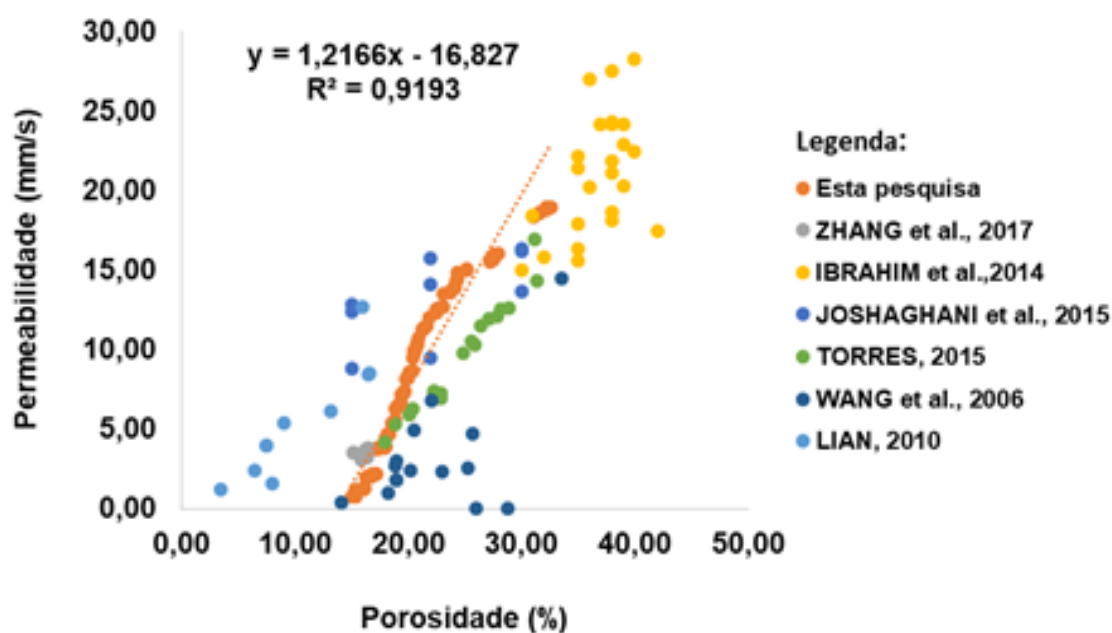


Figura 5. Relação entre Porosidade e Permeabilidade.

O efeito da relação água-cimento na permeabilidade é mostrado na Figura 6. À medida que a relação água-cimento (considerada dentro deste estudo) aumentou, o grau de lubrificação nas misturas de concreto permeável aumentou, o que ajudou a

uma melhor compactação da mistura e, portanto, resultou em uma menor permeabilidade. Com uma relação água-cimento inferior, isto é, 0,25, o teor reduzido de água tornou a mistura menos trabalhável, resultando em maior porosidade e permeabilidade.

