

Dosagem de *pavers* de concreto permeável com agregado reciclado misto (ARM)

BRUNA CAROLINE GODOY DE SOUZA – GRADUANDA (ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5782-5332>) (brunacaroline.godoys@gmail.com);

ANA PAULA MORENO TRIGO – PROF. DOUTORA (ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1374-7467>) (apmtrigo@ifsp.edu.br) – **IFSP**

RAFAELLA CORDARO BUCKER FURINI – ENG. CIVIL (ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7384-4234>) (rafaellafurini@outlook.com) – **FEX ENGENHARIA**

MARIANA NUCCITELLI SIMÕES – MESTRANDA (ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0400-3586>) (marianasimoes1607@hotmail.com) – **UFSCAR**

LARA GUIZI ANONI – MESTRANDA (ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5116-1507>) (laraanoni@usp.br) – **USP**

RESUMO

COMO FORMA DE ALIAR SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS DE OCUPAÇÃO E USO DO SOLO E CRESCENTE VOLUME DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO SEM FINALIDADE DE REUTILIZAÇÃO BEM ESTABELECIDO, VÊM SENDO DESENVOLVIDOS PAVERS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO MISTO (ARM). NESTE TRABALHO, TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM SUBSTITUIÇÕES DE 25%, 50% E 75% DO AGREGADO NATURAL PELO ARM FORAM DOSADOS COM O INTUITO DE ATENDEREM AS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS ESTABELECIDAS EM NORMA. O DESEMPENHO DO CONCRETO FOI VERIFICADO POR ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, TRAÇÃO NA FLEXÃO E PERMEABILIDADE. ALÉM DISSO, 1 m² DE PAVIMENTO PERMEÁVEL FOI CONSTRUÍDO PARA A VALIDAÇÃO, NA PRÁTICA, DOS RESULTADOS. OS RESULTADOS MOSTRAM A INFLUÊNCIA NEGATIVA DO AGREGADO RECICLADO NA RESISTÊNCIA E POSITIVA NA PERMEABILIDADE. DENTRE OS TRAÇOS PRODUZIDOS, 2 ATINGIRAM REQUISITOS MÍNIMOS, COMBINANDO TANTO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO QUANTO PERMEABILIDADE.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO DRENANTE, PAVIMENTO PERMEÁVEL, PAVES, AGREGADO RECICLADO, ARM.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população urbana, aliado às necessidades de ampliação da infraestrutura, conduzem as cidades a enfrentarem problemas com drenagem superficial do solo e excesso de resíduos. Dentre as iniciativas sustentáveis, o uso dos chamados *pavers* permeáveis (peças de concreto para pavimento intertravado) é destaque como forma de permitir rápida percolação de água e redução do escoamento superficial, reduzindo a chance de alagamentos.

Em contrapartida, o volume crescente de resíduos da construção civil evidencia a necessidade de soluções para sua reincorporação no processo construtivo. Aliando as problemáticas discutidas, o uso do agregado reciclado misto (ARM) na produção de pavimentos permeáveis vem sendo avaliado em termos de desempenho e benefícios ambientais. Concretos permeáveis com substituição total do agregado natural pelo reciclado foram desenvolvidos por Junior (2019). A queda da resistência mecânica vem sendo observada em trabalhos. Finocchiaro e Girardi (2017) tiveram resultados satisfatórios quanto ao tempo de percolação da água, mas em contrapartida obtiveram queda na resistência à compressão. Recentemente, Strieder et al (2020) verificaram que a resistência à compressão diminui em 30% para teor total de substituição do agregado natural pelo reciclado.

Dessa forma, apesar de resultados vantajosos com relação à percolação da água, ainda há falhas na metodologia de dosagem ideal para o desenvolvimento de *pavers* reciclados que aliem desempenho mecânico ao hidráulico nas peças. De acordo a ABNT NBR 16416:2015, peças de concreto permeável para tráfego leve ou de pedestres devem atingir, no mínimo, 20 MPa de resistência à compressão e coeficiente de permeabilidade (*k*) maior que 0,1 cm/s. Quanto à resistência à tração, a norma apresenta exigências apenas para placas.

