



Influência do empacotamento e do teor de agregados nas propriedades de concretos permeáveis de cimento Portland

G. Macioski^{a†}, N. T. A. Soto^a, M. H. F. Medeiros^a, L. C. Janh^b, F. G. R. de Oliveira^b

^a Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Curitiba - Brasil

^b Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Civil, Campo Mourão – Brasil

† Autor para correspondência: gmacioski@gmail.com

RESUMO

A desordenada expansão urbana traz consigo o aumento da impermeabilização da superfície do solo por meio de construções de edifícios, ruas e calçadas de forma a afetar o ciclo hidrológico. Uma alternativa para minimizar esse problema é a construção de pavimentos com concreto permeável, que auxilia na recuperação da capacidade de infiltração do solo. Este estudo tem como objetivo estudar a influência do empacotamento e do teor dos agregados nas propriedades do concreto permeável de cimento Portland utilizado como camada de revestimento em pavimentos permeáveis. A caracterização do concreto foi realizada em amostras cilíndricas pelos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, índices de vazios, massa específica, módulo de elasticidade dinâmico e condutividade hidráulica de carga variável (permeabilidade). A partir dos resultados obtidos foi possível observar a influência do empacotamento na resistência mecânica e na permeabilidade das amostras. Observou-se que o uso de um menor teor de agregados com baixo grau de empacotamento proporciona um melhor desempenho nos concretos permeáveis.

1. Introdução

A urbanização das grandes cidades traz consigo a crescente impermeabilização da superfície do solo, por meio da construção de edifícios com calçadas impermeáveis ligados por ruas pavimentadas, portanto, com uma interferência humana no ciclo hidrológico. Além disso, a demanda por vias de tráfego asfaltadas levou à ocupação de grande parte da superfície das cidades com materiais impermeáveis, como o concreto asfáltico e o concreto de cimento Portland (Höltz, 2011).

Agra (2001) defende que a ocupação urbana com áreas impermeáveis como telhados, ruas, estacionamentos e passeios também altera as características de volume e qualidade do ciclo hidrológico. Como a drenagem da água através do solo é prejudicada pela ação antrópica, o escoamento e o retorno ao lençol freático da água tornam-se mais difíceis, resultando em alagamentos e enxurradas.

Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) mostram que as ações públicas para as soluções desses problemas no Brasil estão voltadas, na maioria das vezes, somente para as medidas estruturais. As soluções geralmente encontradas têm sido a construção de redes de drenagem, que simplesmente transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia, sem que se avaliem os reais benefícios da obra.

Uma das alternativas para reduzir estes impactos é a utilização de concretos permeáveis, que podem ser utilizados como cobertura para pavimentos em via de pedestres, estacionamentos e para tráfego de veículos leves. Ao mesmo tempo que permitem a infiltração da água no solo,

concretos permeáveis colaboram com a diminuição das superfícies impermeabilizadas na cidade. Marchioni e Silva (2001) afirmam ainda que pavimentos permeáveis podem reduzir o escoamento superficial em até 100%, dependendo da intensidade da chuva, e ainda retardam a chegada da água ao subleito com redução da erosão do solo.

Concreto permeável pode ser definido como um tipo de concreto com alto índice de vazios interligados, preparado com pouca ou nenhuma areia, o que permite a passagem desobstruída de grandes quantidades de água. Com quantidades controladas de água e cimento é possível formar um espesso revestimento em torno das partículas de agregado graúdo do concreto permeável, assim, criam-se muitos vazios interligados, que deixam a peça permeável (Pieralisi, Cavalaro E Aguado, 2016).

Desta forma, o concreto permeável é uma das alternativas que auxilia na recuperação da capacidade de infiltração do solo que é perdida devido ao avanço das áreas urbanas (Polastre E Santos, 2006). A alta permeabilidade é uma das principais razões pelo qual o concreto permeável é investigado e produzido nos dias atuais. Quando o concreto permeável é utilizado em pavimentação externa, a água da chuva pode infiltrar diretamente no solo, com diminuição do escoamento superficial que segue para o sistema de drenagem urbano.

De acordo com Höltz (2011) existem diferenças significativas entre o concreto permeável e o pavimento asfaltado também do ponto de vista da segurança viária. Após uma chuva, por exemplo, o asfalto se mantém escorregadio com a água da chuva, enquanto que a superfície do concreto permeável se mantém inalterada. Este material pode ainda ser produzido com agregados reciclados, e diversos estudos recentes têm buscado metodologias que permitam avaliar a influência da pasta destes agregados nas propriedades dos concretos permeáveis confeccionados (Liu *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2019; Yap *et al.*, 2019).

Para controlar a impermeabilização das superfícies nas grandes cidades, é comum as prefeituras exigirem que uma parcela do terreno seja mantida livre de cobertura impermeável, esta parcela varia entre 15% a 30% da área do terreno. Porém, nem sempre é possível atender este requisito. Para Marchioni e Silva (2001) uma forma de conseguir atender a legislação da cidade e ao mesmo tempo manter a área útil do terreno é com a utilização de pavimentos permeáveis. Além de apresentar boas características na solução da impermeabilização, o concreto permeável ainda possui uma série de aplicações e benefícios. Huffman (2005) considera que o concreto permeável adequadamente dosado deve apresentar baixa densidade, ser permeável e apresentar boa capacidade estrutural, tendo assim uma grande gama de aplicações. Além disso suas características são interessantes às áreas urbanas pelo ganho ambiental e econômico, onde é elevado o valor da terra (Polastre E Santos, 2006).

