



Influência da reprodutibilidade da granulometria dos agregados em concreto permeável para revestimento de pavimentos permeáveis

Influence of the aggregates granulometry reproducibility in pervious concrete coating permeable pavements

DOI: 10.55905/oelv21n9-018

Recebimento dos originais: 03/08/2023

Aceitação para publicação: 04/09/2023

Bruna Carls

Doutora em Engenharia Ambiental

Instituição: Fundação Universidade Regional de Blumenau

Endereço: Rua São Paulo, 3250, Itoupava Seca, Blumenau - SC, CEP: 89030-000

E-mail: bruna.carls@gmail.com

Ivone Gohr Pinheiro

Doutora em Física e Química Ambiental pelo Instituto Nacional Polytechnique de Toulouse

Instituição: Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB)

Endereço: Rua Antonio da Veiga, 140 Victor Konder, Blumenau - SC, CEP: 89010-971

E-mail: ivonegp@furb.br

Abraão Bernardo Rohden

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituição: Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB)

Endereço: Rua São Paulo, 3250, Itoupava Seca, Blumenau – SC, CEP: 89030-000

E-mail: abrcivil@gmail.com

RESUMO

A crescente impermeabilização do solo em áreas urbanas resulta no aumento do escoamento de águas pluviais que podem causar inundações urbanas. Pavimentos permeáveis podem mitigar esses impactos, pois sua estrutura permite a percolação e o armazenamento do escoamento superficial, sendo que o concreto permeável tem se destacado como camada de revestimento. Este trabalho buscou verificar a reprodutibilidade dos métodos de dosagem de concreto permeável do American Concrete Institute (ACI) e de Nguyen et al. em relação ao agregado disponível no mercado brasileiro de construção civil. Compararam-se propriedades mecânicas, coeficiente de permeabilidade e porosidade total do concreto permeável dosado pelos dois métodos, tanto com agregados ajustados a cada método e quanto com agregados disponíveis no mercado nacional. Os dois métodos de dosagem, com ambas as granulometrias, atingiram os limites mínimos normativos brasileiros de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e coeficiente de permeabilidade. Portanto, qualquer uma das misturas

pode contribuir para o sistema de drenagem urbana, pois mostraram equilíbrio entre resistência e coeficiente de permeabilidade quando se utilizou material comercial disponível. Entretanto, o método de Nguyen et al. apresentou resultados melhores no teste de desgaste por abrasão e impacto, indicando maior potencial de durabilidade do revestimento.

Palavras-chave: concreto permeável, reprodutibilidade, granulometria, método de dosagem.

ABSTRACT

Increasing soil sealing in urban areas results in higher stormwater runoff that can cause urban flooding. Permeable pavements can mitigate such impacts, as their structure allows percolation and storage of surface runoff, and therefore pervious concrete pavements are in high demand. This work aimed to verify the reproducibility of the pervious concrete dosage methods of the American Concrete Institute (ACI) and Nguyen et al. in relation to the aggregate available on the Brazilian civil construction market. The mechanical properties, permeability coefficient and total porosity of pervious concrete dosed by the two methods were compared both with aggregates particle sizes adjusted to each method and with aggregates available in the domestic market. The two dosage methods, with both granulometries, reached the minimum Brazilian normative limits for compressive strength, flexural strength and permeability coefficient. Thus, any of the mixtures can contribute to the urban drainage system, as they presented a balance between strength and permeability when commercially available material was used. However, the Nguyen et al. provided better results in the abrasion and impact wear test, indicating greater potential of the coating durability.

Keywords: pervious concrete, reproducibility, granulometry, dosage method.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil sofre, por conta de uma rápida urbanização, com altas taxas de impermeabilização do solo e infraestruturas deficientes (SEIDL et al., 2020). Sem o devido planejamento, essa urbanização gera diversos impactos negativos ao meio ambiente, podendo-se destacar a diminuição da capacidade de infiltração de água no solo, por conta da impermeabilização dos grandes centros urbanos, o que acaba por prejudicar o reabastecimento dos recursos hídricos, além de aumentar a velocidade de escoamento da água, acarretando em um acúmulo de resíduos nos sistemas de drenagem pluviais, provocando assim sua obstrução, que por sua vez resulta em alagamentos (SANTOS; RUFINO; FILHO, 2017). Os alagamentos geram danos econômicos e sociais devido à

falta de estrutura, planejamento e ocupação de áreas vulneráveis, resultando em desabrigados e vítimas (SILVEIRA; DIAS; SCHUCH, 2014).

Torna-se necessário, então, o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que contribuam de forma positiva no sentido de reverter esta situação (MEDEIROS; AFONSO, 2017). O pavimento permeável é uma alternativa, pois permite a percolação do volume ou parte do volume de água do escoamento superficial através de sua estrutura porosa (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a). Mesmo com algumas restrições quanto às áreas de aplicação devido a sua resistência mecânica, o pavimento permeável pode ser amplamente utilizado, como, por exemplo, em estradas com tráfego leve, estacionamentos, calçadas e parques (JIANG et al., 2015; LUCK et al., 2008; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; YU et al., 2019).

Importante destacar que um pavimento permeável não se trata apenas de um revestimento permeável, mas conforme estabelece a NBR 16416 (ABNT, 2015a, p. 2) um pavimento permeável é um “pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporários de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura”. Um pavimento permeável possui um revestimento na superfície, seguido de uma camada de base (normalmente brita), subleito e em alguns casos há uma tubulação drenante antes da camada de subleito (SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007; MARCHIONI; SILVIA, 2011). Eles podem ter vários tipos de revestimento, entre eles o concreto permeável que tem a capacidade de drenar a água do escoamento superficial além de filtrá-la, absorver ruídos de veículos, e controlar a temperatura e umidade do ambiente (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010; NGUYEN et al., 2014; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; YANG; JIANG, 2003).

Uma questão importante em relação ao concreto permeável diz respeito às especificações de seu método de dosagem, pois diferentes estudos apontam diferentes métodos de dosagem que geralmente não são comparáveis (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016b; KANT SAHDEO et al., 2020). Pode-se citar alguns métodos de dosagem como o do American Concrete Institute (ACI) (2010), método de Nguyen et al. (2014), método

de Zheng, Chen e Wang (2012) e o método de Taguchi (JOSHAGHANI et al., 2015). Dentre eles destaca-se o método do ACI (2010) e de Nguyen et al. (2014).