O intuito do estudo é desenvolver traços de concreto permeável com substituição do agregado natural pelo ARM, avaliar os desempenhos mecânico e hidráulico das misturas e, ao final, produzir um pavimento

de blocos intertravados do concreto permeável com o resíduo. Com o trabalho, almeja-se apresentar os *pavers* permeáveis de ARM como uma solução sustentável, tanto do ponto de vista de otimização do uso do solo como do reaproveitamento de materiais da própria indústria da construção.

2. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de São Paulo, *campus* Votuporanga. O pedrisco reciclado foi fornecido por uma empresa de Votuporanga.

2.1 Caracterização dos materiais

A caracterização respeitou as normativas brasileiras. Para os agregados, foram realizados os ensaios de Análise Granulométrica: ABNT NBR 17054:2022, Massa Específica: ABNT NBR 16917:2021, Massa Unitária: ABNT NBR 16972:2021 e Absorção de Água: ABNT NBR 16917:2021. O cimento teve as características fornecidas pelo fabricante. Cabe destacar que o agregado reciclado não foi caracterizado de acordo à norma atualizada (ABNT NBR 15116:2022), pois a parte experimental do estudo foi finalizada em 2021.

2.2 Dosagem dos concretos permeáveis

A metodologia de dosagem adotada no estudo, baseada no método IPT/EPUSP, tem como ponto de partida o estudo de um traço rico (1:3,5) e um traço médio (1:5). A partir da proporção de massa total do agregado (neste caso somente pedrisco),

estudou-se a melhor relação água/cimento (a/c) para atender as misturas com substituições de 25%, 50% e 75% do pedrisco natural pelo reciclado. As relações a/c verificadas contemplam o intervalo de 0,5 a 0,8 para o traço rico e de 0,55 a 0,65 para o traço médio, ambos com amplitude de 0,05.

Semelhante à avaliação do teor de argamassa para concretos comuns no método IPT/EPUSP, a validação das relações a/c foi alcançada ao se submeter cada traço à análise tátil-visual, de forma a se obter concretos que formassem uma “bola na mão” e cujas partículas estivessem revestidas pela pasta de cimento, verificadas pela existência de brilho. YAP *et al.* (2018) apontam essa técnica como o método mais assertivo ao concreto permeável, uma vez que as misturas não produzem *slump* significativo.

Sendo uma das prioridades na confecção de peças permeáveis a boa drenagem, uma segunda verificação foi estabelecida, a análise visual do escoamento de água corrente pelas amostras de concreto endurecido. Isso auxiliou na confirmação da eficácia de percolação para cada relação a/c. Definida a relação ótima, 8 traços foram adotados e apresentados na Tabela 1.

2.3 Procedimentos de mistura

O processo inicial de mistura se deu pela confecção da pasta de cimento com

TABELA 1

NOMENCLATURA DOS TRAÇOS DESENVOLVIDOS

Nome	Descrição
1:3,5/TC	Traço rico controle, 100% de pedrisco natural
1:3,5/T25	Traço rico, 25% de pedrisco reciclado
1:3,5/T50	Traço rico, 50% de pedrisco reciclado
1:3,5/T75	Traço rico, 75% de pedrisco reciclado
1:5,0/TC	Traço médio controle, 100% de pedrisco natural
1:5,0/T25	Traço médio, 25% de pedrisco reciclado
1:5,0/T50	Traço médio, 50% de pedrisco reciclado
1:5,0/T75	Traço médio, 75% de pedrisco reciclado

FONTE: FURINI (2021)