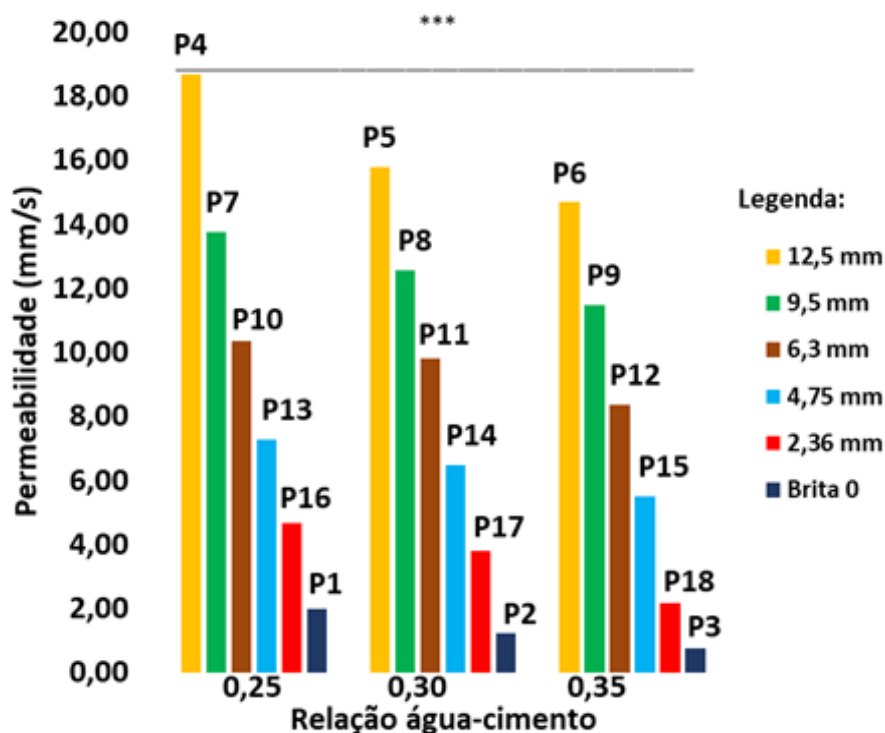


Figura 6. Efeito da relação água-cimento na Permeabilidade.

*** Diferença estatística significativa pelo teste Tukey $p < 0,001$.

A permeabilidade das misturas que apresentam, em sua composição, agregados graúdos com tamanho único (P4 a P18), atingiram uma taxa acima do recomendado pela norma ACI 522R-10, onde estabelece um valor mínimo de 1mm/s para concretos permeáveis. Neptune (2010) verificou em seu estudo sobre o efeito do tamanho do agregado graúdo nas misturas de concreto permeável que, os maiores valores de permeabilidade eram obtidos nas dosagens que possuíam agregados graúdos de tamanho único.

As misturas de concreto permeável que utilizaram na sua composição agregados graúdos com dimensões de 12,5, 9,5 e 6,3 mm (P4 a P12), obtiveram uma maior permeabilidade devido à menor área superficial dos agregados. Não foi observado, na mistura, pasta de

cimento em excesso que pudesse obstruir os poros do concreto permeável. As amostras com agregados graúdos com dimensões de 4,75 e 2,36 mm (P13 a P18) possuíam uma maior área superficial de agregados, diminuindo a porosidade e permeabilidade, mas observou-se e pasta de cimento suficiente apenas para revesti-los.

As amostras P1, P2 e P3, composta de agregados de tamanho que variam de 2,36 a 12,5 mm, apresentam uma maior compactação, requerendo-se mais pasta de cimento para revestir os agregados. Chandrappa (2016), verificou que, concretos permeáveis que contem em sua composição agregado graúdo com graduação variável, necessitam de maiores quantidades de pasta de cimento para revestir os agregados, com isso, apresentam uma

menor permeabilidade, pois uma parte desta pasta de cimento preenche os vazios intragranulares, reduzindo a porosidade. Isso foi evidenciado na amostra P3, onde a permeabilidade ficou abaixo da especificação da norma ACI 522R-10.

De acordo com Kia (2017), a permeabilidade de concretos permeáveis está relacionada a porosidade do material, uma vez que quanto maior a porosidade maior será a sua permeabilidade. Ainda neste contexto, o procedimento de compactação deve ser selecionado e aplicado com cuidado, uma vez que, mesmo o material possuindo elevada porosidade, a utilização de um procedimento inadequado de compactação pode causar a redução

da interconectividade entre os poros, prejudicando a capacidade permeável do material.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os valores médios da resistência à compressão obtidos neste estudo variaram de 9,55 a 22,17 MPa. Estes valores se apresentam dentro da faixa de valores obtidos pela grande maioria dos autores que testaram esse parâmetro em concretos permeáveis (Figura 7). O coeficiente de determinação (R^2) obtido, igual a 0,97, indica que há boa correlação entre as variáveis envolvidas, ou seja, a porosidade exerce significativa influência na resistência à compressão

