

Análise da metodologia construtiva de baixo custo para pavimentos de concreto permeável **com incorporação do resíduo de polimento de pisos de concreto**

BACUS DE OLIVEIRA NAHIME - Dr. - <https://orcid.org/0000-0002-7292-7919> ;

IGOR SOARES DOS SANTOS - MESTRANDO - <https://orcid.org/0000-0001-7619-273X> ;

CÉSAR PEREIRA BEZERRA FILHO - GRAD. - <https://orcid.org/0000-0001-7619-273X> | INSTITUTO FEDERAL GOIANO

LORENA ARAUJO SILVA - DOUTORANDA - <https://orcid.org/0000-0002-8159-7472> ;

ALBERTO BARELLA NETTO - Dr. - <https://orcid.org/0000-0003-0615-1865> | UNIVERSIDADE DE RIO VERDE

JORGE LUIS AKASAKI - Dr. - <https://orcid.org/0000-0003-1986-1196> | UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

RESUMO

O CONCRETO PERMEÁVEL APRESENTA VANTAGENS AMBIENTAIS E ECONÔMICAS. NO ENTANTO, SUA APLICAÇÃO É POUCO DIFUNDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL, PRINCIPALMENTE DEVIDO À FALTA DE PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO ESTABELECIDOS E À PERCEPÇÃO DE CUSTO MAIS ELEVADO EM COMPARAÇÃO AO CONCRETO CONVENCIONAL. NESTE ESTUDO, O OBJETIVO PRINCIPAL FOI ANALISAR E APLICAR UMA METODOLOGIA CONSTRUTIVA DE BAIXO CUSTO PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL, FEITO *IN LOCO*, UTILIZANDO RESÍDUOS PROVENIENTES DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO (LAPIDAÇÃO). FORAM AVALIADAS, NO TRABALHO, TRÊS DOSAGENS: UMA REFERÊNCIA E OUTRAS DUAS COM A ADIÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PISOS DE CONCRETO (RPPC) EM 2 E 4% DA MASSA DO CIMENTO, RESPECTIVAMENTE. DURANTE A REALIZAÇÃO DO TRABALHO, FOI CONSTRUÍDA UMA PISTA DE TESTE CONTENDO UM TRECHO PARA CADA TRAÇO DO CONCRETO PERMEÁVEL DESENVOLVIDO. EM SEGUIDA, FORAM REALIZADAS AVALIAÇÕES DA PERMEABILIDADE DE CADA TRECHO.

PALAVRAS-CHAVE: EXECUÇÃO, PAVIMENTO PERMEÁVEL, BAIXO CUSTO.

1. INTRODUÇÃO

Nas áreas urbanas, é comum encontrar pavimentos impermeáveis, o que resulta no aumento do escoamento superfi-

cial, aumentando o risco de inundações e facilitando o transporte de resíduos. Essa situação pode levar a falhas no sistema de drenagem e à poluição de rios e lagos [1]. O concreto permeável, também chamado de concreto poroso, apresenta uma estrutura com porosidade que varia de 15% a 35% do volume total, resultado da ausência ou baixa presença de finos em sua composição. Essa característica possibilita a infiltração e percolação da água, reduzindo os efeitos negativos do escoamento superficial [2, 3].

O concreto permeável ainda é pouco utilizado em obras de construção civil, se levar em consideração as vantagens observadas na utilização desse material. Isso ocorre devido à sua técnica construtiva pouco difundida entre os engenheiros e às resistências mecânicas geralmente inferiores se comparadas ao concreto convencional [2]. Conforme sugerido por vários autores, a incorporação de materiais reciclados com alta finura ou atividade pozzolânica tem demonstrado melhorar o desempenho das propriedades mecânicas do concreto permeável, mantendo a permeabilidade superior aos exigidos pelas normativas. [4-6]. O resíduo do polimento de pisos de concreto (RPPC) possui uma superfície específica superior à do cimen-

to, promovendo o efeito *filler* e aumentando a resistência mecânica nas matrizes cimentícias, como menciona [7].