O método do ACI (2010), é normativo e se baseia em resultados experimentais que correlacionam a porosidade com a resistência à compressão e o volume de pasta cimentícia do concreto permeável. Determina-se o peso de agregados que leva em conta a massa unitária compactada deles e a relação b/b_0 que é determinada pela ASTM C29 e é utilizada para compensar os efeitos de forma diferente dos agregados, sendo b/b_0 a relação entre o volume de agregado em uma unidade de volume de concreto e o volume de agregado em uma unidade de volume de agregado. A partir dessa relação se estabelece a porcentagem de agregados finos que pode ser utilizada no concreto permeável. Realiza-se o ajuste da saturação dos agregados através do coeficiente de absorção dos agregados. Determina-se o volume da pasta em função da porosidade desejada, sob duas condições de compactação (bem compactado e levemente compactado) através de um ábaco disponibilizado pelo método. Em seguida, com a relação água cimento estabelecida (método orienta que esteja compreendida entre 0,27 e 0,34) determina-se o consumo de cimento, de água e de agregados, conferindo-se a porosidade estabelecida.

O método de Nguyen et al. (2014) é analítico e apresenta um modo de realizar a dosagem baseado na teoria do excesso da pasta, que quantifica a pasta cimentícia necessária para revestir o agregado, evitando assim que a quantidade de pasta incorporada seja muito pequena (o que pode prejudicar a resistência mecânica) ou muito alta (o que pode prejudicar a permeabilidade compactando os poros). Adota-se um índice de vazios e calcula-se o volume de agregado em função deste índice de vazios adotados, levando ainda em conta a fração fina dos agregados (parâmetro a), o fator que representa a relação entre as dimensões do agregado e a espessura da pasta cimentícia que o reveste (fator k) e a capacidade de absorção de água dos agregados (parâmetro b). Obtém-se a melhor relação água/cimento, através de um procedimento experimental, o “teste de drenagem da pasta”. Este consiste em produzir concretos com diferentes relações água/cimento e vibrá-los sobre uma peneira com abertura relacionada ao tamanho de seus agregados durante 15 s, sendo a relação água/cimento ótima aquela encontrada quando não se encontrar pasta no fundo da peneira. Determina-se o volume da pasta de cimento

considerando os parâmetros a , k , b e o índice de vazios adotados, determinando-se, a porosidade total do concreto permeável.

A composição granulométrica e as características dos agregados utilizados no concreto permeável são outros aspectos muito importantes. Nesse cenário, diversos trabalhos foram desenvolvidos exclusivamente para avaliar a distribuição granulométrica utilizada (DEO; NEITHALATH, 2011; IBRAHIM et al., 2014; RANGELOV et al., 2017; TORRES; HU; RAMOS, 2015; YAHIA; KABAGIRE, 2014; ZHENG; CHEN; WANG, 2012; ZHONG; WILLE, 2016). A distribuição granulométrica utilizada em cada método de dosagem frequentemente varia e, em particular quando o método não é brasileiro, difere daquela comercialmente disponível.

Em decorrência do exposto, o objetivo deste trabalho foi comparar as propriedades mecânicas e o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável dosado pelos métodos do ACI (2010) e o de Nguyen et al. (2014), com agregados de granulometria ajustada à cada método e com agregados disponíveis no mercado da construção civil brasileiro, visando contribuir com o maior emprego de pavimentos de concreto permeáveis como uma alternativa para o manejo das águas pluviais.

2 MÉTODO

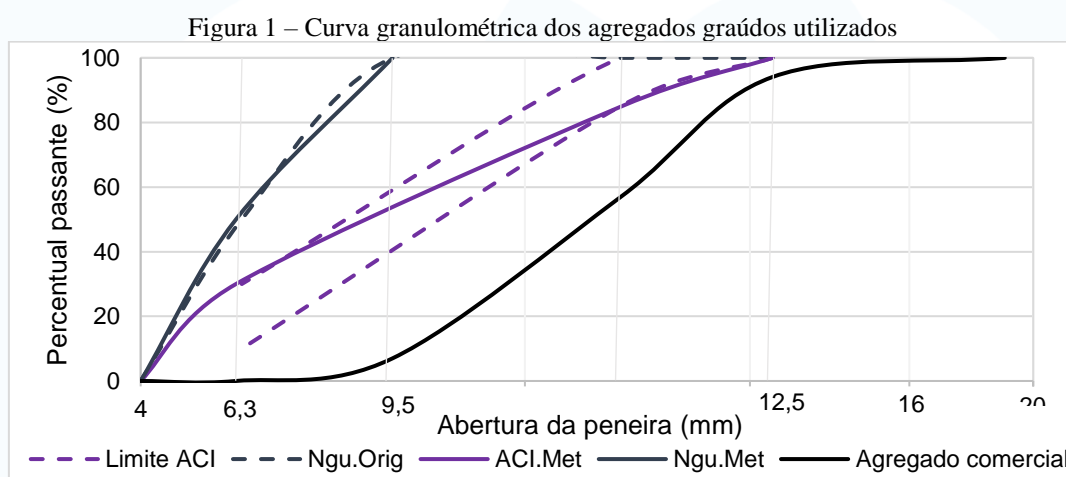
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os agregados utilizados possuíam duas granulometrias distintas, a primeira ajustada ao método, ou seja, a composição granulométrica foi estabelecida de maneira a se enquadrar nos limites propostos pelos métodos, buscando se aproximar o máximo possível da composição original. A segunda granulometria utilizada foi comercial, tanto para o agregado graúdo quanto para o miúdo.