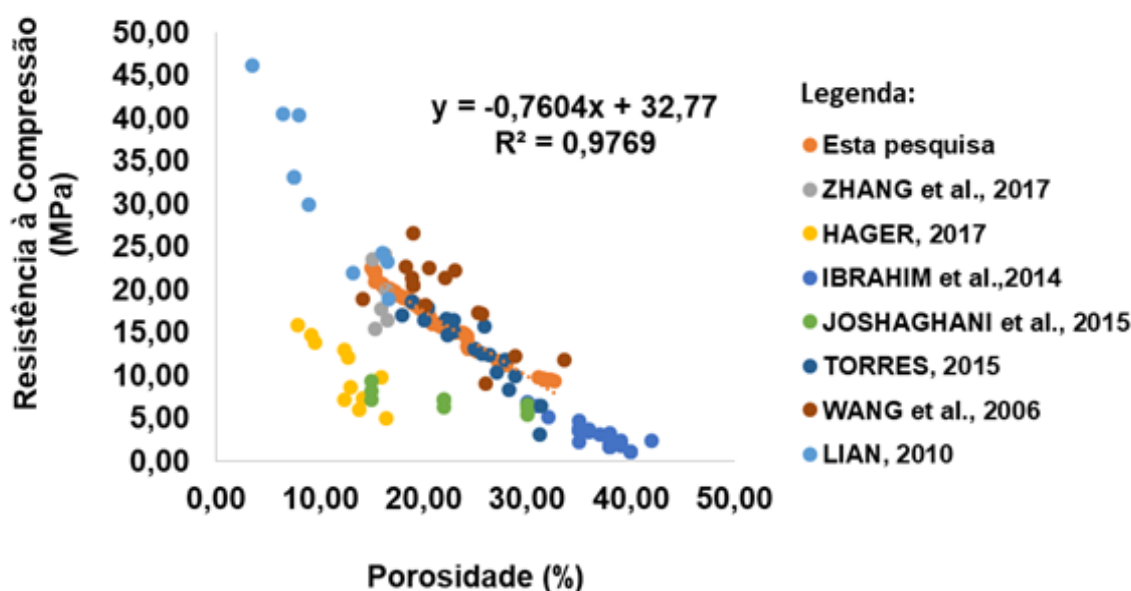


Figura 7. Relação entre Porosidade e Resistência à Compressão.

do concreto permeável.

As variações da resistência à compressão em relação à água-cimento são apresentadas na Figura 8. Observou-se que a mistura P3

com relação água-cimento de 0,35 e granulometria variada produziu a maior média de resistência à compressão após 28 dias de cura (22,17 MPa). Quando a relação água-cimento foi

inferior a 0,35, para um mesmo tamanho de agregado graúdo, a resistência à compressão diminuiu em todas as amostras analisadas. A mistura P4

com relação água-cimento de 0,25 e agregado graúdo unido de 12,5 mm produziu a menor média de resistência à compressão de 9,55 MPa aos 28 dias.