Nesse estudo, o objetivo da pesquisa foi avaliar e aplicar uma metodologia construtiva de baixo custo para o concreto permeável moldado *in loco* com adição do resíduo do polimento de pisos de concreto (lapidação).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esta pesquisa foi utilizado na dosagem do concreto permeável o cimento CP V - ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), por possuir desempenho mecânico na idade inicial superior aos demais e permitir a aplicação em painéis monolíticos moldados *in loco* e a produção de elementos pré-fabricados. Como agregado graúdo foi empregada a brita de origem basáltica com dimensão máxima característica de 9,5 mm, pois, conforme Chandrappa e Biligiri [8], a alta dureza e módulo de elasticidade do agregado promove o aumento de resistência no concreto permeável.

O resíduo do polimento de pisos de concreto (RPPC) foi adquirido após o processo de lapidação de pisos com agregados de origem calcária na cidade de Rio Verde (GO) e região.

TABELA 1

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PERDA AO FOGO (PF) DE RPPC

Materiais	Componente (%)								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃	PF
CFPW	10.29	0.12	1.88	1.34	8.26	41.00	0.22	1.24	36.03

O material coletado estava em estado pastoso. Com o objetivo de assegurar a homogeneização e a qualidade do concreto permeável, o material foi submetido ao processo de secagem em estufa por 72 horas a 65 °C. Após essa etapa, foi destorroado em um almofariz e peneirado na malha com 150 mm de abertura (#100). O RPPC foi utilizado em baixos teores para evitar o fechamento dos poros e perda significativa de permeabilidade.

A quantidade de RPPC gerado varia com o procedimento adotado para o polimento e a espessura do piso. Uma análise prévia demonstrou que, para uma superfície com 1,5 mm de espessura, foram gerados 9,5 kg de resíduo de lapidação por 1,0 m² de piso polido (lapidado); quando secado ao ar livre, resta a quantia de 4,0 kg de resíduo seco em pó. Destaca-se que os volumes de materiais usados para pavimentação são grandes e no processo de preparação do resíduo a água é evapora ao ar livre, ficando somente o resíduo da lapidação. A quantidade de perda de massa após a secagem é significativa. Assim, pesquisas que visam reduzir o impacto ambiental gerado pelo RPPC podem propiciar a redução do volume de resíduos sólidos da construção civil em aterros sanitários, além de menor poluição do solo, de bacias hidrográficas e do ar devido à contaminação promovida pelo resíduo líquido e em pó.

Os ensaios de caracterização do RPPC resultaram em módulo de finura de 0,69, dimensão máxima de 0,6 mm, massa específica de 2.580 kg/m³ e área superficial específica de 11.447,03 cm²/g. A composição química do RPPC, determinada por fluorescência de raios X, é apresentada na Tabela 1. Os testes constataram que esse material possui um teor de sílica de 10,3%, uma soma dos elementos (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃) de 13,5% e uma perda ao fogo de 36,0%. Ao analisar a composição química do

RPPC, observou-se que o CaO foi o mineral com maior presença, sendo o SiO₂ o segundo maior. Esses valores eram esperados porque o material é proveniente de pisos de concreto com agregados de calcário.

A coleta de preços de mercado para o pavimento permeável foi realizada por meio da Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA), com data de referência de julho de 2022. Além disso, o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), gerenciado pela Caixa Econômica Federal e com apoio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi utilizado com data de referência de julho de 2022 para o estado de Goiás. O SINAPI conduz pesquisas mensais de preços, contribuindo para a obtenção de dados confiáveis.

Ensaio preliminares foram conduzidos para determinar a possível porcentagem de RPPC que maximiza a resistência mecânica sem perda de permeabilidade abaixo de 1 mm/s para concreto permeável. Observou-se que a adição de 4% de RPPC aumentou a resistência à compressão do concreto. Ao mesmo tempo, maiores porcentagens de adições reduziram a permeabilidade e a trabalhabilidade, dificultando a moldagem das amostras sem alteração da relação água/cimento ou uso de aditivos. Portanto, os seguintes percentuais de adi-

ção de RPPC foram escolhidos para o estudo: 2% e 4% em massa com relação ao cimento.

A amostra controle de concreto permeável foi produzida com proporção de 1:4 na relação entre cimento e brita na massa. A relação água/cimento foi fixada em 0,30 para o corpo de prova controle e mantida para todas as amostras analisadas (Figura 1). Dessa forma, foram analisadas três dosagens distintas: o grupo Controle, sem a adição do resíduo, e mais dois grupos com a incorporação de 2% e 4% de RPPC, respectivamente.