Entretanto este tipo de material também possui desvantagens, pois há sempre a possibilidade de colmatção dos poros e constantes gastos com a manutenção e limpeza do concreto permeável (Virgiliis, 2009). Nas considerações de Baptista, Nascimento e Barraud (2011), a colmatção de uma estrutura de infiltração faz com que o meio poroso perca através do tempo sua capacidade de condutividade hidráulica de maneira lenta e progressiva. A longo prazo, a infiltração de águas pluviais na estrutura pode tornar-se nula, uma vez que o sistema perde sua função drenante e passa a comportar-se como estrutura impermeável ou de retenção sem exutório. Assim, a colmatção está diretamente ligada à vida útil do pavimento ou do meio poroso (Haselbach, Valavala E Montes, 2006)

Pavimentos permeáveis podem ser executados em concreto asfáltico, concreto de cimento Portland ou concreto geopolimérico (Tho-In *et al.*, 2012). Concretos permeáveis asfálticos possuem seu método de dosagem mais consolidado e possuem diversos registros de aplicação como no Japão, Chile, Estados Unidos e Europa. Enquanto que o uso de concretos permeáveis de cimento Portland e geopoliméricos ainda é insipiente. Destaca-se ainda que os métodos de

dosagem, mistura e avaliação destes materiais são diferentes e, por este motivo, necessitam de estudos específicos.

No Brasil, a primeira medida para incentivar sua pesquisa e aplicação foi a criação em 2012 de uma certificação da Prefeitura do Rio de Janeiro para incentivar empresas a utilizarem pavimentos permeáveis. Em 2013, São Paulo realizou uma especificação técnica sobre uso, aplicação e produção do asfalto poroso. Em agosto de 2015, a Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) publicou a norma NBR 16416:2015, contendo requisitos mínimos para pavimentos permeáveis de concreto, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos mínimos para pavimentos permeáveis de concreto.

Tipo de revestimento	Tipo de Solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (mpa)	Coefficiente de permeabilidade (m/s)
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0^a$	$> 10^{-3}$
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0^a$	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$	
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	

a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781 (2013)

b determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805 (2015)

c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142 (2010)

Fonte: ABNT NBR 16416:2015

Ainda assim, há necessidade de estudos mais aprofundados na aplicação de concretos permeáveis de cimento Portland, a fim de caracterizá-lo e normalizá-lo de maneira mais adequada. Além disso, o número de publicações e metodologias para a aplicação deste material é escasso, dificultando sua execução e aplicação (Batezini, 2013). Outro problema é a falta de métodos específicos de dosagem e moldagem desse material, assim, o processo de execução e análise de resultados são afetados. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é avaliar as propriedades de concretos permeáveis de cimento Portland dosados com diferentes empacotamentos e teores de agregados.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

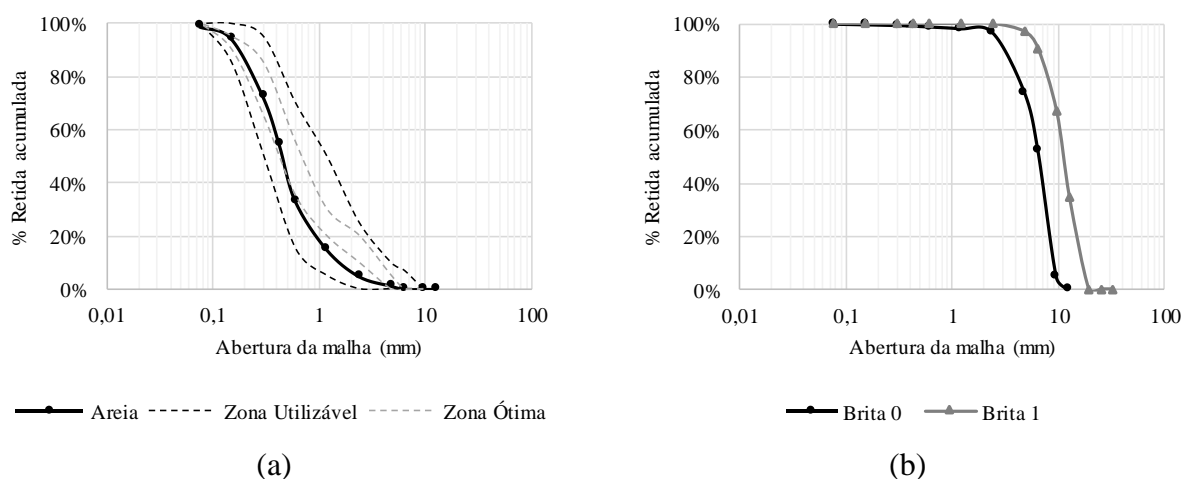
Para a mistura dos concretos foi utilizado cimento Portland CPV-ARI, agregado miúdo natural e agregados graúdos graníticos (brita 0 e brita 1). Não foi feito o uso de adições minerais ou aditivos nas misturas. A Tabela 2 apresenta a caracterização física dos agregados utilizados na pesquisa e a Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo (a) e dos agregados graúdos (b). Na Figura 1(a) é possível observar ainda que o agregado miúdo apresenta a maior parte de sua distribuição granulométrica dentro da zona ótima de utilização para concretos, conforme especificado pela ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 2 - Caracterização física dos agregados.