O agregado graúdo teve a composição granulométrica determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O agregado comercial apresenta uma granulometria contínua bem graduada (Figura 1), enquanto o agregado ajustado ao método de Nguyen et al. (2014) possui uma distribuição granulométrica uniforme e o menor diâmetro máximo característico, seu esqueleto granular é o que apresenta a maior área superficial, portanto maior área de contato, o que pode contribuir para um aumento da resistência

mecânica do concreto permeável. Pode-se verificar que a composição granulométrica ajustada ao método de Nguyen et al. (2014) reproduziu muito bem a granulometria do método, enquanto aquela ajustada ao método do ACI (2010) ficou enquadrada dentro dos limites proposto pelo método.

O agregado graúdo comercial escolhido foi a brita zero, enquanto o agregado miúdo escolhido foi a areia grossa, pois são os agregados comerciais que mais se aproximaram das granulometrias ajustadas.



ACI.Met = ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Orig = granulometria original dos autores Nguyen et al. (2014)
Fonte: Autores (2021).

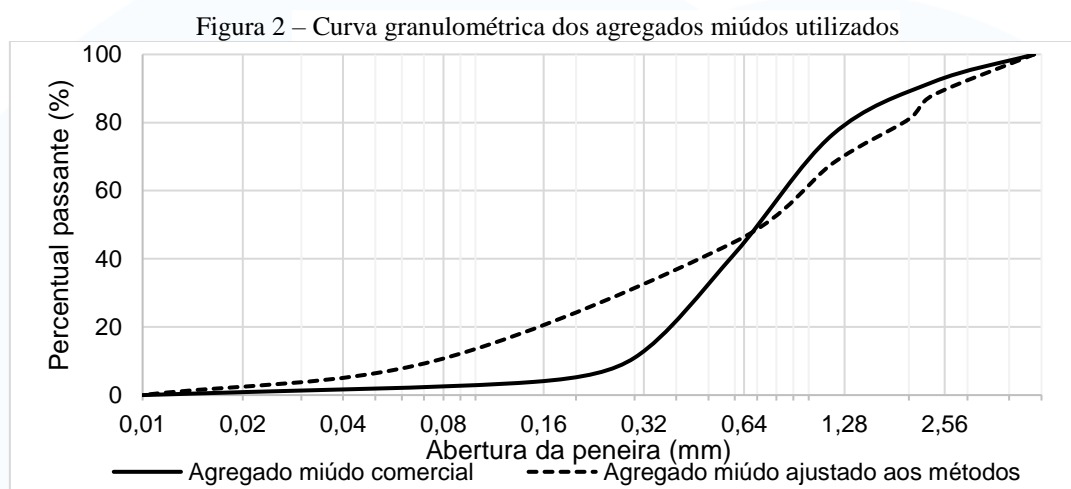
O agregado graúdo teve a determinação de massa específica, e absorção de água realizada conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009). A determinação da massa unitária compactada e do volume de vazios foi realizada conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os resultados da caracterização dos agregados graúdos comerciais e ajustados aos dois métodos foram utilizados para o cálculo dos traços do concreto permeável (Tabela 1).

Tabela 1 - Características do agregado graúdo comercial e do agregado graúdo ajustado ao método do ACI e de Ngu

	Comercial	ACI	Ngu
Massa específica (kg.m ⁻³)	2744	2778	2680
Volume de vazios (%)	37,02	39,02	38,62
Absorção de água (%)	1,5	1,9	1,8

ACI – ACI (2010); Ngu – Nguyen et al. (2014)
Fonte: Autores (2021)

A composição granulométrica do agregado miúdo foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), observando-se que o agregado miúdo utilizado na versão ajustado aos métodos e o comercial possuem curvas granulométricas semelhantes (Figura 2) e que a versão ajustada ao método foi a mesma para os dois métodos de dosagem.



Para a determinação da massa específica do agregado miúdo foi seguida a NBR NM 52 (ABNT, 2009b) e para determinação da absorção de água foi utilizada a NBR NM 30 (ABNT, 2001). Os resultados da caracterização do agregado miúdo comercial e ajustados aos métodos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do agregado miúdo comercial e do ajustado ao método

	Comercial	Ajustado aos métodos
Massa específica (kg.m ⁻³)	2602	2634
Massa unitária compactada (kg.m ⁻³)	1560	1485
Absorção de água (%)	11	11

Fonte: Autores (2021).

Para os dois métodos de dosagem foi adotado o percentual de 93,5% de agregado graúdo e 6,5 % de agregado miúdo conforme proposto pelo método de Nguyen et al. (2014), pois o agregado miúdo melhora o desempenho mecânico do concreto permeável (ELANGO et al., 2020). A composição final do concreto foi definida pela escolha do aglomerante CP-V ARI.

2.2 DOSAGEM, CONCRETAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO PERMEÁVEL E ENSAIOS

Com a caracterização dos materiais foram determinados os traços do concreto permeável com a granulometria ajustada aos dois métodos e com a granulometria comercial estabelecendo-se o consumo de material. O índice de vazios escolhido foi de 20% tanto para a dosagem do concreto permeável pelo método do ACI (2010) quanto pelo método de Nguyen et al. (2014).

A dosagem realizada pelo método do ACI precisou ser ajustada no que diz respeito à relação b/b_0 , uma vez que a incorporação de 6,5% de agregados miúdos não constava na tabela do método do ACI (2010). O volume de pasta foi determinado através do ábaco que o relaciona com a porosidade adotada, considerando a condição de compactação denominada bem compactada, pois a opção levemente compactada implicava em um decréscimo significativo no consumo de aglomerante, o que poderia comprometer o desempenho mecânico do concreto permeável. O volume final de pasta precisa ser ajustado em decorrência da incorporação do agregado miúdo, tendo sido, então, reduzido 1,3%. A relação água/cimento foi estabelecida em 0,32 e o consumo dos materiais foi determinado (Tabela 3), finalizando-se com a estimativa teórica do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável em função da porosidade adotada no ábaco proposto pelo método.

A determinação do volume de agregados, primeiro passo da dosagem pelo método de Nguyen et al. (2014), teve os parâmetros “a” e “b” determinados pelos resultados dos ensaios dos agregados e assumiu-se o valor do fator k igual a 1,116, conforme recomendação dos próprios autores. Então foi realizado o “teste de drenagem da pasta”, tendo sido testadas quatro relações água/cimento: 0,30, 0,32, 0,34 e 0,36, sendo a relação ótima a de 0,34. Determinou-se o volume de pasta de cimento, sendo então possível determinar o consumo dos materiais (Tabela 3), bem como calcular a porosidade total do concreto permeável. O traço calculado para o procedimento foi mantido com o ajuste da relação ótima água/cimento.