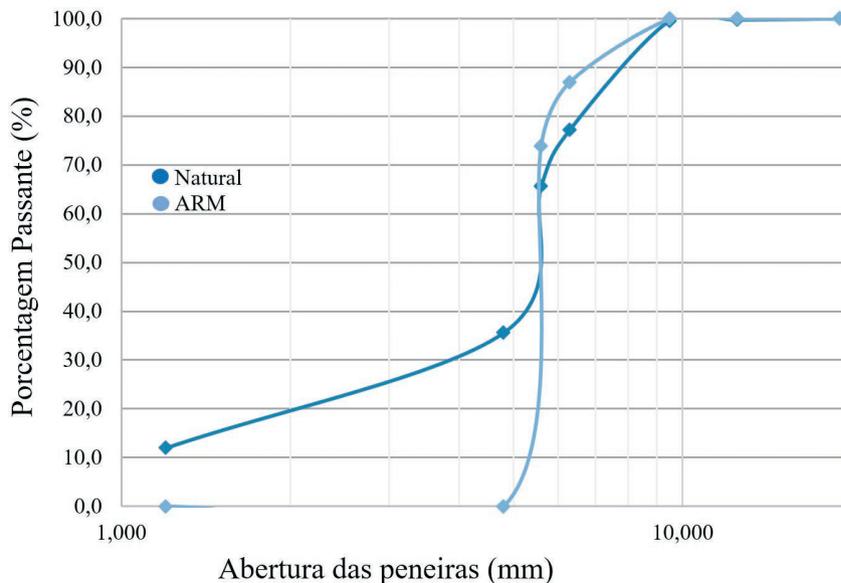


FIGURA 1

CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

FONTE: FURINI (2021)

adição de 70% da água, a fim de garantir a hidratação devida dos grãos, já que o ARM apresenta alta taxa de absorção de água intrínseca. Em seguida, metade da massa do agregado foi adicionada, possibilitando maior preenchimento de área superficial com nata. Por fim, o restante do agregado e da água foram adicionados. Foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos para cada traço, sendo 5 compactados com haste metálica e 5 com o pilão utilizado no ensaio de Proctor, a fim de comparar a influência da energia de compactação na resistência.

2.4 Validação dos traços

Para análise das propriedades dos concretos, foram realizados ensaios de: massa específica no estado fresco (ABNT NBR 9833:2008), resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018), resistência à tração na flexão (ABNT NBR 12142:2010) e permeabilidade (ABNT NBR 16416:2015), aos 28 dias.

2.5 Confecção do pavimento permeável

A aplicabilidade do trabalho em situações próximas da real se deu com a produção de *pavers* de concreto, seguindo as recomendações da dosagem estabelecida.

Os blocos foram assentados constituindo um “pavimento teste” nas dependências do IFSP/Votuporanga.

Atividades de limpeza, compactação e nivelamento do solo foram desenvolvidas, buscando atender a declividade mínima de 1% recomendada pela ABNT NBR 16416:2015. Após execução do pavimento, com intuito de determinar a taxa de infiltração da água *in situ*, o ensaio de permeabilidade foi realizado conforme a ABNT NBR 16416:2015.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização dos materiais

Os resultados de caracterização (Tabela 2) permitem identificar a absorção de água como o parâmetro de maior discrepância entre agregados natural e reciclado, o que é explicado pela heterogeneidade em sua composição. Comparando as curvas granulométricas (Figura 1), nota-se que o agregado natural é mais bem graduado que o ARM. Assim, infere-se que mistura com ARM será deficiente na questão de empacotamento das partículas, refletindo em menores resistências. Entretanto, pode ser positiva nos resultados de permeabilidade.

TABELA 2

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária solta (g/cm³)	Massa unitária compactada (g/cm³)	Absorção de água (%)	Índice de material fino (%)
Agregado natural	9,5	6	2,90	1,654	1,690	0	3,9
ARM	9,5	6	2,42	1,130	1,200	8,0	5,3
Especificações CP V ARI	Tempo de pega (mín.)		Resistência à compressão (MPa)				
	Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
	≥ 113	≤ 148	26,1	≥ 41,4	≥ 47,9	≥ 53,7	

FONTE: FURINI (2021)

3.2 Dosagem dos concretos permeáveis

A partir das porcentagens de substituição do agregado natural pelo ARM definidas, além das diferentes relações a/c estudadas, realizou-se a análise de consistência das misturas por meio da técnica “bola na mão”, procedimento visualizado na Figura 2.