Ensaio	Normativa	Areia	Brita 0	Brita 1
Massa específica	NBR NM 52:2009 NBR NM 53:2009	$2,73 \pm 0,17 \text{ g/cm}^3$	$2,621 \pm 0,042 \text{ g/cm}^3$	$2,615 \pm 0,061 \text{ g/cm}^3$
Massa unitária	NBR NM 45:2006	$1,526 \pm 0,012 \text{ g/cm}^3$	$1,424 \pm 0,028 \text{ g/cm}^3$	$1,3886 \pm 0,0065 \text{ g/cm}^3$
Absorção	NBR NM 53:2009 NBR NM 30:2003	$0,55 \pm 0,15\%$	$0,55 \pm 0,22\%$	$0,269 \pm 0,55\%$
Material Pulverulento	NBR NM 46:2003	$1,97 \pm 0,36\%$	$1,23 \pm 1,52\%$	$0,65 \pm 0,10\%$
Granulometria	NBR NM 248:2013	a D.M.C = 4,75mm b M.F = 2,6058	a D.M.C = 9,5mm b M.F = 0,6527	a D.M.C = 19mm b M.F = 1,6381

a D.M.C - dimensão máxima característica

b M.F - módulo de finura

**Figura 1** - Distribuição granulométrica dos agregados.

2.2. Dosagem e moldagem do concreto

De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004), concretos permeáveis de cimento Portland apresentam relação a/c dentro de uma pequena faixa (0,27 a 0,34) visando a manutenção de uma resistência mínima. Uma vez que o teor de água da mistura pode ser facilmente ajustado com o uso de aditivos superplastificantes, nesta pesquisa a relação água/cimento (a/c) foi mantida fixa para priorizar a análise da influência dos agregados e suas quantidades na avaliação dos parâmetros de permeabilidade e resistência.

Optou-se por analisar 6 diferentes traços, resultantes da combinação de uma relação água/cimento (a/c) em massa de 0,30, com relações de cimento:agregado (m) de: 1:4 e 1:5. Este intervalo de teores de agregados é apresentado pela ACI 522R-10 e por Hölztz (2011) como ideais para a produção de concretos permeáveis.

Foram consideradas as variações dos agregados da seguinte forma: 100% brita 1, 100% brita 0 e a mistura de 95% de brita 0 com 5% de areia. Huang et al. (2010) indicam que uma adição de uma pequena quantidade de agregado miúdo auxilia no desempenho mecânico de concretos porosos. A partir das distribuições granulométricas dos materiais foi possível o cálculo

do coeficiente de distribuição do empacotamento “q”, utilizando o modelo aprimorado por Funk e Dinger, conforme Equação 1 (FUNK E DINGER, 2013).

$$CPFT(\%) = 100 \cdot \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (1)$$

No qual: $CPFT(\%)$ é porcentagem acumulada de partículas menores que D ; D é o diâmetro da partícula; D_{min} é o diâmetro da menor partícula; D_{max} é o diâmetro da maior partícula; q é o coeficiente de distribuição. No modelo de empacotamento de partículas, valores de coeficiente de distribuição “q” próximos de 0,37 geram a máxima densidade de empacotamento e, portanto, um menor teor de vazios na amostra (Hermann, 2016). Assim, quanto menor o tamanho dos agregados, menor foi o valor do coeficiente de distribuição obtido nas composições, indicando assim um melhor empacotamento da composição. Ainda assim, as composições de concretos apresentaram coeficientes de distribuição de 1,93, 1,39 e 1,01, respectivamente, devido ao alto índice de vazios das composições. Os consumos de materiais e os coeficientes de distribuição dos agregados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Traços de concreto avaliados.

Traço	Agregados		Consumo de materiais (kg/m ³)				
	Teor (m)	Coefficiente (q)	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Água
m4q1,93	4	1,93	481,68	-	-	1926,73	144,50
m4q1,39		1,39	481,68	-	1926,73	-	144,50
m4q1,01		1,01	481,68	96,34	1830,39	-	144,50
m5q1,93	5	1,93	409,98	-	-	2049,88	122,99
m5q1,39		1,39	409,98	-	2049,88	-	122,99
m5q1,01		1,01	409,98	102,49	1947,39	-	122,99

Para a mistura dos concretos foi utilizado o procedimento proposto por Schaefer et al. (2006). O procedimento consiste em adicionar a quantidade total de agregado na betoneira com 5% do peso total do cimento; misturar por 1 minuto; adicionar o restante do cimento juntamente com a água; misturar por mais 3 minutos; deixar a mistura em repouso por 3 minutos; misturar por mais 2 minutos.

Para a avaliação do concreto permeável, foram produzidos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100x200mm. O método de adensamento do concreto para os corpos de prova foi baseado na ABNT NBR 5738:2003 e nos estudos de Suleiman et al. (2006). Assim, o procedimento de moldagem foi realizado em três camadas, com 15 adensamentos por amostra, e posterior vibração do corpo de prova por 10 segundos a uma frequência de 16 Hz. Todos os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas, e mantidos em cura até a idade de realização dos ensaios. Para cada ensaio foram avaliadas 4 amostras cilíndricas e todos os ensaios foram realizados aos 28 dias.