Tabela 3 - Consumo de material no concreto permeável com agregado ajustado ao método e com agregado comercial (kg.m⁻³)

Método	Cimento	Água	Brita	Areia	a/c
	-----kg-----				
ACI.Met	344	109	1527	106	0,32
ACI.Com	344	109	1539	107	0,32
Ngu.Met	338	115	1427	99	0,34
Ngu.Com	341	116	1472	102	0,34

ACI.Met – ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met – Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método.

Fonte: Autores (2021).

Na sequência foram concretados os corpos de prova para realizar os ensaios de resistência à compressão (NBR 5738 (ABNT, 2015), resistência à tração na flexão (NBR 5738 (ABNT, 2015), coeficiente de permeabilidade em corpos de prova no formato de placas (NBR 16416 (ABNT, 2015b), porosidade total (ASTM C1688 (ASTM, 2014), resistência à abrasão e degradação por impacto (ASTM C1747 (ASTM, 2013) e desgaste por abrasão NBR 12042 (ABNT, 2012). Todos os ensaios foram realizados em sextuplicatas com exceção dos dois ensaios de resistência à abrasão que utilizaram, cada um, nove corpos de prova cilíndricos.

A moldagem dos corpos de prova iniciou com os cilindros (100 x 200 mm) para o ensaio de resistência à compressão, sendo que a compactação realizada com o número de golpes de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), foi aquela imposta a todos os outros corpos de prova, através da reprodução da massa específica no estado fresco média determinada nos corpos de prova cilíndricos.

O desmolde foi feito após 48 horas e os corpos de prova foram identificados e levados para cura submersa em tanques com água potável e cal, sendo mantidos nessa condição até o momento de serem preparados para os devidos ensaios.

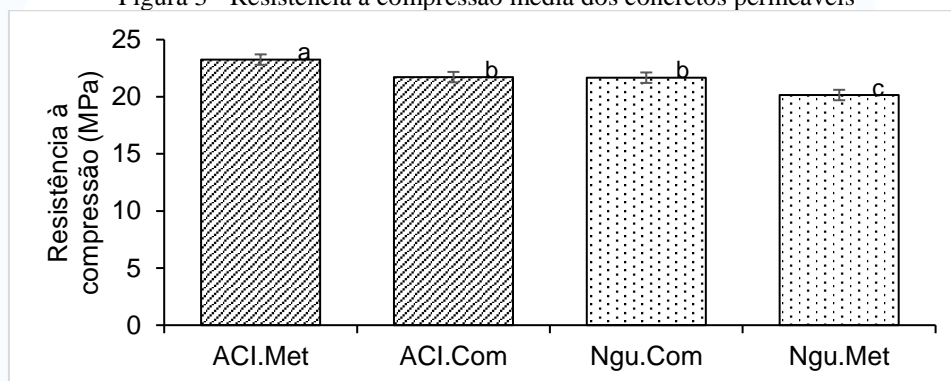
Os resultados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), com dois fatores controláveis, o método de dosagem e a granulometria dos agregados, com intervalo de confiança de 95%. No caso de diferença estatisticamente significativa entre os resultados, aplicou-se o teste de Tukey.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A resistência à compressão média dos concretos permeáveis atingiu valores maiores que 20 MPa em todas as situações, ou seja, tanto quando o concreto permeável foi dosado pelo método do ACI (2010), quando dosado pelo método de Nguyen et al. (2014), utilizando a granulometria ajustada ao método ou com a granulometria comercial, no caso a brita zero (Figura 3). Ao alcançar este valor atende-se ao valor mínimo de resistência à compressão especificada na norma brasileira de concreto permeável, NBR 16416 (ABNT, 2015b), para que o concreto permeável possa ser usado como revestimento em qualquer uma das formas, em peças, placas ou moldado no local.

Figura 3 - Resistência à compressão média dos concretos permeáveis



ACI.Met = Método do ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; ACI.Com = Método do ACI (2010) com granulometria comercial; Ngu.Com = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial.

Fonte: Autores (2021).

Na literatura a resistência à compressão varia entre 2 e 27 MPa (ĆOSIĆ et al., 2015; IBRAHIM et al., 2014) entretanto, mais comumente ela varia entre 8 e 20 MPa (DEO; NEITHALATH, 2011; LIAN; ZHUGE, 2010; LIM; TAN; FWA, 2013; SCHAEFER et al., 2006), portanto 20 MPa, além de atender a NBR 16416 (ABNT, 2015b) se equipara aos melhores resultados encontrados na literatura.

A comparação das resistências à compressão médias mostra que o método do ACI (2010) com granulometria ajustada apresentou a melhor resposta com diferença estatisticamente significativa em relação a resistência à compressão média do concreto

dosado com este método, porém com granulometria comercial e também em relação ao método de dosagem de Nguyen et al. (2014).

Verifica-se que os resultados de resistência a compressão do concreto permeável dosado com ambos os métodos com a granulometria comercial não apresentam diferença significativa. Entretanto, os resultados tanto do método do ACI quanto do método de Nguyen apresentam diferença significativa quando se compara utilização de uma distribuição granulométrica ajustada ao método com a comercial, pois o método interfere de modo significativo, assim como a interação método de dosagem-distribuição granulométrica (Tabela 4).