Além da técnica tátil-visual, pequenas amostras de material foram produzidas para cada traço (Figura 3) para verificar o aspecto das misturas e o seu potencial drenante, sendo possível analisar a relação a/c, de modo a evitar excesso ou falta de pasta no conjunto. A falta de pasta resulta em misturas esfarelentas, por não ter adequada adesividade entre as partículas de agregado, e o excesso escorre para o fundo do molde, comprometendo a permeabilidade.

O traço rico (1:3,5) com 75% de substituição, nas relações a/c 0,50 e 0,55, proporcionaram boa drenagem. A partir da relação a/c de 0,60, houve excesso



FIGURA 2

VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA COM A TÉCNICA “BOLA NA MÃO”

FONTE: FURINI (2021)



FIGURA 3

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS: COESÃO E PERMEABILIDADE

FONTE: FURINI (2021)

de pasta e, assim, diminuição do potencial drenante. As outras porcentagens de substituição de ARM (25% e 50%) e a mistura controle tiveram o mesmo comportamento. Desta forma, considerando os resultados prévios de permeabilidade e compacidade das misturas e, a fim de manter a menor relação a/c, garantindo impacto positivo na resistência, a relação

a/c adotada para o traço rico foi de 0,55. Seguindo a mesma análise, adotou-se relação a/c de 0,65 para o traço médio. Assim, o consumo dos materiais das misturas é visualizado na Tabela 3.

3.3 Massa específica no estado fresco

Os resultados de massa específica no estado fresco das misturas estão na Tabela 4. Em comparação à prescrição da ABNT NBR 16416:2015, que especifica valores para concretos permeáveis na ordem de 1 600 kg/m³, constata-se que os traços 1:3,5/T75, 1:5,0/T50 e 1:5,0/T75 com método de compactação pela haste metálica não atendem o valor normativo. Porém, quando o método de adensamento é com o pilão, todas as misturas superam o valor especificado.

3.4 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão dos traços estão na Tabela 5. Verifica-se que, quando avaliadas as misturas adensadas pela haste, apenas o traço 1:3,5/TC, cuja resistência foi de

TABELA 3

CONSUMO DE MATERIAIS (KG/M³)

Traço	Pedrisco		Cimento	Água	a/c
	Natural	ARM			
1:3,5/TC	1 698,10	—	485,17	266,84	0,55
1:3,5/T25	1 273,58	424,52			
1:3,5/T50	849,05	737,79			
1:3,5/T75	424,53	1 106,70	373,86	243,01	0,65
1:5,0/TC	1 869,30	—			
1:5,0/T25	1 401,98	403,31			
1:5,0/T50	934,65	806,61			
1:5,0/T75	467,33	1 209,92			

FONTE: FURINI (2021)

TABELA 4

VALORES DE MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO POR TRAÇO (KG/M³)

Traço	Massa específica	
	(Haste)	(Pilão)
1:3,5/TC	2 479,90	2 415,97
1:3,5/T25	2 331,91	2 278,46
1:3,5/T50	2 304,02	2 188,06
1:3,5/T75	1 390,45	2 093,21
1:5,0/TC	1 711,06	2 346,58
1:5,0/T25	1 670,85	2 346,58
1:5,0/T50	1 463,32	2 093,84
1:5,0/T75	1 399,50	1 890,12

FONTE: SIMÕES (2021)

25,67 MPa, atende o valor mínimo exigido pela ABNT NBR 16416:2015, de 20 MPa. Já as misturas adensadas com pilão, todos os teores de substituição no traço 1:3,5 satisfazem a norma.