2.3. Propriedades avaliadas

O ensaio de compressão axial foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 em uma máquina de ensaios universal (PC200, EMIC). Em virtude das irregularidades dos topos dos corpos de prova, foram utilizados discos de neoprene para auxiliar na distribuição de tensões. O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR

7222:2011 em uma prensa hidráulica (DL 30 000, EMIC).

A fim de se obter parâmetros de comparação com a norma de pavimentos permeáveis de concreto - ABNT NBR 16416:2015 - que especifica ensaios em amostras prismáticas, os resultados das amostras cilíndricas neste estudo foram corrigidos. A resistência à compressão foi ajustada pela relação diâmetro/altura de acordo com a ABNT NBR 7680:2015, e a resistência à tração foi ajustada pelo modelo de Hammitt (1971).

Os ensaios para a determinação do índice de vazios e da densidade no estado endurecido tiveram como base a norma ABNT NBR 9778:2005. A determinação do módulo elástico dinâmico longitudinal das amostras foi realizada via técnica de excitação por impulso (SONELASTIC), a partir da determinação da frequência ressonante longitudinal, com adoção das prescrições da ASTM C215:2008. Para a realização dos ensaios de permeabilidade foi utilizado o método baseado no trabalho de Neithalath et al. (2003), como apresentado na Figura 2.



Figura 2 - Aparelho para medição da condutividade hidráulica (Neithalath *et al.*, 2003).

Este método de ensaio envolve a colocação de uma amostra saturada de concreto permeável, dentro de um tubo de acrílico com diâmetro levemente superior ao do corpo de prova. Outro tubo é usado para formar um reservatório sobre o corpo de prova. A ligação do tubo superior com a amostra deve ser selada de tal modo que se possa garantir que só haverá fluxo pelo próprio concreto. A amostra de concreto permeável é envolta a uma manga ou faixa látex, para evitar o fluxo lateral ao longo de sua altura.

Para realização do ensaio é adicionada uma coluna de água na parte superior do corpo de prova, que percola pelo mesmo atravessando os tubos até a saída. Durante o ensaio, deve ser medido o tempo que a coluna de água demora a percolar entre dois pontos da coluna de água. O registro de esfera é utilizado para controlar o início e o final do fluxo de água. Com estes dados é calculado o coeficiente de permeabilidade por meio da Equação 2 (Montes E Haselbach, 2003).

$$k = \frac{A_1 L}{A_2 t} \cdot \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2)$$

Na equação, k é o coeficiente de permeabilidade (cm/s); A_1 é a área da seção transversal da amostra (cm²); L é o comprimento da amostra cilíndrica (cm); A_2 é a área da seção transversal do tubo (cm²); t é o tempo decorrido de escoamento entre h_1 e h_2 (s); h_1 é a altura inicial da

lamina d'água (cm); e h_2 é a altura final da lamina d'água (cm).

3. Resultados e discussão

3.1. Resistência mecânica e módulo elástico

Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios à resistência de compressão e à tração das amostras de concreto permeável (com valores corrigidos), bem como os valores do módulo elástico dinâmico das amostras.

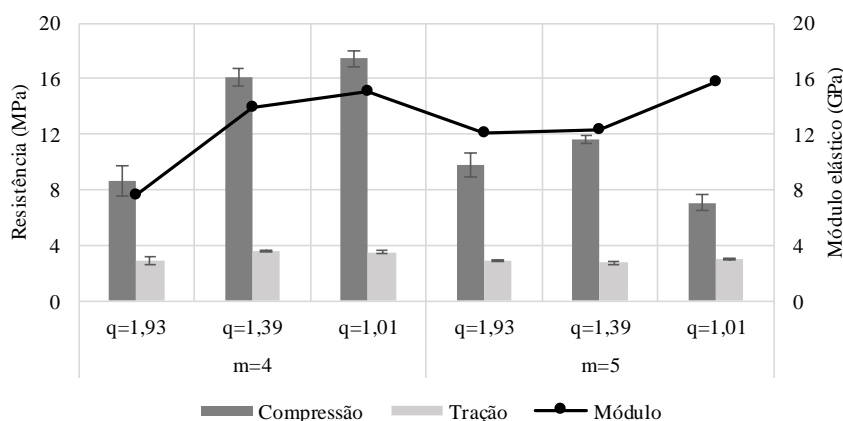


Figura 3 - Resistência de compressão, tração e módulo elástico das amostras de concreto.

Após análise multivariada de dois fatores (ANOVA) a um nível de significância de 95% foi possível comprovar que o teor de agregado (m) e o coeficiente de empacotamento (q) influenciaram nos resultados de resistência à compressão ($p < 0,0001$ para ambas variáveis).

Após comparação múltipla de médias, pelo método de Tuckey, foi possível observar que para um teor de agregados $m=4$ apenas a amostra de coeficiente de distribuição $q=1,93$ apresentou queda significativa de resistência quando comparado aos outros resultados (-46%). Para $m=5$ não foram observadas diferenças estatisticamente significativas para as amostras de $q=1,93$ e $q=1,39$. Desta forma, as amostras que apresentaram melhor desempenho mecânico à compressão foram $m4-q1,39$ e $m4-q1,01$. Assim, a redução no teor de agregado nas amostras se mostrou benéfica (aumento médio de 48% na resistência). Quanto ao coeficiente de empacotamento, o valor de $q=1,39$ propiciou bom desempenho nas amostras mesmo com maiores teores de agregados ($m=5$), garantindo a permeabilidade, e mantendo um contato mínimo entre os sólidos.