Tabela 4 - ANOVA entre os métodos de dosagem e as granulometrias aplicadas no ensaio de resistência à compressão

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste de Fischer	Significativo
Método	14,88	1,00	14,88	11,87	sim
Granulometria	0,00	1,00	0,00	0,00	não
Interação	13,95	1,00	13,95	11,12	sim
Erro	37,63	30,00	1,25		
Total	66,47	33,00			

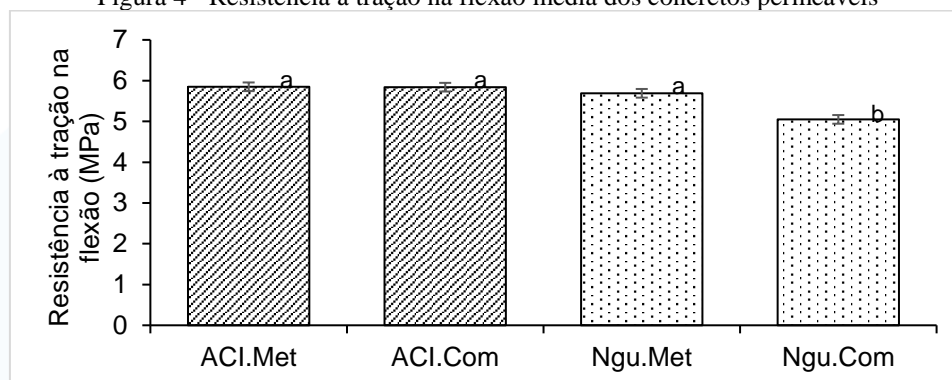
Fonte: Autores (2021).

Agregados com granulometrias menores que 9,5 mm produzem um concreto permeável de maior resistência mecânica (ELANGO et al., 2020; IBRAHIM et al., 2014; LIAN; ZHUGE; BEECHAM, 2011; MAGUESVARI; NARASIMHA, 2013; ZAETANG et al., 2013; ZHONG; WILLE, 2015). O método de Nguyen et al. (2014) apresenta os menores grãos, embora ele não tenha obtido a maior resistência, fato que pode ser associado à sua granulometria uniforme. Ao se comparar os valores de resistência deste método utilizando-se a granulometria comercial observa-se um melhor desempenho, pois a granulometria comercial é contínua, bem graduada.

A resistência à tração na flexão média, considerando os dois métodos e as duas granulometrias utilizadas, variou entre 4,8 e 6,5 MPa (Figura 4), superando em todos os casos o limite da norma NBR 16416 (ABNT, 2015b) com folga, e estando dentro da faixa de valores encontrada em outros trabalhos, cujos resultados variam entre 0,3 e 9,7 MPa

(ĆOSIĆ et al., 2015; IBRAHIM et al., 2014; LIAN; ZHUGE, 2010; LIM; TAN; FWA, 2013; TORRES; HU; RAMOS, 2015).

Figura 4 - Resistência à tração na flexão média dos concretos permeáveis



ACI.Met = Método do ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; ACI.Com = Método do ACI (2010) com granulometria comercial; Ngu.Com = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial.

Fonte: Autores (2021).

A resistência à tração a compressão dos concretos permeáveis apresentou diferença estatisticamente significativa em função do método de dosagem, da granulometria dos agregados e da interação método de dosagem-granulometria (Tabela 5).

Tabela 5 - ANOVA entre os métodos de dosagem e as granulometrias aplicadas no ensaio de resistência à tração na flexão

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste de Fischer	Significativo
Método	1,35	1,00	1,35	19,94	sim
Granulometria	0,63	1,00	0,63	9,33	sim
Interação	0,57	1,00	0,57	8,45	sim
Erro	2,03	30,00	0,07		
Total	4,59	33,00			

Fonte: Autores (2021).

Os bons resultados, estão relacionados à forma dos agregados graúdos. Os agregados britados e menos arredondados, como os utilizados, resultam em uma resistência à tração mais elevada do que quando se usa agregados arredondados, pois um agregado britado anguloso melhora a aderência dos grãos a argamassa, mantendo o

material mais unido e, é no ensaio de resistência à tração na flexão que há maior influência da forma dos agregados de acordo com Neville e Brooks (2013).

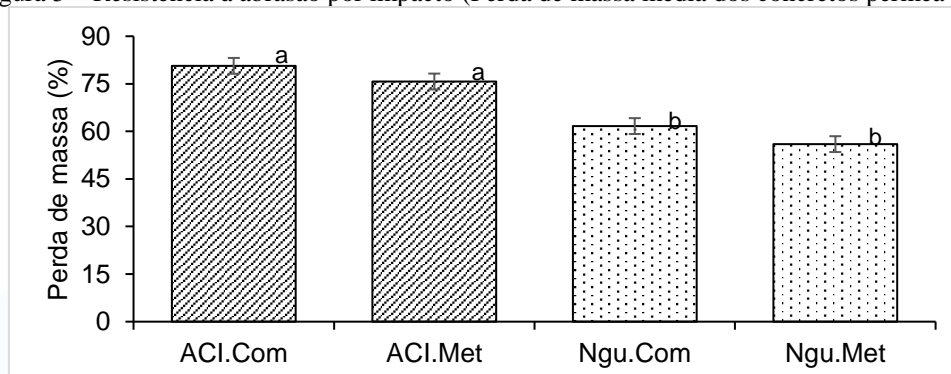
Os valores de resistência à tração na flexão obtidos correspondem entre 23 e 28% dos resultados do ensaio de resistência à compressão. Alguns estudos sobre concreto permeável apresentaram relações menores, entre 12 e 17% (ĆOSIĆ et al., 2015; CROUCH et al., 2006; GAEDICKE et al., 2016; LIAN; ZHUGE, 2010; RANGELOV et al., 2017). Gaedicke et al. (2016), ao analisarem modelos de comparação, concluíram que existe um decréscimo desta relação conforme a resistência à compressão aumenta.

3.2 RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS À ABRASÃO

A resistência dos concretos permeáveis à abrasão foi avaliada tanto por impacto quanto por desgaste. No ensaio de resistência à abrasão por impacto houve bastante variabilidade nos resultados de 56% para os concretos permeáveis dosados pelo método Nguyen et al. (2014) a 81% para os concretos dosados pelo método do ACI (2010). Variações assim já foram registradas por outros autores, como Wu et al. (2011) que aplicando o mesmo ensaio, verificaram uma variação de 35 a 80% na perda de massa e Schwetz et al. (2014), entre 50 e 75%. Segundo a ASTM C1747 (ASTM, 2013), a perda de massa pode variar de 19 a 95% após as 500 rotações no tambor.