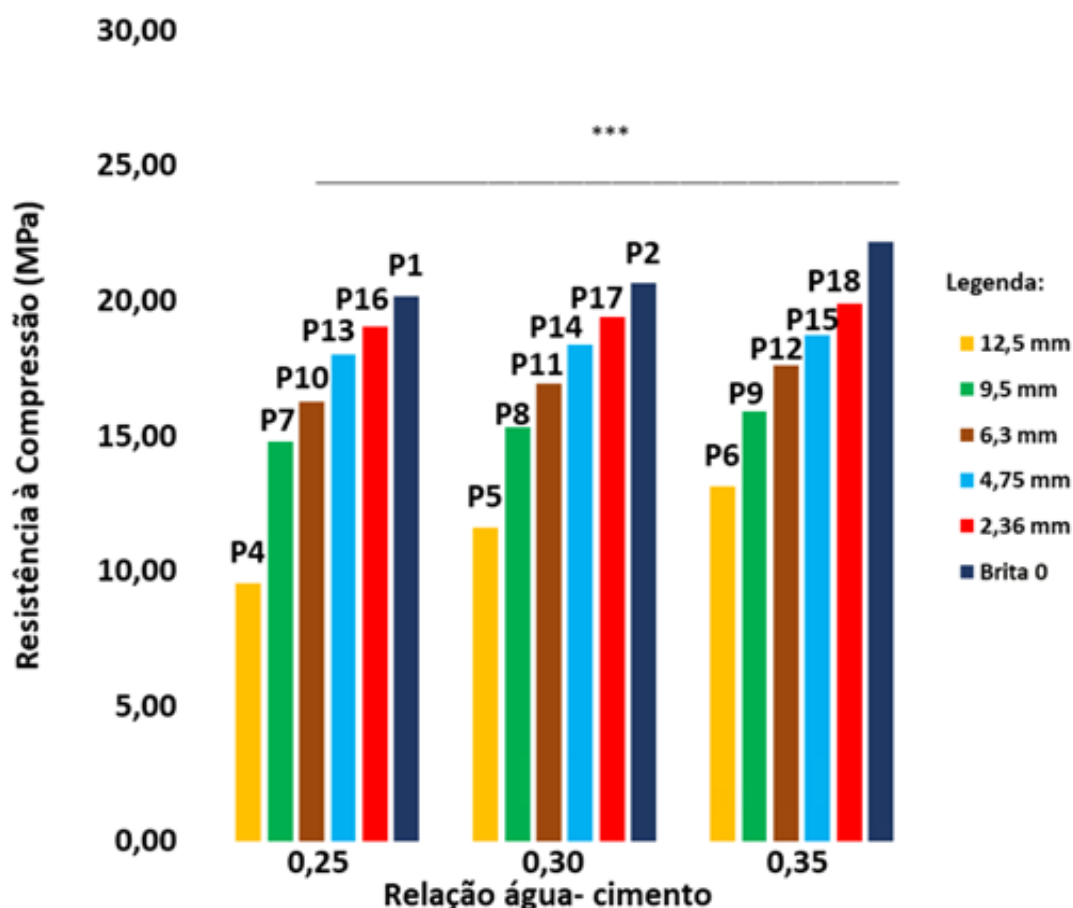


Figura 8. Efeito da relação água/cimento na Resistência à Compressão.
*** Diferença estatística significativa pelo teste Tukey $p < 0,001$.

Yeih *et. al.* (2015) estudaram a utilização de escórias do forno de arco elétrico como agregado para o concreto permeável e verificaram que, a menor resistência à compressão foi registrada para a mistura produzida a partir de um único tipo de agregado, com dimensão de 12,5 mm e a relação água-cimento que garantiu uma maior resistência nas amostras foi de 0,35, corroborando com o estudo atual.

A Figura 9 apresenta a relação

entre tamanho do agregado e resistência a compressão. À medida que o tamanho do agregado aumenta, a resistência a compressão diminui, isso mostra uma forte relação entre resistência à compressão e o tamanho do agregado. O concreto permeável que possui, em sua mistura, um agregado com maior granulometria, apresenta uma redução de massa específica, e uma menor área de contato entre os agregados, o que leva à redução da resistência do concreto permeável.

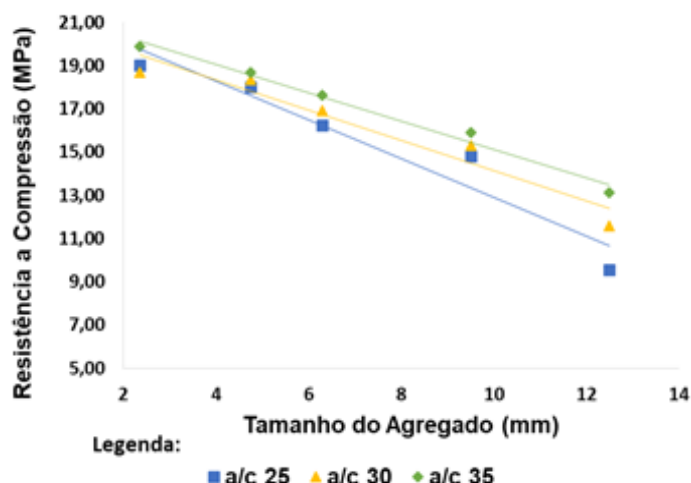


Figura 9. Influência do tamanho do agregado na Resistência à Compressão do Concreto Permeável.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Observa-se que os valores médios de resistência à tração na flexão obtidos neste estudo variam de 1,22 a 4,82 MPa. Estes valores se apresentam dentro da faixa de valores obtidos pelos autores que

testaram esse parâmetro em concretos permeáveis (Figura 10). O coeficiente de determinação (R^2) obtido, igual a 0,80, indica que há boa correlação entre as variáveis envolvidas, ou seja, a porosidade exerce significativa influência na resistência à tração na flexão do concreto permeável.