Os resultados obtidos encontram-se dentro do intervalo observado por Delatte e Cleary (2006) que obtiveram resistências à compressão que variam entre 4,1 e 55,8 MPa para esse tipo de material. Como pode ser observado na Figura 3, o valor máximo de resistência mecânica foi de 16,87 MPa, que é abaixo do valor mínimo de 20MPa especificado pela ABNT NBR 16416:2015. Isso se deve ao alto índice de vazios característico das misturas estudadas. A redução da relação água/cimento com utilização de aditivos superplastificantes ou ainda o refinamento do empacotamento de partículas com agregados ou adições minerais poderia influenciar na redução dos vazios que acarretaria no aumento da resistência mecânica com redução da permeabilidade (Yang E Jiang, 2003).

Quanto aos resultados de tração, apenas o teor de agregado exerceu influência nos resultados ($p=0,0117$), com redução de 16% na resistência das amostras quando aumentado. É possível verificar que os valores corrigidos de resistência à tração variam de 2,62 a 3,66 MPa.

Estes valores obtidos estão todos de acordo com a norma brasileira de concreto permeável ABNT NBR 16416:2015, a qual exige que a resistência mínima para concretos permeáveis moldados no local seja maior ou igual a 2 MPa, conforme indicado na Tabela 1. Destaca-se que a resistência à tração é uma das propriedades mais importantes relacionadas à resistência de pavimentos, uma vez que os esforços nestas peças possuem uma solicitação maior na tração (Pitta, 1998).

No que diz respeito ao módulo elástico, observa-se que os módulos de elasticidade dinâmicos variam entre 9,83 e 14,50 GPa. Estes resultados se encontram abaixo dos valores de módulo de elasticidade de concretos convencionais, que são na ordem de 30 a 45 GPa (Barbosa *et al*, 2015; Barbosa E Almeida Filho, 2015). Após análise multivariada (ANOVA), comprovou-se que o coeficiente de empacotamento influenciou os resultados do módulo dinâmico, e que houve diferença estatisticamente significativa (teste Tukey) para os três valores de q . Portanto, a variação do empacotamento gerou aumento de até 57% no módulo elástico dos concretos permeáveis avaliados.

De acordo com Santos *et al.* (2013), o que determina o comportamento elástico do concreto são a fração volumétrica, a densidade e o módulo de elasticidade dos principais componentes. Uma vez que a densidade é inversamente proporcional à porosidade, a densidade das misturas e a variação no teor de agregado nos traços possivelmente causaram as variações observadas no módulo elástico.

Além disso, os valores obtidos neste trabalho ficaram próximos ao valor encontrado por Vidal (2014) onde o módulo de elasticidade para o concreto permeável estudado apresentou o valor de 12,61 GPa. Um menor módulo de elasticidade possui o benefício de auxílio na absorção acústica, por aumentar o amortecimento das ondas mecânicas proveniente dos veículos. Em se tratando da aplicação deste material em vias de transporte automobilístico, a estrutura aberta do concreto permeável promove uma diferença no tempo de chegada e de reflexão das ondas sonoras oriundas da movimentação dos veículos sobre o pavimento. Esta diferença diminui o nível de ruído, logo, o pavimento absorve parte deste ruído proveniente do tráfego (Neithalath *et al*, 2003).

3.2. Índices físicos

Com relação aos resultados de massa específica, absorção de água e índice de vazios, é possível observar uma considerável variação entre as amostras avaliadas, como apresentado na Figura 4.

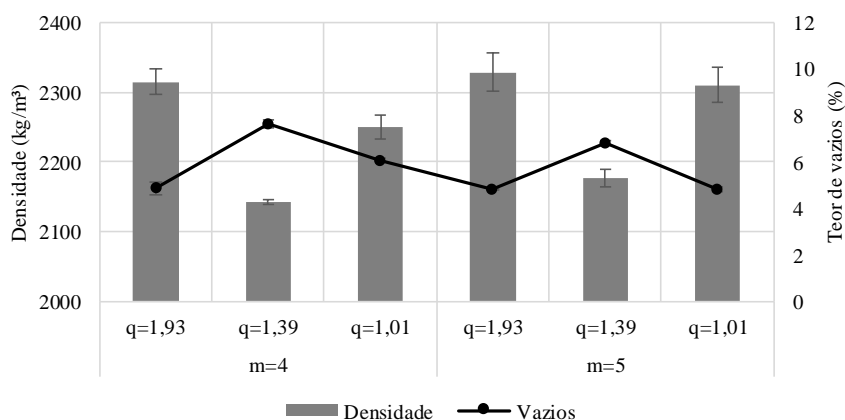


Figura 4 - Índices físicos dos concretos.

De acordo com Hölztz (2011), normalmente encontram-se em concretos permeáveis densidades na ordem de 1,60 g/cm³ a 2,00 g/cm³. Observa-se que os resultados de massa

específica aparente seca ficaram todos acima dos valores encontrados por este autor.

