

AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL COM “PEDRA DE PIRENÓPOLIS” COMO AGREGADO GRAÚDO E NANOSSÍLICA COLOIDAL

EVALUATION OF THE PERMEABILITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF PERVIOUS CONCRETE USING “PIRENEÓPOLIS STONE” AS COARSE AGGREGATE AND COLLOIDAL NANOSILICA

DANIEL DA SILVA ANDRADE

Docente da UEG - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis / GO
ds.andrade@hotmail.com

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

Docente da UEG - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis / GO
julianorodriguessilva@gmail.com

FELIPE MIRANDA DE LIMA

Graduado em Arquitetura e Urbanismo, UniEvangélica, Anápolis / GO
felipelima_arq@yahoo.com.br

RENATA SILVA PEREIRA DE PAULA

Graduada em Arquitetura e Urbanismo, UniEvangélica, Anápolis / GO
renata.depaula.arquitetura@hotmail.com

VANESSA CRISTINA DOURADO DOS SANTOS

Graduada em Arquitetura e Urbanismo, UniEvangélica, Anápolis / GO
douradoarquitetura00@gmail.com

Resumo: Os revestimentos e as estruturas de pavimentos com capacidade de drenar a água e conduzi-la, por infiltração, às camadas inferiores do solo apresentam elevada relevância na mitigação de inundações, especialmente em decorrência da redução das áreas permeáveis nos centros urbanos. Este trabalho tem como objetivo avaliar a permeabilidade e a resistência à compressão do concreto permeável produzido com “pedra de Pirenópolis” como agregado graúdo e nanossílica coloidal, visando analisar o potencial desses materiais para aplicação em pavimentos de concreto permeável. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de concreto de alta permeabilidade utilizando “pedra de Pirenópolis” e micaxisto como agregados graúdos, cimento Portland CP II F-32, diferentes teores de nanossílica coloidal e relação água/cimento de 0,30. A resistência à compressão foi determinada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), enquanto a permeabilidade do concreto foi avaliada de acordo com a norma ACI 522R (ACI, 2006). Os resultados indicaram que a “pedra de Pirenópolis” e a nanossílica coloidal apresentam elevado potencial para utilização na produção de concretos permeáveis.

Palavras-chave: concreto permeável, nanossílica, pedra de Pirenópolis, pavimentos drenantes.

Abstract: Pavement surfaces and structural systems capable of draining water and conveying it, by infiltration, to the underlying soil layers play a significant role in mitigating flooding, particularly due to the reduction of

permeable areas in urban centers. This study aims to evaluate the permeability and compressive strength of pervious concrete produced using “Pirenópolis stone” as coarse aggregate and colloidal nanosilica, in order to assess the potential of these materials for application in pervious concrete pavements. Cylindrical specimens of highly permeable concrete were cast using “Pirenópolis stone” and mica schist as coarse aggregates, Portland cement CP II F-32, different contents of colloidal nanosilica, and a water-to-cement ratio of 0.30. Compressive strength was determined in accordance with NBR 5739 (ABNT, 2007), while concrete permeability was evaluated following ACI 522R (ACI, 2006). The results indicated that “Pirenópolis stone” and colloidal nanosilica exhibit high potential for use in the production of pervious concrete.

Keywords: pervious concrete, nanosilica, Pirenópolis stone, permeable pavements.

Introdução

A urbanização desordenada constitui um dos principais desafios enfrentados pelas cidades brasileiras, especialmente as de grande porte, uma vez que resulta em diversos impactos negativos, entre os quais se destaca a redução da permeabilidade do solo. De acordo com Beblacz (2021), inúmeras comunidades são afetadas anualmente por inundações, configurando recorrentes catástrofes de ordem emocional e financeira para as populações atingidas. O aumento do número de habitações, a insuficiência da capacidade dos sistemas de drenagem pluvial e a expansão de superfícies impermeáveis figuram entre as principais causas da ocorrência de acúmulo excessivo de água na superfície urbana.

Nesse contexto, a utilização de pavimentos permeáveis apresenta-se como uma alternativa eficaz para a mitigação desse problema, uma vez que tais sistemas possibilitam a drenagem da água e seu encaminhamento, por infiltração, às camadas inferiores do solo ou, eventualmente, a reservatórios de retenção (TAMIMI et al., 2023; LU et al., 2023; ANJOS VIANA, 2023; MORETTI et al., 2025).

Os pavimentos permeáveis consistem em estruturas compostas por camadas porosas que permitem a infiltração de parte das águas provenientes do escoamento superficial para o interior do sistema. Mazonetto (2011) classifica as camadas superficiais dos pavimentos permeáveis em três tipologias: asfalto poroso ou drenante, concreto poroso e pavimentos de blocos de concreto poroso ou vazado, preenchidos com material granular, como areia. A Figura 1 apresenta um exemplo de estrutura de pavimento com camada superficial em concreto ou asfalto poroso.

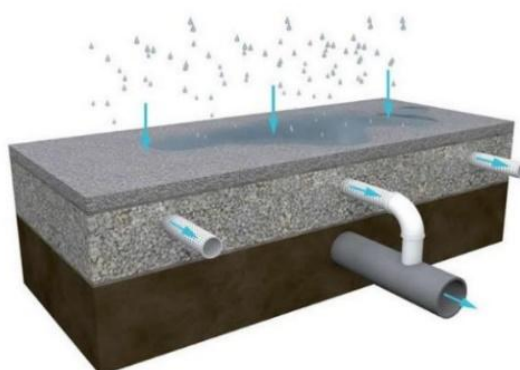


Figura 1 – Pavimento permeável. Superfície em concreto ou asfalto poroso. Fonte: MAZONNETO, 2011.