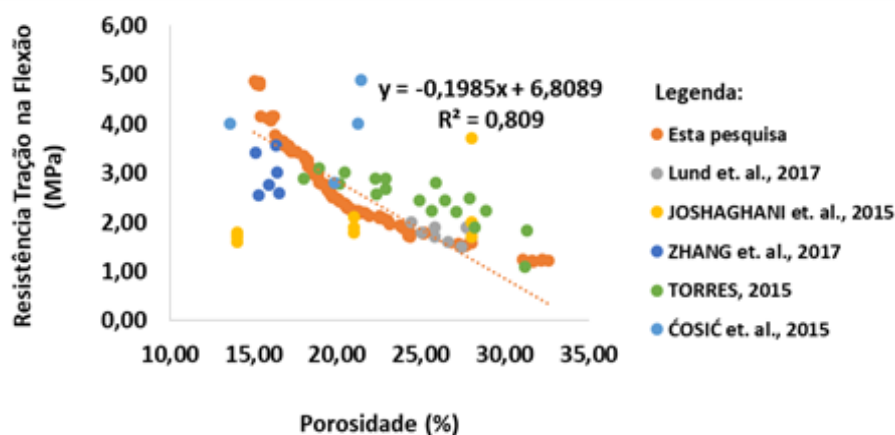


Figura 10. Relação entre Porosidade e Resistência à Tração na Flexão.

As variações da resistência à tração na flexão em relação à água-cimento são apresentadas na Figura 11. Observa-se que o tamanho do agregado tem efeito na resistência à tração na flexão em todos os tipos de amostras analisadas. A mistura P3, utilizando na

sua composição agregados graúdos variando de 2,26 a 12,5 mm, atinge a máxima média de resistência à tração na flexão de 4,82 MPa correspondente à menor porosidade e um fator água-cimento de 0,35. No entanto, a mistura P4 que possui um tamanho único de

agregado de 12,5 mm possui a menor média de resistência à tração na flexão

de 1,22 MPa devido à maior porosidade e a um fator água cimento de 0,25.

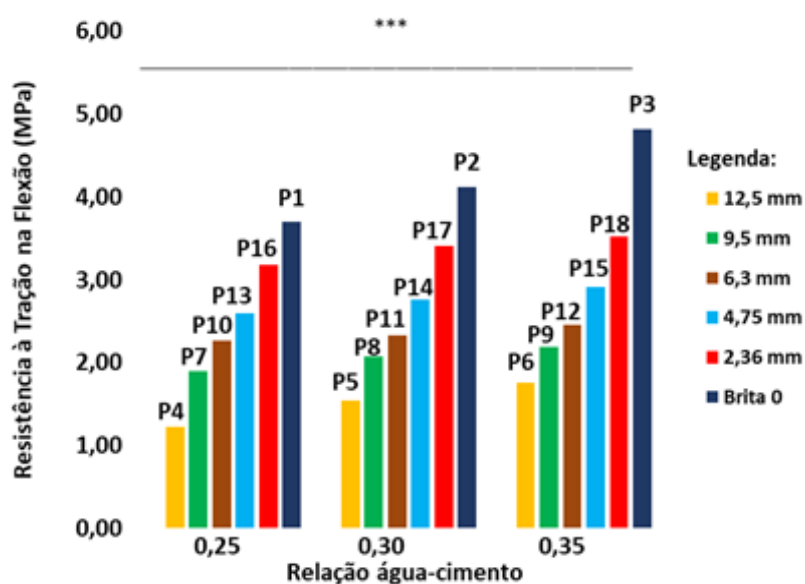


Figura 11. Efeito da relação água-cimento na Resistência Tração na Flexão.

*** Diferença estatística significativa pelo teste Tukey $p < 0,001$.

Brake (2016) estudou a resistência a tração na flexão em concretos permeáveis e constatou que a granulometria do agregado graúdo e a relação água-cimento afeta de forma significativa a sua resistência. O tamanho maior dos agregados e uma menor relação água-cimento resulta em diminuir a massa específica do concreto permeável. Portanto, as forças de contato entre os agregados tornam-se mais fracas, o que leva à redução da resistência do concreto permeável. Joshaghani (2015) constatou que o concreto permeável que contém em sua composição agregados graúdos com tamanhos únicos, apresentaram uma redução na resistência a tração na flexão à medida que o tamanho do agregado graúdo aumentava.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa estudou dezoito tipos de amostras de concreto permeável, variando a granulometria, tamanho do agregado graúdo e relação água-cimento. As investigações experimentais incluíram a determinação da porosidade, massa específica, permeabilidade, resistência à compressão e tração na flexão. Com base nos resultados apresentados conclui-se que:

