

Propriedades de betão drenante em misturas com agregados reciclados

Draining concrete properties in mixtures with recycled aggregates

J.M.C.B. Ximenes ^{a†}, J.L.B. Aguiar ^a, C.M.G. Jesus ^a, J.C. Pais ^b, V. Uher ^c

^a CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^b ISISE - Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^c Universidade de Tecnologia de Brno - Instituto de Tecnologia de Materiais de Construção e Componentes - Veveří 331/95, 602 00 Brno, República Checa

† Autor para correspondência: lebenei@yahoo.com

RESUMO

Os materiais de pavimento rígido com betão drenante, após sua construção, sofrem um processo de degradação sob a ação do tráfego e das condições climáticas. Esse processo, que ocorre durante a vida útil do piso, pode ser mais lento se for bem construído e mantido. Assim, é fundamental que a caracterização mecânica do betão seja adequada para a sua aplicação. Assim, os ensaios de trabalhabilidade e densidade devem ser realizados em relação ao betão fresco. No caso do betão endurecido, são os ensaios de resistência à compressão e flexão, os ensaios de permeabilidade e os ensaios de resistência ao desgaste. O betão permeável pode ser uma solução de segurança bem-sucedida para chuvas fortes e inundações cada vez mais frequentes. Este estudo teve como foco a obtenção de um betão permeável otimizado, dentro do escopo das normas internacionais, por meio da análise do betão feitos com as mesmas relações A/C e tempos de vibração e os diferentes percentuais de agregado reciclado. Os resultados mostram a forte influência de ambos os parâmetros sobre a distribuição de porosidade e permeabilidade e a influência negativa de porosidades mais altas sobre a resistência. O betão com relação de 0,30 W/C e tempo de vibração de 40 segundos e 20% de agregado reciclado foi selecionado por seu desempenho mecânico superior.

ABSTRACT

Rigid pavement materials with draining concrete, after construction, undergo a degradation process under the action of traffic and weather conditions. This process, which occurs during the life of the floor, can be slower if it is well constructed and maintained. Thus, it is essential that the mechanical characterization of the concrete is suitable for its application. Thus, workability and density tests must be carried out in relation to fresh concrete. In the case of hardened concrete, these are compressive and flexural strength tests, permeability tests and wear resistance tests. Pervious concrete can be a successful safety solution for heavy rains and increasingly frequent floods. This study focused on obtaining an optimized pervious concrete, within the scope of international standards, through the analysis of concrete made with the same W/C ratios and vibration times and different percentages of recycled aggregate. The results show the strong influence of both parameters on porosity and permeability distribution and the negative influence of higher porosities on strength. Concrete with a W/C ratio of 0.30 and a vibration time of 40 seconds and 20% recycled aggregate was selected for its superior mechanical performance.

Palavras-chave:

Betão permeável,
porosidade,
resistência,
durabilidade

Keywords:

Pervious concrete,
porosity, strength,
durability

1. Introdução

Em relação aos agregados reciclados, tem sido feito um esforço para aumentar o conhecimento sobre este material, para encontrar uma forma mais adequada de o utilizar. A incorporação de materiais reciclados no betão tem sido uma forma de atingir esse objetivo, pois a cada ano são produzidas toneladas de RCD (resíduos de construção e demolição) para o desenvolvimento da cidade. Com base na prevenção ambiental, os RCD são reciclados para uso na construção de pisos. Neste caso são utilizados para pavimentação de estradas [1].

A necessidade de reaproveitar esses resíduos se mostra de extrema importância tanto para a esfera ambiental em que os impactos causados ao meio ambiente são amenizados, quanto por questões econômicas. Neste estudo, que analisa a viabilidade de reaproveitamento de resíduos de construção, observa-se que há uma garantia em relação aos parâmetros de sustentabilidade [2].

Os sistemas de betão permeável permitem a recarga natural das águas subterrâneas e deixam a água evaporar do subsolo [3,4]. Além disso, os benefícios do pavimento de betão permeável incluem absorção acústica [5], diminuição do aquecimento superficial e efeito Ilha de Calor Urbano [6] e filtragem dos contaminantes na água [7].

Para reduzir os efeitos negativos das superfícies impermeáveis, o betão permeável surgiu como uma boa alternativa com sua estrutura porosa. Geralmente, o betão permeável possui baixa resistência devido à sua estrutura porosa, portanto seu uso em estradas de alto volume é muito limitado até ao momento. Muitos estudos têm sido realizados para aumentar a resistência mecânica do betão permeável. Existem basicamente dois métodos diferentes para aumentar a resistência do betão permeável. A primeira é aumentar a quantidade de ligante e a segunda é aumentar a resistência da pasta de cimento [8]. Em muitos estudos, agregados de menor tamanho têm sido usados para aumentar a resistência do betão permeável, aumentando a quantidade de ligante e verificou-se que a resistência mecânica aumenta com o uso de agregados de menor tamanho [8].

A permeabilidade prévia do betão varia de 11% a 35%, enquanto a porosidade varia de 15% a 25% [9]. A National Ready Mix Concrete Association (NRMCA) aponta um valor mínimo recomendado de porosidade de 15% [10].

O betão permeável proporciona vários benefícios ambientais importantes, como a redução do efeito de ilhas de calor urbanas, o reabastecimento de aquíferos e a redução efetiva do escoamento de águas pluviais [11].

Com grande importância e uso crescente em diferentes tipos de construção, os betões permeáveis são referenciados na Storm Water Technologies Fact Sheet Bioretention da United States Environmental Protection Agency para gerenciamento de escoamento de águas pluviais [12].