Utilizando as proporções dos traços, procedeu-se ao dimensionamento da pista de testes localizada em Rio Verde (GO). Essa pista foi instalada nas trilhas de uma praça universitária, com a finalidade de acomodar o tráfego de pedestres, e projetada de acordo com a norma NBR 16416:2015. Os requisitos exigiam para o concreto permeável uma resistência à tração na flexão de 1 MPa, uma massa específica superior a 1600 kg/m³ e um coeficiente de permeabilidade superior a 1 mm/s

**FIGURA 1**

ANÁLISE VISUAL DO CONCRETO PERMEÁVEL

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)

TABELA 2

RESUMO DOS CONSUMOS DE MATERIAIS E ESPESSURAS DAS CAMADAS

	Controle	2% RPPC	4% RPPC
Cimento/agregado graúdo	1:4	1:4	1:4
Água/cimento	0,3	0,3	0,3
Consumo de cimento (kg/m ³)	375	399,9	411,5
Consumo RPPC (kg/m ³)	0	8,0	16,5
Consumo agregado natural (kg/m ³)	1500	1500	1500
Consumo de água (kg/m ³)	112,5	120,0	123,5
Altura da camada de base (mm)	50,0	50,0	50,0
Espessura do concreto permeável (mm)	60,0	60,0	60,0

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)

para o pavimento recém-construído [9].

A dosagem do concreto foi realizada com a ordem de mistura dos componentes de forma a garantir melhor homogeneização e fixar um procedimento que obteria resistências mecânicas e permeabilidade semelhantes para amostras que fossem produzidas em betoneiras diferentes, mas que possuem o mesmo traço. A metodologia consistiu em adicionar todo o agregado com 5% da massa total do cimento na betoneira; misturar por 1 minuto; adicionar o restante dos materiais; misturar por 3 minutos e deixar a mistura em repouso por 3 minutos, estando pronta para aplicação após essa etapa.

Na pista de teste desenvolvida foram aplicados os três traços, uma vez que não há diferença visual nas dosagens. O ensaio de permeabilidade foi executado pelo método fornecido do anexo A da ABNT NBR 16416:2015 [9], onde foi realizada uma pré-molhagem e, em seguida, despejada a água no anel de infiltração (300 mm de diâmetro e 50 mm de altura), com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as duas marcações internas do anel (10 mm a 15 mm). O cronômetro foi acionado assim que a água atingiu a superfície do pavimento permeável e parou quando não houve mais água livre na superfície. Para calcular o coeficiente de permeabilidade (k) foi utilizada a Eq. 1.

$$[1] \quad k = \frac{C * m}{(d^2 * t)}$$

Onde:

C – corresponde ao fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4.583.666.000,00;

m – a massa de água infiltrada expressa em quilogramas (kg);

d – é o diâmetro interno do cilindro de infiltração expresso em milímetros (mm);

t – é o tempo necessário para toda a água percolar, expresso em segundos (s).

Conseqüentemente, o coeficiente de permeabilidade obtido foi expresso em milímetros por hora (mm/h).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme as exigências normativas da NBR 16416:2015 [9], é necessária uma camada entre o solo e o revestimento de concreto permeável que atue como base e seja constituída de materiais pétreos de granulometria aberta. O dimensionamento da altura da base tem como foco principal a função de reservatório de água no pavimento permeável. Para a região onde a pista de teste foi instalada, adotou-se o valor de precipitação projetada de 178 mm/h. Isso resultou em uma altura da camada de base de 50,0 mm, utilizando agregado natural de origem basáltica, com dimensão máxima característica de 19,0 mm.

Ao avaliar a permeabilidade do solo e o histórico de precipitação com o período de retorno de 10 anos, verificou-se

que toda a água precipitada que alcança o subleito se infiltrará e, em caso de chuvas intensas, a altura da base granular atuará na função de reservatório da água excedente; assim, foi dispensado o uso de drenos.

A espessura do revestimento de concreto permeável foi de 60,0 mm, visto que o pavimento foi destinado ao tráfego de pedestres e moldado in loco. Desta forma, o resumo do consumo de materiais e a altura das camadas de cada traço foram apresentados na Tabela 2, aqui não foi adicionado o agregado miúdo, uma vez que a Tabela 2 traz somente dados do concreto permeável. Ao comparar as diferentes misturas, é evidente o aumento no consumo de cimento por metro cúbico com a adição do resíduo do polimento de pisos de concreto (RPPC). Isso ocorre devido às amostras exibirem uma diminuição no índice de vazios e um empacotamento mais eficiente. Como resultado, a permeabilidade é reduzida e há um aumento na resistência e no consumo de materiais. Os resultados apresentados estão em consonância com a pesquisa conduzida por Zhong e Wille [10].