Conseqüentemente, os resultados dos índices de vazios apresentaram-se abaixo dos valores previstos, como os sugeridos pela ACI 522R-10, que normalmente variam entre 15 a 25% de vazios. Na Figura 4 percebe-se que mais de 80% dos resultados obtidos apresentaram valores inferiores a 15%, exceto pelo traço m-4q1,93 que chegou ao valor de 16,52%. Sabe-se que a estrutura de poros influencia diretamente no desempenho mecânico do concreto permeável (Deo E Neithalath, 2010)

Destaca-se que tanto a massa específica aparente seca quanto o índice de vazios dependem diretamente dos tipos de materiais utilizados e do procedimento empregado para a compactação e adensamento do concreto. Uma possível causa para a alteração verificada nos valores pode ser um excesso de vibração ou utilização de uma frequência inadequada.

Ainda é possível verificar que os traços com $q=1,39$ obtiveram melhores resultados, com baixos valores de massa específica seca ($2,14 \text{ g/cm}^3$) e altos índices de vazios (16,52%) ficando assim mais próximos aos indicados pela bibliografia pesquisada. Os resultados obtidos para os traços com $q=1,93$ apresentaram resultados desfavoráveis, com massas específicas altas e baixos índices de vazios. Ressalta-se que após análise multivariada (ANOVA) a um nível de significância de 95%, as variáveis m e q influenciaram nos resultados obtidos para massa específica e índice de vazios.

3.3. Permeabilidade

A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de permeabilidade. Observa-se que os valores médios de permeabilidade obtidos nos ensaios variam de 0,34 cm/s a 1,27 cm/s. Estes valores se encontram dentro da faixa de valores obtidos pela maioria dos autores que testaram a permeabilidade de concretos permeáveis, como Scharfer *et al.* (2006) que considera aceitáveis valores entre 0,01 cm/s e 1,5 cm/s.

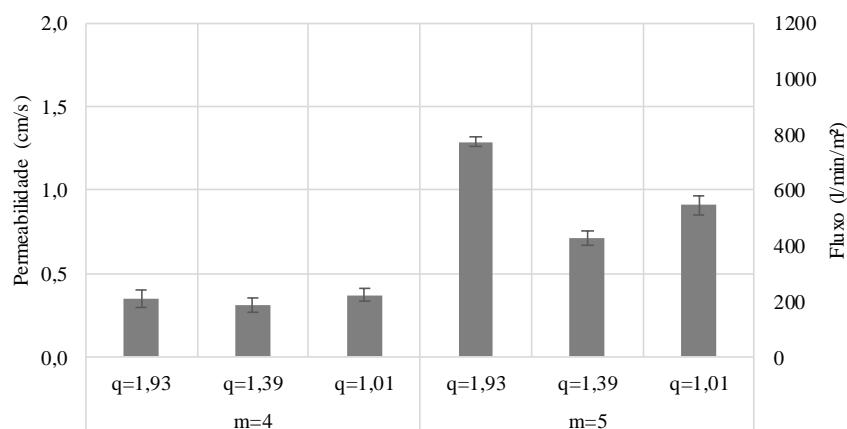


Figura 5 - Coeficientes de permeabilidade e fluxo.

Após análise multivariada, foi possível comprovar que as variáveis teor de agregado (m) e coeficiente de distribuição (q) influenciam nos resultados de permeabilidade obtidos, e que existe interação entre as duas variáveis. Contudo, após comparação múltipla de médias, observou-se que não houveram diferenças significativas para nenhuma amostra quando $m=4$, e, quando $m=5$, apenas a amostra com $q=1,93$ apresentou aumento na permeabilidade. Desta forma, pode-se afirmar que o empacotamento “ q ” influencia nos resultados se $m=5$, ou seja, neste teor de agregados o empacotamento passa a influenciar nos resultados de permeabilidade do concreto.

A ACI 522R-10 prevê que o fluxo para concreto permeável com proporções típicas deverá

estar na faixa de 81 a 730 l/min/m². Ao analisar a Figura 5, em relação ao fluxo é possível perceber que quase todos os valores se enquadram dentro da faixa indicada, exceto pelo traço m5q1,93 que apresenta fluxo superior à faixa indicada pela norma. Assim, apesar da resistência à compressão não atingir resistência indicada por norma, conseguiu-se obter uma permeabilidade dentro do limite permitido.

Todos os resultados de permeabilidade obtidos estão de acordo com a norma brasileira de concreto permeável ABNT NBR 16416:2015, a qual exige que a permeabilidade mínima seja maior que 0,001 m/s como indicado na Tabela 1.

A média dos coeficientes de permeabilidade foi elevada, com valor cinco vezes maior que o mínimo indicado pela norma de concreto permeável. Contudo, tendo em vista a proximidade dos valores obtidos com demais autores, é possível que a atual norma subestime a permeabilidade dos concretos produzidos.

3.4. Correlações

A Figura 6 mostra as correlações obtidas entre as propriedades do estado endurecido em função do empacotamento dos agregados.