O método de Nguyen et al. (2014) apresentou o melhor desempenho registrando as menores perdas de massa tanto para a granulometria ajustada ao método quanto para a comercial, enquanto o método do ACI (2010) apresentou perdas de massa aproximadamente 20% superiores ao método de Nguyen et al. (2014) (Figura 5). A análise estatística dos resultados apontou diferença significativa entre os métodos e entre as granulometrias (Tabela 6).

Figura 5 – Resistência à abrasão por impacto (Perda de massa média dos concretos permeáveis)



ACI.Met = Método do ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; ACI.Com = Método do ACI (2010) com granulometria comercial; Ngu.Com = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial.

Fonte: Autores (2021).

Tabela 6 - ANOVA entre os métodos de dosagem e as granulometrias aplicadas no ensaio de resistência à abrasão por impacto

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste de Fischer	Significativo
Método	2251,11	1,00	2251,11	59,83	sim
Granulometria	169,43	1,00	169,43	4,50	sim
Interação	0,85	1,00	0,85	0,02	não
Erro	1128,80	30,00	37,63		
Total	3550,19	33,00			

Fonte: Autores (2021).

A perda de massa significativa é resultante dos vazios existentes (GAEDICKE et al., 2015; MUÑOZ, 2012; WU et al., 2011). Para Tennis, Leming e Akers (2004) os concretos permeáveis apresentam maior vulnerabilidade às cargas abrasivas, devido a textura mais áspera e poros com maiores aberturas.

No ensaio de abrasão por desgaste (equipamento de Amsler), os resultados apresentam diferença estatisticamente significativa na interação entre método e granulometria, mas ao analisar apenas o método ou a granulometria, não houve diferença (Tabela 7).

Tabela 7 - ANOVA entre os métodos de dosagem e as granulometrias aplicadas no ensaio de resistência à abrasão por desgaste

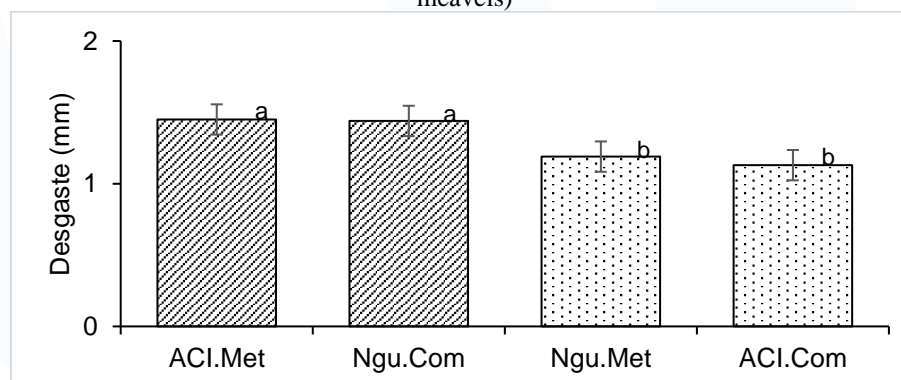
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste de Fischer	Significativo
Método	0,00	1,00	0,00	0,43	não
Granulometria	0,01	1,00	0,01	1,18	não

Interação	0,50	1,00	0,50	69,49	sim
Erro	0,21	30,00	0,01		
Total	0,72	33,00			

Fonte: Autores (2021).

A avaliação dos resultados do desgaste médio (Figura 6) mostra que o concreto permeável dosado pelo método do ACI (2010) com a granulometria comercial e dosado pelo método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada, são os que apresentam os menores desgastes de, aproximadamente, 1,1 mm. Portanto, como visto na análise estatística, só há diferença quando considerados tanto método e granulometria. Assim, cada método tem uma granulometria que favorece seu desgaste, chegando a 1,4 mm para 1000 m de percurso. O resultado é positivo e ainda inferior aos resultados de Wyllyans et al. (2019), que apresentaram desgastes entre 2,3 e 3,8 mm em amostras com diferentes relações água/cimento de concreto permeável.

Figura 6 – Resistência à abrasão por desgaste – 1000 m de percurso (Desgaste médio dos concretos permeáveis)



ACI.Met = Método do ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; ACI.Com = Método do ACI (2010) com granulometria comercial; Ngu.Com = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial.

Fonte: Autores (2021).

3.3 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E POROSIDADE TOTAL

Os valores alcançados para o coeficiente de permeabilidade chegam a superar 11 vezes o coeficiente de permeabilidade mínimo de 1 mm.s⁻¹ especificado pela NBR 16416 (ABNT, 2015b), sendo a menor média encontrada de 5,1 e maior de 11,1 mm.s⁻¹.

Também, os resultados encontrados estão alinhados com os da literatura, que se encontram entre 0,25 (ZHONG; WILLE, 2015) e 47,7 mm.s-1 (ZAETANG et al., 2013).

Estatisticamente houve diferença significativa (Tabela 8) quando considerada apenas a granulometria ou a interação do método e granulometria. A granulometria comercial, além de possuir uma distribuição contínua, bem graduada, possui menor área de contato, o que contribui para a formação de um caminho preferencial para a percolação da água. Segundo Cui et al. (2017) agregados maiores resultam em maiores vazios, contribuindo para maior coeficiente de permeabilidade e menor resistência mecânica.