Na determinação dos custos, tanto do pavimento convencional quanto do

TABELA 3

COMPOSIÇÃO DE CUSTO POR METRO QUADRADO DOS MATERIAIS PARA PRODUIR O CONCRETO

Material	Unidade	Preço unitário (R\$)	Concreto permeável		Concreto convencional	
			Cons./m ²	Valor (R\$)	Cons./m ²	Valor (R\$)
Cimento	kg	0,64	22,50	14,40	19,38	12,40
Areia Grossa	m ³	170,00	—	—	0,04535	7,71
Brita 0	m ³	129,68	0,06000	7,78	0,03523	4,57
Água	m ³	10,32	0,00675	0,07	0,01163	0,12
			TOTAL	R\$ 22,25	TOTAL	R\$ 24,80

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)

pavimento permeável, foram levantadas as composições de preços apresentadas na Tabela 3, destacando que, para a produção de concreto convencional, se utiliza agregado miúdo. Os custos de comparação são os de concreto permeável com relação ao concreto convencional, entretanto o custo do resíduo foi desprezado, por não ser possível obter valor de mercado, uma vez que o material é um subproduto do processo de polimento (lapidação) de pisos de concreto. Já, os custos associados ao transporte para o local da obra podem ser relevantes conforme a logística dos canteiros de obras, variando conforme cada caso. O concreto convencional utilizado para comparação de preços possui de 20 MPa com dosagem em massa (kg) dos materiais, com traço unitário de 1:2,86:2,32 (cimento : areia : grossa : brita 0). Entretanto, a Tabela 3 traz os dados convertidos para volume através da relação de massa unitária do agregado graúdo, que é como o mercado atende ao consumidor, sendo que, nas colunas dos consumos dos materiais, a relação foi convertida para m², para melhor entendimento do leitor. Os preços apresentados foram estabelecidos pela Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA). Ambos os custos foram calculados para execução de 1,00 m² considerando a espessura do

piso de 6,00 cm, não levando em consideração logística interna ou externa a obra, nem tampouco a mão de obra.

Ao analisar os custos apresentados na Tabela 3, fica evidente que o custo dos materiais por metro quadrado de concreto convencional é 11,46% maior, quando comparado ao concreto permeável. Essa discrepância é principalmente atribuída à ausência de agregado miúdo no concreto permeável. Contudo, alguns autores mencionam que, para a produção de concreto permeável, é necessária a utilização de equipamento de compactação, devido a sua baixa trabalhabilidade, o que pode elevar o custo do pavimento permeável na sua aplicação. A seguir, será apresentado um equipamento desenvolvido nesse trabalho que aponta para a solução desse aumento de custo.

Para a construção do pavimento de concreto permeável na praça, foram aplicados os traços de concreto permeável em três trechos, uma vez que a adição do material estudado não afeta as propriedades visuais do concreto. Com o objetivo de reduzir os custos de execução, o material foi dosado em uma betoneira de 400 L e distribuído uniformemente, conforme a Figura 2.

O aluguel de máquinas de compactação foi contornado através da criação do rolo compactador fabrica-

do com material reciclado, conforme representado na Figura 3. Esse dispositivo foi composto por um tubo PVC com 1 metro de comprimento e 200 mm de diâmetro, preenchido com concreto convencional. No interior desse tubo, foi colocado outro tubo PVC com 40 mm de diâmetro, destinado à passagem da haste metálica e conectado ao suporte metálico.

Ao seguir os procedimentos delineados, foi viável alcançar uma produtividade satisfatória e economia nos equipamentos empregados, ao mesmo tempo em que se promoveu um impacto positivo no âmbito ambiental, devido à reciclagem dos materiais empregados na confecção do rolo compactador. Na Figura 4, é ilustrada a transformação da praça antes e depois da implementação do pavimento permeável.

Durante a avaliação da permeabilidade da pista de teste construída, foram analisados os resultados de permeabilidade indicados na Figura 5. Nela, é notável que todas as amostras demonstraram permeabilidade igual ou superior a 1 mm/s, um valor exigido pela norma ABNT NBR 16416:2015 [9].