- Com o aumento da granulometria do agregado graúdo, nas misturas contendo tamanho único de agregado, ocorre um aumento no valor da porosidade, permeabilidade e uma redução na massa específica, resistência à compressão e tração na flexão;
- As amostras que possuem granulometria variada, devido uma maior compactação, a um aumento na massa específica, resistência à

compressão, resistência a tração na flexão e uma diminuição na permeabilidade e porosidade;

(c) À medida que a relação água-cimento, considerada neste estudo, aumentou, ocorreu uma melhor compactação das amostras, diminuindo a permeabilidade e porosidade e aumentando a massa específica, resistência à compressão e tração na flexão;

(d) O aumento da relação água-cimento melhora a compactação do concreto permeável, ocorrendo um maior preenchimento dos vazios intragranular reduzindo a porosidade e prejudicando a permeabilidade;

(e) Pelo teste estatístico ANOVA e Tukey a variação na granulometria, tamanho do agregado graúdo e relação água-cimento, influenciaram significativamente, com um nível de confiança de 95%, a massa específica, porosidade, resistência à compressão, resistência a tração e permeabilidade do concreto permeável.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Pervious Concrete** (ACI 522-10) and commentary.

ALSHAREEDAH, O; NASSIRI, S. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125095,

2021.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Estudo da Condutividade Hidráulica com Carga Constante e Variável em Concretos Permeáveis. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 8, n. 3, 2015.

BRAKE, N. A.; ALLAHDADI, H.; ADAM, F. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 536-543, 2016.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627-637, 2016.

ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, 78, 69-76.

ELANGO, K. S.; REVATHI, V. Fal-G Pasta de concreto permeável. **Construção e Materiais de Construção**, v. 140, p. 91-99, 2017.

HAGER, A.; DURHAM, S. A.; RENS, K. **Sustainable design of pervious concrete pavement systems**. 2017.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Laboratory

evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete.

Construction and Building Materials, 24(5), 818-823. 2010.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and building materials**, 50, 524-529. 2014.

JOSHAGHANI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; ATAEI, O.; GOLROO, A. Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. **Construction and Building Materials**, 101, 317-325 2015.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T. Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability. **Journal of ASTM International**, 5(2), 1-12, 2008.

KEVERN, J. T.; NOWASELL, Q. C. Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 229-235, 2018.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

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, n. 7, p. 607-615, 2010.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete—an experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2664-2671, 2010.

LIMA JUNIOR, J. A.; SILVA, A. L. P. Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade de areia utilizada em filtros empregados no sistema de irrigação. **Enciclopédia biosfera, centro científico conhecer**, v. 6, N 11, 2010.

LUND, M. S.; KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; HANSEN, K. K. Mix design for improved strength and freeze-thaw durability of pervious concrete fill in Pearl-Chain Bridges. **Materials and Structures**, 50(1), 1-15, 2017.

MEDDAH, M. S.; AL-JABRI, K.; HAGO, A. W.; AL-HINAI, A. S. Effect of granular fraction combinations on pervious concrete performance. **Materials**

Today: **Proceedings**, 4(9), 9700-9704, 2017.

MEHTA, P. K.; CONCRETO, P. J. M. **Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

NBR 12142. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

NBR NM- 248. **Agregados – determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

NBR 16416. **Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 5733. **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

NBR 5738. **Concreto-Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2015.

NBR 5739. **Concreto -Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

NBR 9833. **Concreto fresco – determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

NBR NM- 53. **Agregado graúdo -**

Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

NEPTUNE, A. I.; PUTMAN, B. J. Effect of aggregate size and gradation on pervious concrete mixtures. **ACI Materials Journal**, 107(6), 625, 2010.

NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, 73, 271-282, 2014.

RAHMAN, M. A.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. **Journal of Cleaner Production**, 90, 183-194, 2015.

SABNIS, G. M. (Ed.). **Green building with concrete: sustainable design and construction**. CRC Press, 2015.

SINGH, A.; SAMPATH, P. V.; BILIGIRI, K. P. A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 120491, 2020.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A.

The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850-859, 2015.

WANG, K.; SCHAEFER, V. R.; KEVERN, J. T.; SULEIMAN, M. T. Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete. In **NRMCA concrete technology forum: focus on pervious concrete** (pp. 1-12). Nashville, 2006.

YEIH, W.; Fu, T. C.; CHANG, J. J.; HUANG, R. (2015). Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, 93, 737-745.

ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; YAN, C.; LIU, Y. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, 135, 112-118, 2017.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 177-187, 2016.