No Brasil, a utilização de pavimentos permeáveis ainda é incipiente. A primeira norma brasileira a estabelecer requisitos específicos para esse tipo de material, a ABNT NBR 16416, entrou em vigor apenas em agosto de 2015. Nesse contexto, torna-se fundamental a realização de estudos que contribuam para o desenvolvimento de pisos de concreto permeável, ampliando o conhecimento acerca de materiais passíveis de aplicação em sua produção. Dessa forma, faz-se necessária a definição de parâmetros de dosagem, bem como a investigação de suas propriedades mecânicas, a fim de elucidar questões científicas e tecnológicas e ampliar a viabilidade de uso do concreto permeável em diferentes sistemas de pavimentação (SILVA, 2021; ALMEIDA, 2021; NGUYEN et al., 2022; HADDAD et al., 2023).

O concreto permeável é produzido essencialmente a partir de agregado graúdo, água e pequena quantidade, ou mesmo ausência, de agregado miúdo, o que resulta na formação de vazios interconectados responsáveis pelo escoamento da água. Segundo Nguyen et al. (2022), diversas combinações de materiais, incluindo o uso de aditivos, podem ser empregadas, proporcionando ao concreto permeável melhor desempenho, maior durabilidade, incremento de resistência mecânica e aprimoramento da trabalhabilidade.

Em contrapartida à permeabilidade, a resistência à compressão do concreto apresenta relação inversamente proporcional ao índice de vazios. Assim, a resistência à compressão do concreto permeável é, em geral, inferior àquela observada no concreto convencional.

Nesse sentido, a utilização de nanossílica coloidal (nanopartículas de SiO_2 em suspensão) mostra-se uma alternativa promissora para atenuar a redução da resistência à compressão do concreto permeável, por meio da densificação da matriz cimentícia. De acordo com Andrade et al. (2019), a nanossílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa

que, quando utilizada em substituição parcial ao cimento, promove melhorias significativas nas propriedades mecânicas do material. A nanossílica acelera a dissolução do C_3S e a formação do gel C-S-H, além de atuar como sítio de nucleação para esse produto de hidratação. Mesmo em pequenas quantidades, sua adição pode ser mais eficiente, em termos de melhoria das propriedades mecânicas, quando comparada ao uso de teores significativamente maiores de sílica ativa (ANDRADE et al., 2019; MARTINS et al., 2023; PINHEIRO et al., 2023). Adicionalmente, a nanossílica exerce efeito *filler*, contribuindo para o refinamento da microestrutura e a redução da porosidade.

Ressalta-se que esta pesquisa também tem como objetivo avaliar o potencial de utilização da “pedra de Pirenópolis” como agregado graúdo, um resíduo proveniente de pedreiras localizadas no município de Pirenópolis – GO, conforme ilustrado na Figura 2.

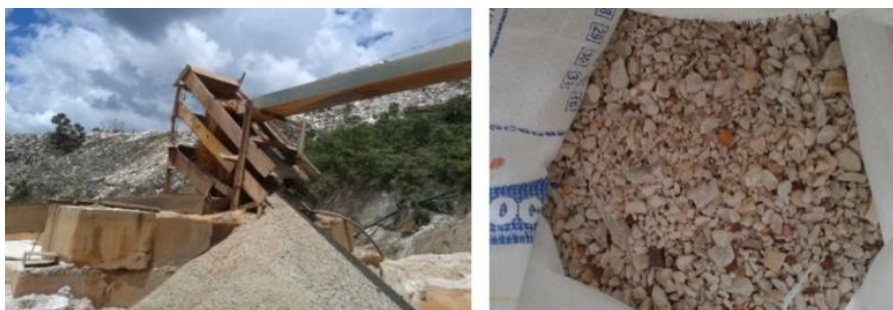


Figura 2 – Pedra de Pirenópolis utilizada como agregado graúdo nesta pesquisa. Fonte: Autores.

Programa experimental

A metodologia aqui descrita visa avaliar a resistência à compressão e a permeabilidade do concreto com “pedra de Pirenópolis” como agregado graúdo e nanossílica coloidal, além de avaliar a influência do teor de pasta de cimento Portland nestas propriedades. Este programa experimental foi dividido em 4 etapas: (1) seleção e caracterização dos materiais; (2) produção do concreto permeável com diferentes teores de pasta; (3) produção do concreto permeável com diferentes teores de nanossílica coloidal (4) determinação do coeficiente de permeabilidade e da resistência à compressão.

Seleção e caracterização dos materiais

Nesta pesquisa serão utilizados os seguintes materiais:

- Agregados graúdos (micaxisto e “pedra de Pirenópolis”);
- Cimento Portland CPII F-32;
- Aditivo superplastificante a base de policarboxilato;
- Nanossílica coloidal.

O concreto permeável apresenta altos níveis de vazios que permite a passagem da água, por isso é produzido pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo. Uma quantidade maior de agregado miúdo nas misturas proporciona uma quantidade menor de poros e uma menor permeabilidade. Por isso, neste trabalho optou-se por não utilizar agregado miúdo, na tentativa de obter uma melhor eficácia na permeabilidade do concreto.

Para a caracterização dos materiais foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais:

Agregados graúdos

- Composição granulométrica - NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Massa unitária - NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Cimento Portland

- Índice de finura - NBR NM 11579 (ABNT, 2012);
- Resistência à compressão - NBR NM 7215 (ABNT, 1997);
- Tempo de pega - NBR NM 43 (ABNT, 2003), NBR NM 65 (ABNT, 2003);
- Massa específica – NBR NM 23 (ABNT, 2001).

Nanossílica coloidal

- Difração de raios-X;

- Microscopia eletrônica de transmissão.

A microscopia eletrônica de transmissão na nanossílica foi realizada no Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás com o objetivo de avaliar o tamanho e a morfologia das partículas.