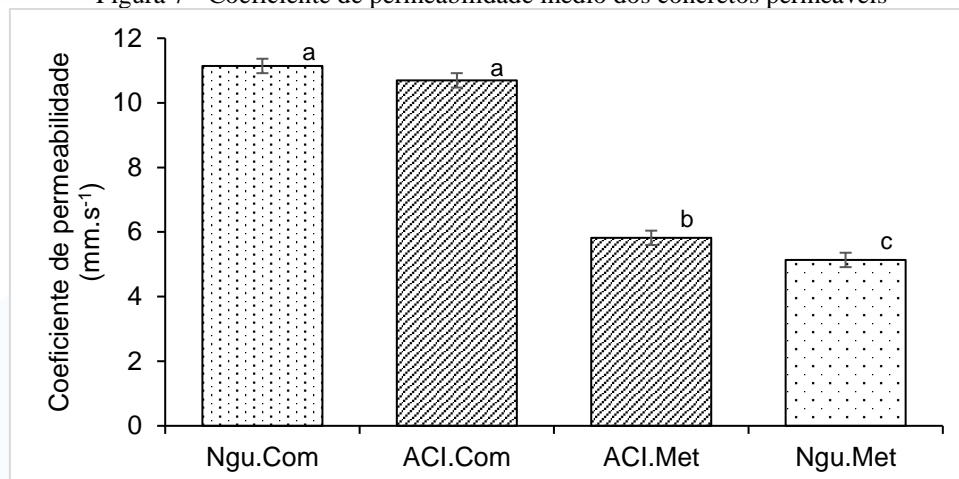
Tabela 8 - ANOVA entre os métodos de dosagem e as granulometrias aplicadas no ensaio de coeficiente de permeabilidade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste de Fischer	Significativo
Método	0,13	1,00	0,13	0,28	não
Granulometria	266,37	1,00	266,37	595,02	sim
Interação	2,87	1,00	2,87	6,42	sim
Erro	21,49	48,00	0,45		
Total	290,86	51,00			

Fonte: Autores (2021).

Ao observar os resultados (Figura 7), os maiores coeficientes de permeabilidade foram alcançados quando o concreto permeável foi executado com a granulometria comercial. Verifica-se uma acentuada diferença de quando se utilizou a granulometria ajustada ao método, sendo que neste caso os valores foram muito menores, praticamente a metade.

Figura 7 - Coeficiente de permeabilidade médio dos concretos permeáveis



ACI.Met = Método do ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; ACI.Com = Método do ACI (2010) com granulometria comercial; Ngu.Com = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial.

Fonte: Autores (2021).

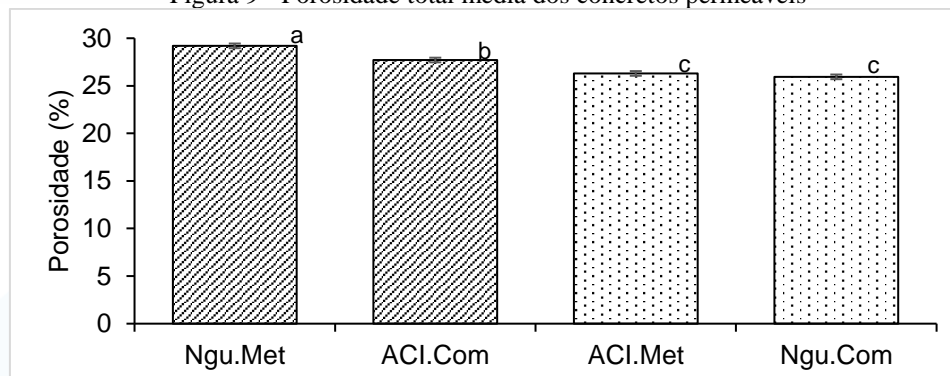
A porosidade total do concreto permeável apresentou diferença significativa em função dos métodos, das granulometrias e de suas interações (Tabela 8). A maior média alcançada foi 29,2% no método de Nguyen et al. (2014) quando o concreto permeável foi executado com agregados ajustados à metodologia e, a menor, 25,9%, no método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial (Figura 9).

Tabela 8 - ANOVA entre os métodos de dosagem e as granulometrias aplicadas no ensaio de porosidade total

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste de Fischer	Significativo
Método	1,95	1,00	1,95	5,43	sim
Granulometria	5,15	1,00	5,15	14,31	sim
Interação	32,80	1,00	32,80	91,21	sim
Erro	10,79	30,00	0,36		
Total	50,69	33,00			

Fonte: Autores (2021).

Figura 9 - Porosidade total média dos concretos permeáveis



ACI.Met = Método do ACI (2010) com granulometria ajustada ao método; Ngu.Met = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria ajustada ao método; ACI.Com = Método do ACI (2010) com granulometria comercial; Ngu.Com = Método de Nguyen et al. (2014) com granulometria comercial.

Fonte: Autores (2021).

Os valores mais correntes de serem encontrados para a porosidade de concreto permeável variam de 15 a 35 % (LIAN; ZHUGE; BEECHAM, 2011; NGUYEN et al., 2014; SCHAEFER et al., 2006; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Valores de porosidade altos como o de 42% encontrado por Ibrahim et al. (2014) comprometem a resistência a compressão do concreto permeável que no estudo citado foi extremamente baixa, de 2,4 MPa.

Embora o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável seja alcançado devido a porosidade do material, nem sempre uma alta porosidade é sinônimo de um alto coeficiente de permeabilidade. Tanto que, pelos resultados a maior porosidade foi atingida pelo método de Nguyen et al. (2014) com a utilização da granulometria ajustada, enquanto o coeficiente de permeabilidade foi o menor registrado.

Um aspecto a considerar é a de que nem todos os poros estão necessariamente conectados e, dessa forma, existem poros que não são alcançados pela água, o que pode interferir no coeficiente de permeabilidade. Além disso uma granulometria com menor dimensão máxima característica, como no caso de Nguyen et al. e do ACI ajustados ao método, faz com que o caminho da percolação da água seja mais tortuoso. No caso de granulometrias com maiores dimensões máximas características o caminho formado pelos poros tende a ser menos tortuoso, facilitando a percolação da água.

4 CONCLUSÕES

O uso de uma granulometria ajustada aos dois métodos de dosagem do concreto permeável selecionados, o do ACI (2010) e de Nguyen et al. (2014), foi estabelecido como forma de investigar se a granulometria comercial mais próxima daquela utilizada em cada método de dosagem atenderia os parâmetros analisados no mesmo nível que a granulometria apresentada pelas propostas originais.

A granulometria comercial possui uma distribuição contínua bem graduada comparada às ajustadas a cada método e com maior dimensão máxima característica. O que favoreceu o arranjo dos poros e consequentemente contribuiu com o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável, pois o caminho formado pelos poros tende a ser menos tortuoso, facilitando a percolação da água, sem prejudicar os parâmetros de resistência mecânica.