O comportamento normal das misturas é de redução da resistência à medida que se aumenta a proporção de substituição do agregado natural pelo reciclado. Em uma única situação, no traço 1:5,0/T25, a incorporação do resíduo contribuiu benéficamente para o ganho de resistência. Isso pode ser explicado pelo possível efeito de empacotamento da mistura, dada à alta presença de finos no ARM. Com relação à energia de compactação, há um incremento médio de 60% na resistência quando a compactação é feita com o pilão.

3.5 Resistência à tração na flexão

Considerando os resultados de resistência à compressão, optou-se por realizar o ensaio de tração na flexão somente nos traços adensados com o pilão. Apesar da norma brasileira não apresentar valores limites para a resistência à tração na flexão de peças de concreto permeável, os ensaios foram realizados a fim de verificar o possível uso do concreto em placas permeáveis. Tendo em vista as recomendações da ABNT NBR 16416:2015, que aponta valores de resistência à tração na flexão mínima, para placas de concreto permeável, de 1,0 MPa, para tráfego de pedestre, e de 2,0 MPa, para tráfego leve, os resultados obtidos (variando de 0,45 a 1,12 MPa) não condizem com o desempenho necessário. A influência do agregado reciclado é prejudicial à resistência à flexão, tornando inviável a aceitação do concreto para a confecção de placas.

TABELA 5

VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA (MPa)

Traço	Resistência à compressão (Haste)	Desvio padrão	Resistência à compressão (Pilão)	Desvio padrão
1:3,5/TC	25,67	2,26	31,77	2,15
1:3,5/T25	18,21	1,07	23,38	2,78
1:3,5/T50	13,58	0,14	22,77	2,18
1:3,5/T75	9,12	0,26	19,82	1,68
1:5,0/TC	12,18	0,31	14,30	1,43
1:5,0/T25	11,44	0,21	22,42	2,28
1:5,0/T50	8,00	0,12	16,95	1,05
1:5,0/T75	6,24	0,15	10,34	0,85

FONTE: SIMÕES (2021)

3.6 Permeabilidade

Os resultados de coeficiente de permeabilidade dos traços podem ser visualizados na Tabela 7. Considerando o valor mínimo estabelecido normativamente (0,1 cm/s), é possível afirmar que a dosagem alcançou a meta definida, já que a grande maioria das misturas apresenta permeabilidade superior ao mínimo. Fica evidente a evolução da permeabilidade à medida que o teor de substituição do agregado natural pelo natural aumenta.

Os traços médios apresentam maior permeabilidade quando comparados aos ricos, o que se explica pela maior proporção de agregado na mistura. Outra diferença está na energia de compactação, demonstrando que o uso de menor energia (adensamento pela haste) acarreta maiores coeficientes de permeabilidade, explicado pelo menor fechamento dos vazios.

3.7 Confecção do pavimento permeável

Para a confecção dos *pavers* permeáveis, o traço rico (1:3,5) foi escolhido, por seu melhor desempenho nos requisitos mecânicos e hidráulico analisados. Uma mistura controle serviu de base comparativa para uma mistura contendo 40% de ARM em substituição ao agregado natural. Apesar deste teor de substituição não ter sido efetivamente estudado, a interpolação das resistências obtidas entre as porcentagens de substituição 25% e 50% permitiu encontrar uma porcentagem na qual a resistência atenderia ao valor mínimo preestabelecido com a máxima substituição do agregado. Foram moldadas 50 peças de concreto retangulares (20 x 10 x 6 cm³) por traço, a fim de revestir uma área total de 1,0 m².

Após as atividades de limpeza e nivelamento do terreno, uma sub-base

(25 cm) foi produzida, composta por duas camadas, uma de brita 1 (20 cm) e a outra de areia grossa (5) com granulometria contínua e média, capaz de passar totalmente pela peneira de 9,5 mm. Essa preparação do terreno é essencial para contribuir com o papel drenante do pavimento e foi seguida pelo assentamento e arranjo dos blocos de concreto de forma intertravada.