A difração de raios-X foi realizada no Instituto de Geologia da Universidade de Brasília para a caracterização da nanossílica coloidal, permitindo a identificação de compostos cristalinos nas amostras. Embora esta seja uma técnica qualitativa, em geral, quanto menor a incidência de picos bem definidos nos gráficos (difratograma) resultantes do ensaio, maior é o grau de vitrificação, ou seja, há menor presença de planos cristalinos, característica fundamental para a reatividade das pozolanas.

Produção do concreto permeável com diferentes teores de pasta

Inicialmente foram produzidos concretos permeáveis com 5 diferentes teores de pasta de cimento Portland com o objetivo de determinar o melhor teor de pasta em relação à resistência à compressão e à permeabilidade. Além disso, nesta etapa utilizaram-se dois tipos de agregados graúdos: “pedra de Pirenópolis”, que é um resíduo oriundo de pedreiras situadas na cidade de Pirenópolis – GO e o micaxisto, agregado abundante na região de Anápolis – GO, com o objetivo de avaliar o potencial da “pedra de Pirenópolis” para utilização em concretos permeáveis. Para a moldagem dos corpos de prova de concreto permeável foram utilizados moldes feitos com tubos de PVC com diâmetro de 100mm e altura de 150mm, que se encaixam ao equipamento utilizado para medir a permeabilidade do concreto, sendo que, foram moldados 2 corpos de prova para cada traço. A Figura 3 mostra os moldes utilizados nesta pesquisa.



Figura 3 – Moldes em PVC para moldagem do concreto permeável. Fonte: Autores.

Os teores de pasta variaram entre 1/2 e 1/6 em relação à proporção de cimento e agregado graúdo respectivamente conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Traços produzidos para a avaliação do teor de pasta.

	Traços	Cimento (kg)	Pedra (kg)	a/c 0,3 (kg)	Aditivo SP (%)
Micaxisto	1/6,0	1,66	10	0,50	-
	1/5,0	2,00	10	0,60	-
	1/4,0	2,50	10	0,75	-
	1/3,0	3,33	10	1,00	-
	1/2,0	5,00	10	1,50	0,3
“Pedra de Pirenópolis”	1/6,0	1,66	10	0,50	0,90
	1/5,0	2,00	10	0,60	0,50
	1/4,0	2,50	10	0,75	0,20
	1/3,0	3,33	10	1,00	0,15
	1/2,0	5,00	10	1,50	0,10

Fonte: Autores.

A utilização de uma relação água/cimento baixa (0,3) fez com que algumas misturas apresentassem elevada consistência dificultando a eficiência nas misturas, com isto foi utilizado um aditivo superplastificante a base de policarboxilato em alguns traços como mostra a Tabela 1.

A trabalhabilidade do concreto permeável foi avaliada de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). As figuras 4a e 4b mostram o abatimento do troco de cone (Slump Teste) realizado com os traços 1/6,0 e 1/2,0, respectivamente, utilizando o agregado micaxisto.



Figura 4 – Ensaio de abatimento pelo tronco de cone. Fonte: Autores.

A cura dos corpos de prova foi realizada por imersão em água de cal durante 28 (vinte e oito) dias para os ensaios de permeabilidade e resistência à compressão.

1.3 Produção do concreto permeável com diferentes teores nanossílica coloidal

Após a realização do ensaio de permeabilidade e resistência à compressão nos concretos produzidos na Etapa 2 desta pesquisa, o melhor teor de pasta, em relação a resistência à compressão e a permeabilidade, foi escolhido para a confecção do concreto permeável com nanossílica coloidal, variando-se os teores em 1%, 3%, 5% e 10%, em substituição parcial ao cimento. A Tabela 2 mostra os traços de concreto permeável confeccionados com nanossílica coloidal. A nanossílica coloidal utilizada nesta pesquisa é uma suspensão aquosa com 30% de nanopartículas de SiO₂, desta forma, com o intuito de manter fixa a relação a/c em 0,3, a quantidade de água contida na dispersão foi subtraída da quantidade de água de cada traço em relação à mistura referência.

Tabela 2 – Traços produzidos com nanossílica coloidal.

Traços	Cimento (Kg)	Pedra (Kg)	a/c 0,3 (Kg)	Nanosílica- NS (Kg)	Aditivo SP (%)
1/3,0 – REF.	3,33	10	1,000	-----	0,15
1/3,0 - NS1%	3,30	10	0,922	0,111	0,57
1/3,0 - NS3%	3,23	10	0,767	0,333	1,56
1/3,0 - NS5%	3,16	10	0,610	0,555	2,40
1/3,0 – NS10%	3,00	10	0,222	1,111	6,70

Fonte: Autores.

Determinação do coeficiente de permeabilidade e da resistência à compressão

O equipamento para determinação do coeficiente de permeabilidade dos concretos foi construído de acordo com o modelo desenvolvido por Neithalath et al. (2003), como mostra a Figura 5. Este equipamento consiste em um tubo acrílico longo de 250mm com um diâmetro interno de 92mm. Os 150mm superiores do tubo devem apresentar um diâmetro interno de 95mm de modo que o corpo de prova com dimensões de 150mm de comprimento e diâmetro de 95mm possa ser assentado no anel formado a uma distância de 100mm do fundo. Uma válvula de 50mm de diâmetro conecta a parte do fundo do tubo a uma tubulação vertical, através da qual a água pode ser drenada para fora. Esta tubulação é posicionada 10mm acima do ponto mais alto do corpo de prova de modo que ocorra somente fluxo saturado durante o teste.



Figura 5 – Equipamento para medir permeabilidade do concreto permeável. Fonte: Autores.

De acordo com Neithalath et al. (2003), no teste de permeabilidade deve-se adicionar água no cilindro para encher os vazios do corpo de prova e a tubulação de drenagem. A válvula é então, aberta e a água drenada até que seu nível no cilindro que possui a escala esteja na mesma altura da tubulação de dreno. Isto garante que o ar contido nos vazios do corpo de prova foi eliminado, e que o mesmo está completamente saturado.