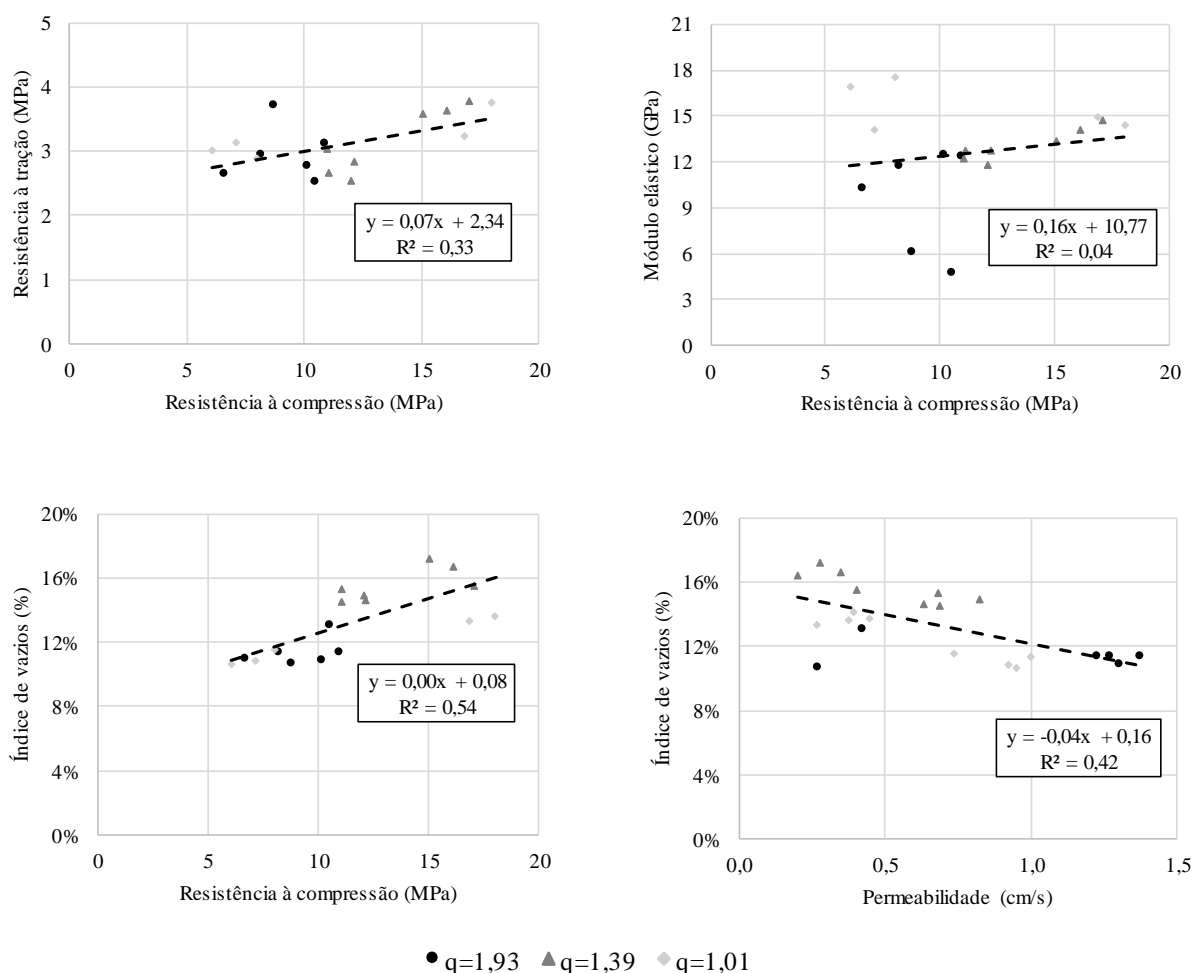


Figura 6 - Correlações entre os resultados.

É possível observar que, de forma genérica, os traços de concreto permeável avaliados apresentaram correlações fracas ($R^2 < 0,5$), de acordo com Cargnelutti Filho e Storck (2010). Este é um indício de que este tipo de compósito apresenta variações de suas propriedades de forma

única, e não segue os modelos preditivos elaborados para materiais homogêneos ou concretos convencionais. Por isso ressalta-se a importância de estudar as propriedades desse tipo de concreto para entender seu comportamento e a influência das variáveis de dosagem nas propriedades do estado fresco e endurecido deste material.

4. Conclusão

Os ensaios e as análises realizadas permitiram verificar a influência do empacotamento (coeficiente de distribuição) e teor de agregados nas características do concreto permeável no estado endurecido. Após a realização deste estudo foi possível obter as seguintes conclusões:

- o teor de agregado (m) e o coeficiente de distribuição do empacotamento (q) mostraram influência significativa nos resultados de resistência à compressão; sendo que as amostras m4q1,01 e m4q1,39 apresentaram melhor desempenho mecânico, fato devido ao menor teor de agregados e menores coeficientes de empacotamento;
- os valores encontrados para massa específica foram acima dos encontrados na literatura para concretos permeáveis. De forma correlata, os valores para índice de vazios ficaram abaixo do esperado. O coeficiente de empacotamento de 1,39 foi o que apresentou os resultados mais próximos do esperado;
- apesar da discrepância encontrada nos resultados de massa específica e índice de vazios, todos os traços de concreto permeável analisados apresentaram permeabilidade coerentes com as encontradas por outros autores e dentro do estipulado pela norma brasileira, bem como fluxo dentro do exigido pela ACI 522R-10 – com exceção do traço m5q1,93, que apresentou fluxo acima do estabelecido;
- a variação do coeficiente de empacotamento e do teor de agregados resultou em influência significativa nos resultados de resistência à compressão, massa específica, índice de vazios, densidade e permeabilidade. Nos resultados de resistência à tração apenas o teor de agregados mostrou-se significativo e no módulo de elasticidade dinâmico apenas o coeficiente de empacotamento apresentou influência.
- não foi possível estabelecer correlações fortes entre as propriedades estudadas, o que pode evidenciar um comportamento distinto dos já conhecidos em concretos convencionais. Desta forma não é possível estimar os valores de algumas propriedades em função dos resultados obtidos com boa precisão.