Respeitando-se o tipo de aplicação para o concreto permeável, todos os traços executados podem ser utilizados para contribuir com o sistema de drenagem urbana, visto que demonstraram equilíbrio entre resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade, ajustando-se ao agregado graúdo disponível utilizado, atendendo os valores mínimos normativos brasileiros. Todavia, o método de Nguyen et al. (2014) apresentou excelentes resultados de resistência mecânica, como o método do ACI (2010), além do coeficiente de permeabilidade, aliados ao melhor desempenho com diferença significativa nos ensaios de abrasão.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Report on pervious concrete**. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1747**. Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion. Pennsylvania: 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C1688**: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. Pennsylvania: 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. 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 53**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: 2009.
- 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 12042**. Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro: 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**. Pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 111, p. 262–274, 2016. a.
- CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, [S.l.], 2016. b.
- ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 78, p. 69–76, 2015.

CROUCH, L. K.; SPARKMAN, A.; DUNN, T.; HEWITT, R.; MITTLESTEADT, W.; BYARD, B.; PITT, J. **Estimating Pervious PCC Pavement Design Inputs with Compressive Strength and Effective Void Content**. Concrete Technology Forum: National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2006.

CUI, X.; ZHANG, J.; HUANG, D.; LIU, Z.; HOU, F.; CUI, S.; ZHANG, L.; WANG, Z. Experimental Study on the Relationship between Permeability and Strength of Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.], v. 29, n. 11, p. 04017217, 2017.

DA SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v. 12, p. 157–168, 2007.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 25, n. 11, p. 4181–4189, 2011.

ELANGO, K. S.; GOPI, R.; SARAVANAKUMAR, R.; RAJESHKUMAR, V.; VIVEK, D.; RAMAN, S. V. Properties of pervious concrete – A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 45, p. 2422-2425, 2021.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MATA, L.; MIANKODILA, F. Efecto del uso de materiales reciclados y métodos de compactación en las propiedades mecánicas e índice de reflectancia solar del hormigón permeable. **Revista ingeniería de construcción**, [S.l.], v. 30, n. 3, p. 159–167, 2015.

GAEDICKE, C.; TORRES, A.; HUYNH, K. C. T.; MARINES, A. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 125, p. 271–278, 2016.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, [S.l.], 2014.

JIANG, W.; SHA, A.; XIAO, J.; LI, Y.; HUANG, Y. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 100, p. 102–110, 2015.

JOSHAGHANI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; ATA EI, O.; GOLROO, A. Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 101, p. 317–325, 2015.

KANT SAHDEO, S.; RANSINCHUNG, G. D.; RAHUL, K. L.; DEBBARMA, S. Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 255, p. 119260, 2020.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 24, n. 12, p.

2664–2671, 2010.

LIAN, C.; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 25, n. 11, p. 4294–4298, 2011.

LIM, E.; TAN, 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**, [S.l.], v. 10, p. 1565–1575, 2013.

LUCK, J. D.; WORKMAN, S. R.; COYNE, M. S.; HIGGINS, S. F. Solid material retention and nutrient reduction properties of pervious concrete mixtures. **Biosystems Engineering**, [S.l.], v. 100, n. 3, p. 401–408, 2008.

MAGUESVARI, M. U.; NARASIMHA, V. L. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [S.l.], v. 104, p. 198–207, 2013.

MARCHIONI, M.; SILVIA, C. O. **Melhores práticas: pavimento intertravado permeável**. São Paulo. ABCP, 2011.

MEDEIROS, C. F. De; AFONSO, S. Espaços livres públicos: utilização de infraestrutura verde para otimizar a drenagem urbana nos centros históricos tombados. **Paisagem E Ambiente**, [S.l.], v. 39, p. 83–111, 2017.

MUÑOZ, A. M. **Evaluation of Sustainability, Durability and the Effect of Specimen Type in Pervious Concrete Mixtures**. 2012. Tese de Doutorado. Texas State University - San Marcos.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

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**, [S.l.], v. 73, p. 271–282, 2014.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; CHEN, Z.; RUSSELL, M.; UHLMAYER, J. Quality evaluation tests for pervious concrete pavements' placement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 245–253, 2017.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; FILHO, M. N. M. B. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: O caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.l.], v. 22, n. 5, p. 943–952, 2017.

SCHAEFER, V. R.; KEVERN, J. T.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T. **Mix design development for pervious concrete in cold climates**. Technical report, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University; 2006.

SCHWETZ, P. F.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P.; FERREIRA, L. Z.; LINHARES, V. M.; PARISOTO, M. Otimização do traço do concreto permeável. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal. (**Anais**) São Paulo: Ibracon, 2014.

SEIDL, M.; HADRICH, B.; PALMIER, L.; PETRUCCI, G.; NASCIMENTO, N. Impact of urbanisation (trends) on runoff behaviour of Pampulha watersheds (Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, [S.l.], v. 27, n. 13, p. 14259–14270, 2020.

SILVEIRA, C. A.; DIAS, P.; SCHUCH, F. S. A problemática das inundações em áreas urbanas sob a ótica da permeabilidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC, 2014, Florianópolis. (**Anais**) Florianópolis: UFSC, 2014.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**. Skokie: Portland Cement Association e Silver Spring: National Ready Mixed Concrete Association, 2004.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 95, p. 850–859, 2015.

WU, H.; SHU, X.; HUANG, B.; DONG, Q. Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.], v. 23, n. September, p. 697–702, 2011.

WYLLYANS, G.; MEDEIROS, J.; SOUZA, M.; CAVALCANTE, F.; RODRIGUES, F.; ARAÚJO, E.; XAVIER, L.; MESQUITA, E. Avaliação do concreto permeável pela relação água/cimento em função da resistência mecânica e permeabilidade. In: CONGRESSO DE ENSAIOS E EXPERIMENTAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, 2, 2019, Porto. (**Anais**). Porto: ISEP, 2019.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 62, p. 38–46, 2014.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 33, n. 2, p. 381–386, 2003.

YU, F.; SUN, D.; WANG, J.; HU, M. Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 209, p. 463–475, 2019.

ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 48, p. 585–591, 2013.

ZHENG, M.; CHEN, S.; WANG, B. Mix design method for permeable base of porous concrete. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 102–107, 2012.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance



pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 98, p. 51–60, 2015.

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