A válvula é fechada e o cilindro é completado com água. Abre-se novamente a válvula sendo anotado o tempo (t) em segundos que a água leva para descer de uma cota inicial de 290mm (hi) a uma cota final de 70mm (hf). Este procedimento é então repetido três vezes, e o valor médio de (t) é usado para o cálculo. O coeficiente da permeabilidade (K) é calculado de acordo com a lei de Darcy (Equação 1).

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right)$$

Equação (1)

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade

A1 = área da seção da amostra; mm²

A2 = área da seção interna do tubo; mm²

L = comprimento da amostra; mm

t = tempo; s

hi = altura inicial (290 mm)

hf = altura final (70 mm)

A norma ACI 522R-06 (2006) estabelece como valor mínimo para o concreto permeável um coeficiente de permeabilidade (K) de $1,40 \times 10^{-3}$ m/s. Valores inferiores a esta referência apresentam permeabilidade muito baixa, dificultando a infiltração de água e reduzindo a vida útil do pavimento.

A resistência à compressão foi determinada aos 28 dias em prensa hidráulica de acordo com método descrito na NBR 5739 (ABNT, 2007). Foram utilizados os mesmos corpos de prova moldados para os ensaios de permeabilidade, tendo formato cilíndrico com dimensões 100mmx150mm, com isto foi aplicado um fator de correção de 0,93 para a determinação da resistência à compressão. Para a determinação da resistência à compressão as extremidades dos corpos de prova foram capeadas com argamassa de traço 1:1 para a regularização das superfícies e distribuição uniforme dos esforços. A Figura 6 mostra o rompimento de um corpo-de-prova de concreto permeável.



Figura 6 – Rompimento de corpo-de-prova de concreto permeável. Fonte: Autores.

Apresentação e análise dos resultados

Caracterização dos materiais

O agregado micaxisto apresentou massa unitária de 1.510 Kg/m^3 e a “pedra de Pirenópolis” apresentou massa unitária de 1.500 Kg/m^3 . A Figura 7 mostra as curvas granulométricas desses dois tipos de agregados graúdos utilizados nesta pesquisa.

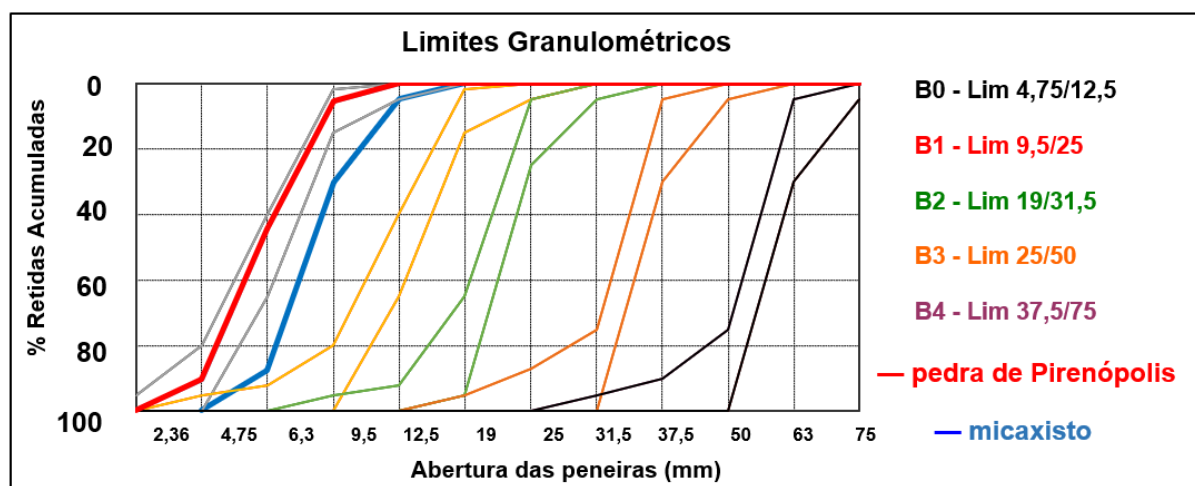


Figura 7 – Curvas granulométricas da “pedra de Pirenópolis” e Micaxisto. Fonte: Autores.

Os dois tipos de agregados graúdos apresentaram dimensão máxima característica (DMC) de 12,5mm, sendo que, a “pedra de Pirenópolis” apresentou módulo de finura de 5,4 e o micaxisto apresentou módulo de finura de 6,17.

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de caracterização realizados com o cimento Portland CII F-32.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização do cimento Portland CII F-32.

Resistência à compressão (MPa)			Tempo de pega (min)		Massa específica (Kg/dm³)	Índice de finura (%)
3dias	14dias	28dias	Início	Fim		
22,8	29,1	33,2	125	215	3,08	8,3

Fonte: Autores.

A Figura 8 apresenta micrografias da nanossílica coloidal obtidas com a microscopia eletrônica de transmissão, sendo possível observar aglomerados de nanopartículas de SiO₂, com partículas tendendo ao formato esférico e com pouca variação de tamanho. De acordo com Pinheiro *et al*, (2023), as nanopartículas apresentam uma grande tendência de aglomeração entre si. Isto está relacionado a energia de superfície das nanopartículas, a distância entre as partículas e sua configuração molecular. Observa-se também na Figura 8 as partículas com tamanhos de aproximadamente 27nm, confirmando que o material utilizado nesta pesquisa é composto por partículas em escala nanométrica.