Referências

- Agra, S. G. Estudo experimental de microrreservatórios para controle do escoamento superficial. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.
- American Concrete Institute. ACI 522R-10 - Previous Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2010.
- American Society For Testing And Materials. C215-08, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. 2008.
- Araújo, P. R.; Tucci, C. E. M.; Goldenfum, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 5 n.3, p. 21-29. 2000.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 12142 - Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro. 2010.

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15805 - Pisos elevados de placas de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro. 2015.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 16416 - Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro. 2015.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5738 - Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7211:2009 – Agregados para concretos – Especificação. Rio de Janeiro. 2009.
- 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.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7680 - Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão. Rio de Janeiro. 2015.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 1987.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 9781 - Peças de Concreto para Pavimentação. Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro. 2013.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2003.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2009.
- Baptista, M.; Nascimento, N.; Barraud, S., *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*, Porto Alegre: ABRH. 2011.
- Barbosa, R. A., Alvarenga, R. C. S. S., Junior, A. N. C., Ferreira, R. T. L., Rodrigues, L. M., Castro, L. O., Garcia, R. B., Santos, W. J. Análise comparativa de métodos de obtenção do módulo de elasticidade para concreto preparado com areias natural e artificial. *Ciência & Engenharia*, v. 24(1), p. 151-161. 2015
- Barboza, L. S., Almeida Filho, F. M. Estudo sobre a redução do consumo de cimento e emissão de CO₂ para concreto de alto desempenho. *Ciência & Engenharia*, v. 24(2), p. 131-141. 2015.
- Batezini, R. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. 2013.
- Cargnelutti Filho, A.; Storck, L. Medidas do grau de precisão experimental em ensaios de competição de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44(2), p. 111-117. 2010.
- Delatte, N. J.; Cleary, J. Developing a structural design method for pervious concrete pavement. *Proceedings, National Stone, Sand and Gravel Association*. 2006.

- Deo, O.; Neithalath, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. *Materials Science and Engineering: A*, v. 528(1), p. 402–412. 2010.
- Funk, J. E.; Dinger, D. R. Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing. *Springer Science & Business Media*. 2013.
- Hammit, G.M. II. Concrete strength relationships. US Army Corps of Engineers, *Waterways Experiment Station*, Vicksburg. 1971.
- Haselbach, L. M.; Valavala, S.; Montes, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of Environmental Management*, v. 81(1), p. 42–49. 2006.
- Hermann, A. Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibro compactados. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.
- Höltz, F. C. Uso De Concreto Permeável Na Drenagem Urbana: Análise De Viabilidade Técnica E De Impacto Ambiental. *Dissertação de mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.
- Huang, B.; Wu, H.; Shu, X.; Burdette, E. G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 24(5), p. 818–823. 2010.
- Huffman, D. Understanding pervious concrete. *Construction Specifier*, v. 58(12), p. 42. 2005.
- Liu, T.; Wang, Z.; Zou, D.; Zhou, A.; Du, J. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and Concrete Research*, 122, p. 72–82. 2019.
- Lu, J.-X.; Yan, X.; He, P.; Poon, C. S. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*. 2019.
- Marchioni, M. S.; Silva, C. O. Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas. São Paulo, *Associação Brasileira de Cimento Portland*. 2011.
- Montes, F.; Haselbach, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. *Environmental Engineering Science*, v. 23(6), p. 960–969. 2006.
- Neithalath, N.; Olek, J.; Weiss, W. J.; Marolf, A.; Sell, E.; Thornton, W. D. Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. *Final Report*, The institute for Safe, Quiet, and Durable Higways. 2003.
- Pieralisi, R.; Cavalaro, S. H. P.; Aguado, A. Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Research*, 90, p. 6–18. 2016.
- Pitta, M. R. Dimensionamento de Pavimentos de Concreto. *Associação Brasileira de Concreto Portland*: São Paulo. 1998.
- Polastre, B.; Santos, L.D. Concreto Permeável – Impermeabilização Do Solo E Drenagem Urbana. *Trabalho de conclusão de curso*. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. 2006.
- Santos, A. M.; Cabral, L. M. C.; Monteiro, E. B.; Helene, P. R. L. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. *Congresso Brasileiro do concreto*. Gramado-RS. 2013.
- Schaefer, V.; Wang, K.; Suleiman, M.; Kevern, J. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. *Final Report*, Civil Engineering, Iowa State University. 2006.
- Suleiman, M. T., Kevern, J., Schaefer, V. R., Wang, K. Effect of compaction energy on pervious concrete properties. Concrete Technology Forum-Focus on Pervious Concrete, *National Ready Mix Concrete Association*, Nashville, TN. 2006.
- Tennis, P.D.; Leming, M.L.; Akers, D.J. Pervious Concrete Pavements, *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois. 2004.

- Tho-In, T.; Sata, V.; Chindaprasirt, P.; Jaturapitakkul, C. Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 30, p. 366–371. 2012.
- Vidal, A. S. Caracterização de concreto permeável produzido com resíduos de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014.
- Virgiliis, A. L. C. Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. *Dissertação de mestrado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2009.
- Yang, J.; Jiang, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, v. 33(3), p. 381–386. 2003.
- Yap, S. P.; Chen, P. Z. C.; Goh, Y.; Ibrahim, H. A.; Mo, K. H.; Yuen, C. W. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 181, p. 155–165. 2018.