Para verificar o desempenho hidráulico, requisitos normativos foram seguidos e o desenvolvimento do ensaio com o anel de infiltração pode ser visualizado na Figura 5. Dessa forma, obteve-se a taxa de infiltração (*k*) *in situ* de 7,17 cm/s para o *paver* com ARM e de 5,09 cm/s para a mistura controle; valores bem acima do 1,6 cm/s encontrado por interpolação nos corpos de prova estudados, fato também apontado por Junior (2019). Deve-se notar também a eficiência com relação à permeabilidade dos pavimentos com ARM, que supera em aproximadamente 40% o pavimento comum.

TABELA 6

VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)

Traço	Resistência à tração na flexão	Desvio padrão
1:3,5/TC	1,12	0,030
1:3,5/T25	0,81	0,030
1:3,5/T50	0,83	0,030
1:3,5/T75	0,84	0,100
1:5,0/TC	0,72	0,065
1:5,0/T25	0,63	0,005
1:5,0/T50	0,50	0,030
1:5,0/T75	0,45	0,050

FONTE: SIMÕES (2021)

TABELA 7

VALORES DO COEFICIENTE K DE PERMEABILIDADE (CM/S)

Traço	Permeabilidade média (haste)	Desvio padrão	Permeabilidade média (pilão)	Desvio padrão
1:3,5/TC	1,04	0,058	0,07	0,000
1:3,5/T25	1,42	0,005	0,47	0,011
1:3,5/T50	1,71	0,099	2,14	0,167
1:3,5/T75	2,62	0,100	2,49	0,068
1:5,0/TC	1,60	0,024	0,74	0,169
1:5,0/T25	1,85	0,144	1,94	0,167
1:5,0/T50	3,04	0,405	2,09	0,405
1:5,0/T75	3,85	0,146	3,30	0,088

FONTE: SIMÕES (2021)

e 1:5,0/T25). Além disso, dentre esses três traços, dois deles também atendem aos requisitos mínimo de desempenho hidráulico (1:3,5/T50 e 1:5,0/T25). Apesar de não ter sido possível alcançar a resistência à tração mínima, este não era um requisito prescrito para peças, apenas para placas, o que possibilita o uso de peças de concreto permeável com as misturas desenvolvidas. Finalmente, a produção do pavimento permeável possibilitou verificar a eficácia do *paver* reciclado no quesito percolação de água. Além disso, nota-se a contribuição da correta preparação da base que receberá o *paver* para que a permeabilidade se mantenha elevada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (PIBIFSP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). ☺

4. CONCLUSÕES

A incorporação do ARM na produção de *pavers* de concreto é vantajosa para seu desempenho hidráulico, uma vez que as misturas com substituições mais elevadas conseguiram superar em mais que 100% o coeficiente de permeabilidade das mistu-

ras controle. Os resultados de desempenho mecânico reafirmaram as proposições da literatura, visto que as resistências desejadas não foram facilmente alcançadas. Porém, foi possível desenvolver misturas, compactadas com o pilão, que atingiram a resistência prescrita por norma (1:3,5/T25, 1:3,5/T50

**FIGURA 4**

ETAPAS DE EXECUÇÃO DO PAVIMENTO PERMEÁVEL

FONTE: AUTORES (2022)

**FIGURA 5**

ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE K

FONTE: AUTORES (2022)

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FINOCCHIARO, Pedro S.; GIRARDI, Ricardo (2017). Concreto permeável produzido com agregado reciclado. Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana, Macaé, v. 5, n. 1, p. 19-26, jan. 2017.
- [2] JUNIOR, Adilson Campos de Paula. Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.
- [3] STRIEDER, H. L.; SASSI, L. M.; MERTEN, F. R. M.; SCHARDOSIM, J. M.; DUTRA, V. F. P.; GRAEFF, A. G. Avaliação do comportamento mecânico de concreto permeável com agregados de concreto reciclado. Anais: 62º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2020.
- [4] YAP, SoonPoh *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. Journal of Cleaner Production, v. 181, p. 155-165, 2018.