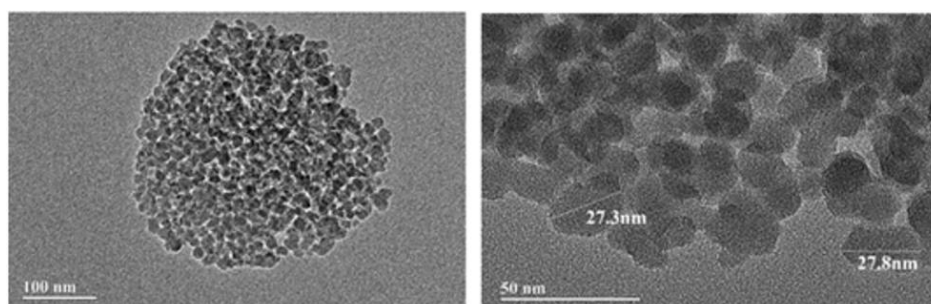


Figura 8 – Micrografias da nanossílica coloidal. Fonte: Autores.

A difração de raios-x foi importante para avaliar, de forma indireta, a reatividade da nanossílica onde, quanto mais amorfa é a configuração da estrutura da sílica, mais reativa ela é. Entretanto, este ensaio tem caráter qualitativo, não indicando a quantidade de material cristalino ou amorfo presentes nos materiais estudados. Para a formação de C-S-H advindo da reação pozolânica é essencial que a adição mineral apresente SiO_2 no estado amorfo. A Figura 9 ilustra o difratograma obtido com a difração de raios X da nanossílica coloidal utilizada nesta pesquisa mostrando que não foram identificados picos de materiais cristalinos, ou seja, a amostra apresentou-se amorfa.

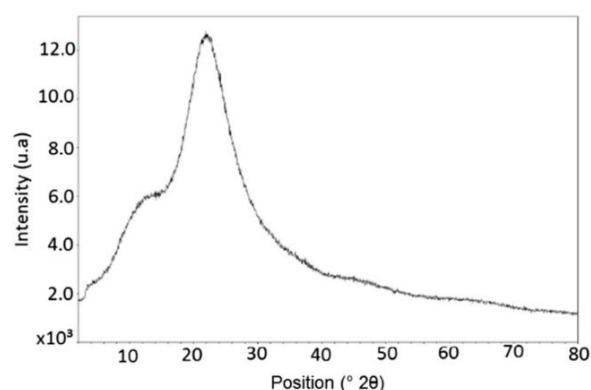


Figura 9 – Difratoograma de raios-X da nanossílica coloidal. Fonte: Autores.

Avaliação do concreto permeável no estado fresco

Conforme mostra a Tabela 4, os resultados do ensaio de abatimento pelo tronco de cone (Slump Test) mostram que os traços 1/2,0 e 1/3,0 estão em conformidade com a ACI 522 R (ACI, 2006). Para concretos permeáveis, uma vez que seus valores foram menores que 20 mm. Nos traços que apresentaram abatimento acima de 20mm observou-se a desunião dos agregados

grãos durante a realização do ensaio de consistência pelo tronco de cone, isto pode ser atribuído ao reduzido teor de pasta dessas misturas.

Tabela 4 – Resultados do abatimento do troco de cone.

Agregado gráudo	Traços	Abatimento(mm)
Micaxisto	1/6,0	180
	1/5,0	160
	1/4,0	150
	1/3,0	20
	1/2,0	10
Agregado gráudo	Traços	Abatimento(mm)
"Pedra de Pirenópolis"	1/6,0	150
	1/5,0	190
	1/4,0	160
	1/3,0	19
	1/2,0	10

Fonte: Autores.

Avaliação da permeabilidade do concreto

A Tabela 5 mostra o coeficiente de permeabilidade e a vazão em litro por segundo dos concretos permeáveis produzidos micaxisto e "pedra de Pirenópolis", com diferentes teores de pasta de cimento. A norma ACI 522R-06 (2006) estabelece como valor mínimo para o concreto permeável um coeficiente de permeabilidade (K) de 0,00140 m/s, com isto, observa-se que todos os traços de concreto produzidos com diferentes teores de pasta de cimento apresentaram-se permeáveis.

Tabela 5 – Coeficiente de permeabilidade e vazão dos traços de concreto permeável.

Traços		C. PERMEABILIDADE			VASÃO (l/s)		
		CP1	CP2	MÉDIA	CP1	CP2	MÉDIA
P. Pirenópolis	1/2,0	0,00370	0,00237	0,003035	0,07	0,04	0,055
	1/3,0	0,00427	0,00428	0,004275	0,09	0,08	0,085
	1/4,0	0,00508	0,00594	0,005508	0,11	0,11	0,110
	1/5,0	0,00996	0,00909	0,009525	0,19	0,17	0,180
	1/6,0	0,01197	0,01197	0,011970	0,14	0,22	0,180
Traços		C. PERMEABILIDADE			VASÃO		
		CP1	CP2	MÉDIA	CP1	CP2	MÉDIA
Micaxisto	1/2,0	0,00154	0,00155	0,001545	0,03	0,03	0,030
	1/3,0	0,00851	0,00715	0,007830	0,16	0,13	0,145
	1/4,0	0,01250	0,01250	0,012500	0,23	0,23	0,230
	1/5,0	0,02070	0,01550	0,018100	0,39	0,29	0,340
	1/6,0	0,01904	0,02113	0,020085	0,36	0,39	0,375

Fonte: Autores.

Para avaliar melhor o coeficiente de permeabilidade plotou-se o gráfico da Figura 10, que relaciona o coeficiente de permeabilidade com a proporção de cimento Portland dos traços

de concreto permeáveis com micaxisto e “pedra de Pirenópolis”, no qual pode ser observado que, de forma geral, ao aumentar o teor de pasta de cimento Portland o índice de vazios diminuiu, diminuindo assim a permeabilidade do concreto, confirmando o que diz a bibliografia estudada, ou seja, o aumento do teor de argamassa influencia inversamente no valor do coeficiente de permeabilidade do concreto. Também pode ser observado que os traços com o agregado gráúdo micaxisto apresentaram maior permeabilidade em relação aos traços com “pedra de Pirenópolis”, com exceção do traço 1/2,0.