Na Figura 5, é perceptível que a composição com 2% de RPPC apresentou a maior permeabilidade, atingindo cerca de 3,5 mm/s. Já para as amostras Controle e 4% de RPPC, os valores foram



FIGURA 2

APLICAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL NOS TRECHOS SELECIONADOS

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)



FIGURA 3

EMPREGO DO ROLO COMPACTADOR CONSTRUÍDO DE MATERIAL RECICLADO

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)



A



B

FIGURA 4

VISTAS DA PRAÇA: (A) ANTES E (B) APÓS A CONCLUSÃO DAS OBRAS

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)

de 1,3 mm/s e 1,0 mm/s, respectivamente. Todos os valores atendem à norma de permeabilidade, destacando que a porosidade da pasta do traço 2% foi diminuída indicando uma característica de pasta mais densa, entretanto a permeabilidade que relaciona os vazios comunicantes foi potencializada com relação ao traço controle e também ao traço com 4% de adição. Também através dos resultados da Figura 5, foi possível verificar que com a adição de 4%, a permeabilidade diminuiu significativamente, ficando abaixo até mesmo do traço controle, comprometendo os vazios comunicantes. Vale ressaltar que mesmo após o serviço de poda da grama esmeralda executada pela equipe de jardinagem, onde tal serviço poderia ter contaminado os poros, provocando o entupimento dos

mesmos, os valores de permeabilidade, permaneceram consistentes.

4. CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste estudo, foi possível concluir que o preço dos materiais para construção de pavimento de concreto permeável moldado *in loco* será inferior em 11,2 % ao de concreto convencional, principalmente devido à ausência do custo de agregado

miúdo. O RPPC foi adicionado em proporções de 2% e 4% com relação a massa de cimento, entretanto adições acima de 2% promove o fechamento dos vazios comunicantes do concreto permeável, mas pode ser aplicado com teores de até 2% atingindo melhores resultados; assim, seu uso é recomendado, dando uma destinação mais sustentável para o material. Com o rolo compressor desenvolvido, é possível reduzir os custos de execução e, conseqüentemente, da produção do pavimento em geral, entregando uma superfície regular conforme o solicitado para passeios de concreto. ☺

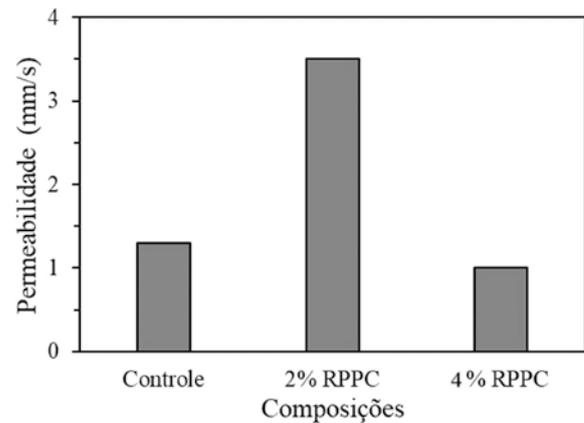


FIGURA 5

RESULTADOS DE PERMEABILIDADE EM CAMPO

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DANIEL, Francisco Javier De La Mota et al. Porous-permeable pavements promote growth and establishment and modify root depth distribution of *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. in simulated urban tree pits. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 33, p. 27-36, 2018.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. ACI Committee 522, Farmington Hills, Michigan, 2010.
- [3] SUMANASOORIYA, Milani S.; NEITHALATH, Narayanan. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 8, p. 778-787, 2011.
- [4] KHANKHAJE, Elnaz et al. Sustainable clean pervious concrete pavement production incorporating palm oil fuel ash as cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 1476-1485, 2018.
- [5] MOHAMMED, Bashar S. et al. Properties of nano-silica modified pervious concrete. *Case studies in construction materials*, v. 8, p. 409-422, 2018.
- [6] SOTO-PÉREZ, Linoshka; HWANG, Sangchul. Mix design and pollution control potential of pervious concrete with non-compliant waste fly ash. *Journal of environmental management*, v. 176, p. 112-118, 2016.
- [7] SILVA, Lorena A. et al. Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste. *Construction and Building Materials*, v. 265, p. 120119, 2020.
- [8] CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 49, n. 12, p. 5255-5271, 2016.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto — Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- [10] ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 70, p. 130-138, 2016.