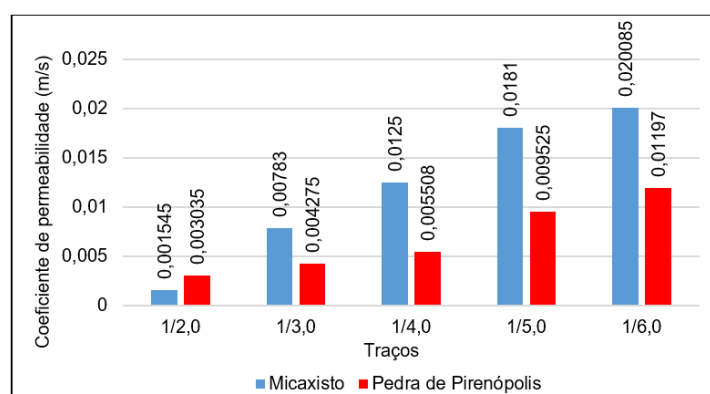


Figura 10 – Coeficiente de permeabilidade do concreto permeável com diferentes teores de pasta de cimento Portland. Fonte: Autores.

Resistência à compressão do concreto permeável

A Tabela 6 apresenta os resultados de resistência à compressão dos traços de concreto permeável produzidos micaxisto e “pedra de Pirenópolis”, com diferentes teores de pasta de cimento Portland. A resistência à compressão foi determinada a partir da determinação da resistência de dois corpos de prova aos 28 dias para cada traço produzido, onde adotou-se o maior resultado de resistência e desprezou-se o menor.

Tabela 6 – Permeabilidade e vasão do concreto permeável.

Traços	Resistência à compressão do concreto com "pedra de Pirenópolis" (MPa)	Resistência à compressão do concreto com micaxisto (MPa)
1/2,0	30,5	28,4
1/3,0	16,2	14,3
1/4,0	12,6	11,9
1/5,0	10,9	6,5
1/6,0	4,8	4,4

Fonte: Autores.

O gráfico da Figura 11 relaciona a resistência à compressão e o teor de pasta de cimento Portland utilizado em cada traço de concreto permeável produzido com “pedra de Pirenópolis” e micaxisto com agregados graúdos. Observa-se que ao aumentar o teor de pasta de cimento a resistência à compressão do concreto também aumentou. Também pode ser observado que o concreto com “pedra de Pirenópolis” apresentou resistência à compressão levemente maior em relação aos traços de concreto produzidos com micaxisto. Isto pode ser atribuído à composição granulométrica destes agregados onde, provavelmente, a “pedra de Pirenópolis” proporcionou maior compacidade aos traços de concreto permeável, exercendo influência na resistência à compressão bem como na permeabilidade do concreto.

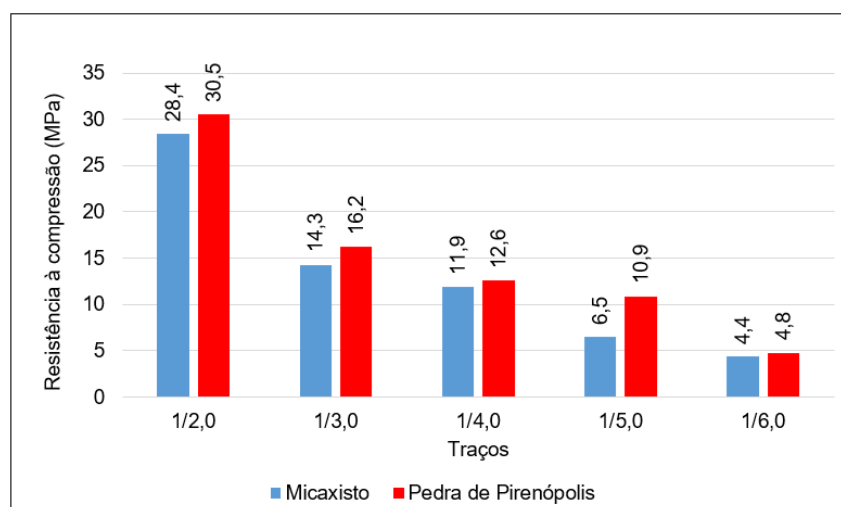


Figura 11 – Resistência à compressão do concreto permeável com diferentes teores de pasta de cimento Portland.
Fonte: Autores.

Após a realização do ensaio de resistência à compressão e de permeabilidade nos concretos produzidos com diferentes agregados e diferentes teores de pasta de cimento foi escolhido um dos traços para a confecção do concreto permeável com nanossílica coloidal, com o objetivo de avaliar a influência da nanossílica na resistência à compressão do concreto permeável. Como o concreto com “pedra de Pirenópolis” apresentou, de forma geral, maiores valores de resistência à compressão, este agregado foi escolhido para a confecção do concreto permeável com nanossílica coloidal. Os traços de concreto permeável com “pedra de Pirenópolis” com teores de pasta de cimento 1/5,0 e 1/6,0 apresentaram elevados coeficientes de permeabilidade, porém apresentaram baixos valores de resistência à compressão, 10,9MPa

e 4,8MPa, respectivamente, o traço 1/2,0 é o que apresentou maior resistência à compressão (30,5MPa) mas, embora tenha se demonstrado permeável, apresentou um baixo coeficiente de permeabilidade ($K=0,003035\text{m/s}$) em comparação aos demais, contudo, os traços 1/3,0 e 1/4,0 foram os que apresentaram maiores valores de resistência à compressão entre os traços com permeabilidade elevada, apresentando coeficiente de permeabilidade 305% e 395% acima do valor mínimo determinado pela ACI 522 R (ACI, 2006), respectivamente.

Para este trabalho optou-se pelo traço 1/3,0 para a confecção do concreto permeável com nanossílica coloidal, variando-se os teores em 1%, 3%, 5% e 10% em substituição parcial ao cimento Portland. A Tabela 7 mostra os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto permeável produzidos com nanossílica coloidal.

Tabela 7 – Resistência à compressão do concreto permeável com nanossílica coloidal.

Traços	Resistência à compressão (MPa)
1/3 Ref.	16,2
1/3 NS1%	16,8
1/3 NS3%	19,6
1/3 NS5%	22,2
1/3 NS10%	24,5

Fonte: Autores.

O gráfico da Figura 12 relaciona a resistência à compressão e o teor de nanossílica coloidal utilizado na confecção do concreto permeável com a proporção 1/3,0 de cimento Portland e “pedra de Pirenópolis”, respectivamente.

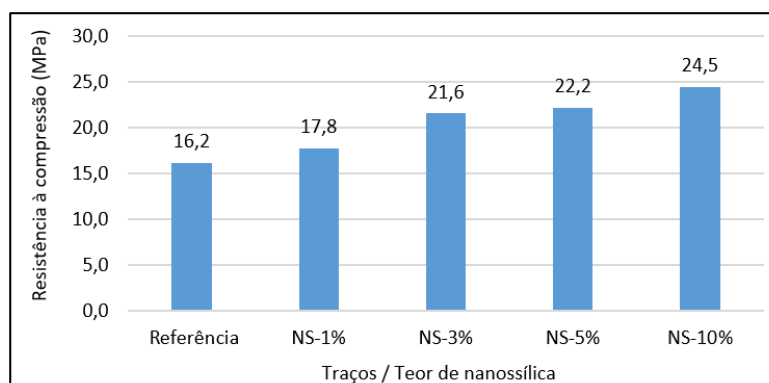


Figura 12 – Resistência à compressão do concreto permeável com diferentes teores de nanossílica coloidal.

Fonte: Autores.

Observa-se na Figura 12 que todas as misturas com nanossílica apresentaram resistência à compressão maior que a mistura referência, além disto, ao aumentar o teor de nanossílica, entre 1% e 10%, a resistência à compressão do concreto permeável também aumentou. As misturas com 5% e 10% de nanossílica coloidal apresentaram resistência à compressão maior que as misturas com 1%, e 3% de nanossílica coloidal. Porém, como pode ser observado na Tabela 2, foi necessária a utilização de teores muito elevados de aditivo superplastificante para efetuar as misturas, de forma que a pasta de cimento envolvesse toda a superfície dos agregados. O maior ganho de resistência foi observado entre os teores 1% e 3% de nanossílica coloidal, sendo que, o traço com 3% de nanossílica, apresentou um ganho de resistência de 21,6% em relação ao traço com 1% de nanossílica, e de 33,3% em relação à mistura referência. Em relação à permeabilidade, a adição de nanossílica não interferiu de forma significativa no concreto permeável.

Conclusões

Os teores de pasta de cimento influenciaram o comportamento das misturas de concreto permeável no estado fresco, sendo que os traços com maiores teores de pasta apresentaram abatimento em conformidade com a ACI 522R (ACI, 2006). Nos traços com teores de pasta reduzidos, ocorreu a desunião dos agregados graúdos durante a realização do ensaio de consistência pelo tronco de cone, apresentando abatimento elevado.

O teor de pasta de cimento influenciou a resistência à compressão e a permeabilidade do concreto permeável, pois o aumento desse teor proporcionou a diminuição dos vazios e, consequentemente, o aumento da resistência à compressão do concreto. Os resultados desta pesquisa confirmam o que diz a literatura: a resistência à compressão apresenta relação inversa com a permeabilidade do concreto.

A composição granulométrica também influenciou a resistência à compressão e a permeabilidade do concreto, sendo que o concreto com “pedra de Pirenópolis” apresentou resistência à compressão levemente maior em relação aos traços produzidos com micaxisto e menor permeabilidade. Destaca-se o traço 1/3,0 com “pedra de Pirenópolis”, que apresentou coeficiente de permeabilidade 305% acima do mínimo estabelecido pela ACI 522R (ACI, 2006) e resistência à compressão de 16,2 MPa.

Todas as misturas com nanossílica apresentaram resistência à compressão maior que a mistura de referência. Além disso, ao aumentar o teor de nanossílica, a resistência à compressão do concreto permeável também aumentou. Destaca-se a mistura com 3% de nanossílica coloidal, que apresentou ganho de resistência de 33,3% em relação à mistura de referência e demanda de aditivo superplastificante dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante (até 2,0%).

Conclui-se, com esta pesquisa, que tanto a “pedra de Pirenópolis” quanto a nanossílica coloidal demonstram grande potencial para serem utilizadas na produção de concretos permeáveis, pois as misturas com “pedra de Pirenópolis” apresentaram resistências à compressão compatíveis com as misturas com micaxisto, agregado amplamente utilizado em Anápolis-GO e região, e a nanossílica contribuiu para amenizar a perda de resistência à compressão decorrente do elevado índice de vazios característico do concreto permeável.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a Universidade Evangélica de Goiás – Unievangélica e a Universidade Estadual de Goiás - UEG pelo apoio para a realização deste trabalho.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº. 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 5738**: Concreto procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013

_____. **NBR NM 248:** Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 7251:** Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

ALMEIDA, N.; Haseelbach, L. **Time impacts of treating pervious concrete with sodium bicarbonate.** Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, v. 2, art. 29, out. 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI – 522R-06.** Pervious concrete. Michigan, 2006.
ANDRADE, D. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com Nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília. Brasília -DF, 2017.

ANDRADE, D. S.; RÊGO, J. H. S.; MORAIS, P. C.; LOPES, A. N. M. L.; ROJAS, M. F. **Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength.** Construction and Building Materials, v. 198, p. 445–455, 2019.

ANJOS VIANA, E.; MOTA, L. J. A.; SANDOVAL, G. F. B.; BELLO DE SOUZA, K. D. **Mechanical and hydraulic performance of pervious concrete pavements: experimental evaluation.** Ingeniería y Desarrollo, v. 41, n. 2, p. 137-149, 2023.

ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDEFUM J. A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial.** Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRG. Porto Alegre, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves,** Dissertação de Mestrado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BEŁŁACZ, D. **Properties of pervious concrete as base course in concrete pavement structures.** Roads and Bridges – Drogi i Mosty, v. 20, n. 4, 2021.

DANTAS, M. H. O. **Avaliação dos efeitos da adição nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia civil e ambiental, 2013.

FENG, L.; ZHANG, Y.; WANG, X.; MERY, S.; AKIN, M.; LI, M.; XIE, N.; LI, Z.; SHI, X. **Impact of deicing salts on pervious concrete pavement. Frontiers in Materials**, v. 10, art. 1189114, jun. 2023.

FERGUSON, B. K. **Porous pavements**. Integrative Studies in Water Management and Land Development. Florida, 2005.

GOMES, A. A.; SZÉLICA, M. R. **Estudo de Medidas não Estruturais para controle de inundações urbanas**. In: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharia. UEPG. Ponta Grossa - PR, 2000.

GOMES, A. A.; SZÉLICA, M. R. **Utilização de Micro-reservatórios de Detenção para Atenuação de Inundações em Bacias Urbanas**. In: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharia. UEPG. Ponta Grossa - PR, 2000.

HADDAD, B.; KARAKY, H.; BOUTOUIL, M.; BOUDART, B.; SEBAIBI, N. **Investigation properties of pervious and water-retaining recycled concrete to mitigate urban heat island phenomenon. Sustainability**, v. 15, n. 6, art. 5384, mar. 2023.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992.

INTERPAVE. **Permeable pavements: guide to design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements**. Publicação L534:L217. Ed. 5. Leicester, 2008.

KNAPTON, J.; COOK, IAN D. **Permeable paving for a new container handling area at Santos container port, Brazil**. In: 6th International Conference on Concrete Block Paving. Tokyo – Japan, 2000.

LU, Y.; QIN, Y.; HUANG, C.; PANG, X. **Albedo of pervious concrete and its implications for mitigating urban heat island. Sustainability**, v. 15, n. 10, art. 8222, maio 2023.

MARCHIONI, M.; SILVA, Cl. O. **Pavimento intertravado permeável – melhores práticas** - ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2011.

MARIANO, H. R. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e na resistência à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (EEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Goiânia-GO, 2014.

MARTINS, G. L. O. ; FRAGA, Y. S. B. ; VASCONCELLOS, J. S. ; RÊGO, J. H. S. **Synthesis and characterization of functionalized nanosilica for cementitious composites: review. JOURNAL OF NANOPARTICLE RESEARCH**, v. 22, p. 22/338, 2020.

MARTINS, G. L. O.; FRAGA, Y. S. B.; DE PAULA, A.; RÊGO, J. H. S.; TERRADES, A. M.; ROJAS, M. F. **Analysis of the Microstructure and Porosity of Cement Pastes with**

Functionalized Nanosilica with Different Contents of Aminosilane. Materials, v. 16, p. 5675, 2023.

MAZONETTO, C. **Concreto permeável: Alternativa para aumentar a permeabilidade de pavimentos submetidos a cargas reduzidas, sistema demanda cuidados de especificação, instalação e manutenção.** Revista Infraestrutura Urbana. Editora Pini, 2011.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1ª ed. São Paulo, Pini, 573 p. 2008.

MORETTI, L.; ALTOBELLI, L.; CANTISANI, G.; DEL SERRONE, G. **Permeable interlocking concrete pavements: a sustainable solution for urban and industrial water management.** Water, v. 17, n. 6, art. 829, mar. 2025.

NGUYEN, N. P. T.; SULTANA, A.; AREERACHAKUL, N.; KANDASAMY, J. **Evaluating the field performance of permeable concrete pavers.** Water, v. 14, n. 14, art. 2143, 2022.

PINHEIRO, D. G. L.; SOUSA, M. I. C.; PELLISER, F.; RÊGO, J. H. S.; TERRADES, A. M.; FRIAS, M. **Physical and Chemical Effects in Blended Cement Pastes Elaborated with Calcined Clay and Nanosilica.** Materials, v. 16, p. 1837, 2023.

PORTO, H.G. **Pavimentos drenantes,** 1ª edição. São Paulo, SP: D&Z editora, 1999.

REYES, F.; TORRES, A. **Concreto poroso: tecnologia e investigación para su uso em pavimentos.** In: Revista Noticreto nº65. Colombia, p. 56-61. 2002.

SALES, T. L. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade,** dissertação de mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2008.

SILVA, R. G. **The effect of periodic maintenance on pervious concrete pavements.** Matéria (Rio J.), v. 26, n. 4, 2021.

SMITH, D. R. **Permeable interlocking concrete pavements.** 4th edition. ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute. Washington D.C., 2011.

SOARES, A. L. M. **Efeito da adição de nanosilica nas propriedades mecânicas e microestruturais de argamassas para construção.** Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2014.

SOLDADO, E.; LOURENÇO, C.; COSTA, H. **Influência da adição de nano-partículas no desempenho da matriz de betão.** 5ª Jornada Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Portugal, 2014.

TAMIMI, A.; TABSH, S. W.; EL-EMAM, M. **Pervious concrete made with recycled coarse aggregate and reinforced with date palm leaves fibers.** Materials, v. 16, n. 23, art. 7496, dez. 2023.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias.** Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.