A resistência mecânica do betão permeável é inversamente proporcional à porosidade [13], ou seja, à medida que a porosidade aumenta, a resistência diminui. Portanto, é previsível uma variabilidade substancial em relação à resistência e desempenho estrutural, uma vez que ambos os parâmetros dependem diretamente da porosidade [14].

Sólidos avanços de conhecimento podem ser encontrados na literatura sobre o tema. Montes et al. [15] desenvolveram ensaios para determinar a porosidade, enquanto Zouaghi et al. [16] e Olek et al. [17] analisaram parâmetros mecânicos. O autor posterior [17] e Neithalath et al. [18] examinaram e caracterizaram os parâmetros acústicos do material.

Embora a porosidade seja amplamente aceite como um indicador de permeabilidade do pavimento, Neithalath et al. [18] demonstraram que outros parâmetros devem ser analisados para uma previsão precisa da permeabilidade.

Na literatura, para melhorar a qualidade dos agregados reciclados e o desempenho do betão agregado reciclado, destacam-se os três principais métodos técnicos: (i) remoção de argamassa de cimento residual [19 - 24], (ii) revestimento de agregados reciclados [25 - 30], (iii) métodos de mistura de betão em várias etapas com misturas pozolânicas [31 - 37]. Xuan et al. [38] relataram que o tratamento dos agregados reciclados por métodos de mistura de betão em várias etapas com aditivos pozolânicos é uma maneira eficiente e prática, em vez da remoção de argamassa velha aderida ou revestimento de agregados reciclados, que eram caros e demorados métodos com impactos ambientais secundários. Kisku et al. [37] investigaram as propriedades

mecânicas do betão agregado reciclado produzido com diferentes métodos de mistura de betão.

Devido às suas várias vantagens, os pavimentos de betão são amplamente utilizados em todo o mundo [39]. Para projetar os pavimentos de betão, vários métodos de projeto [40 - 44], são usados em diferentes países. Na maioria dos guias de projeto [40, 41 e 43], a fadiga da laje de betão e a erosão do suporte da laje são dois casos de falha comuns considerados no projeto. O projeto é feito para determinar a espessura da laje necessária para resistir à aplicação repetida de cargas por eixo durante a vida útil do pavimento. Além disso, a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a densidade são as propriedades importantes do betão usadas para determinar a espessura necessária do pavimento. Uma vez que as propriedades dos agregados, usados para preparar as misturas em betão, têm um impacto importante nas propriedades do betão usado no projeto, os valores de espessura necessários podem alterar significativamente com base no tipo de agregado usado.

Alcançar uma proporção adequada entre poros e desempenho mecânico levará a um betão permeável otimizado projetado para atender a requisitos específicos de desempenho. Portanto, para projetar um betão permeável otimizado utilizável em todos os locais com déficit de drenagem de água, é necessário conhecimento científico inovador relacionado à permeabilidade e distribuição de poros.

Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um betão permeável apto a ser aplicado em pavimentos rodoviários de betão com incorporação de agregados reciclados. O desempenho do betão permeável será avaliado por: i) características do betão fresco sobre trabalhabilidade através dos ensaios de abaixamento e Vêbê, densidade do betão fresco e teor de vazios de ar; ii) ensaios de betão endurecido; permeabilidade, porosidade por imersão, resistência à compressão, resistência à tração, ensaio de resistência à flexão.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Os betões permeáveis foram produzidos a partir de cimento, agregados finos e grossos, agregados reciclados e água. Os agregados foram produzidos por um processo específico para obtenção de grãos esféricos ou agregados arredondados (processo de base empírica), permitindo uma distribuição uniforme dos diferentes tamanhos de partículas no betão.

Considerando que o aumento da porosidade é acompanhado pela diminuição da resistência do betão permeável, a seleção do ligante é de vital importância. Foi utilizado cimento Portland (CEM I 42,5 R) [45], com as resistências à flexão e compressão tabela 1.

Tabela 1 - Resistência do Cimento Portland CEM I 42,5 R [45].

Idade (dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
2	5.6	31.8
7	7.5	47.0
28	8.5	55.5

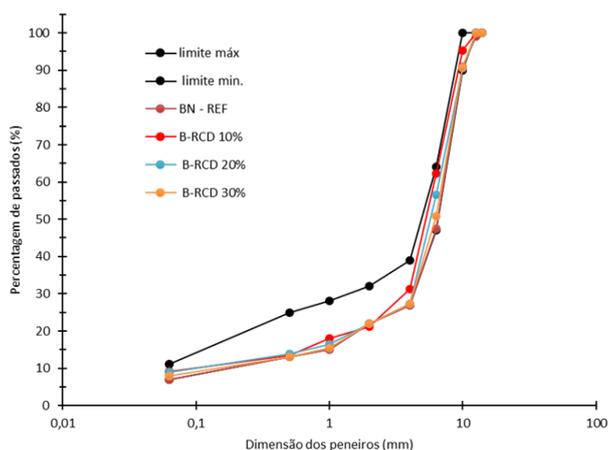
Os agregados utilizados na produção do betão foram uma mistura de fino (Agregado 0/4 mm), e agregado grossos normal e reciclado (Agregado 4/10 mm e agregado 10/14 mm) que permitiu obter a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 2 e Fig. 1, que segue as Especificações de Construção Portuguesas [46], e as propriedades dos agregados na Tabela 3.

Tabela 2 - Distribuição de tamanho de partícula agregado.

Abertura da peneira (mm)	0.063	4	10	14	16
Passagem Cumulativa (%)	1,5	13.5	45,9	39,1	100

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado.

Propriedade	Unidades	Padrão	Agregados		
			0/4	4/10	10/14
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016 [47]	2670	2660	2620
Resistência à fragmentação agregado normal	%	EN 1097-2:2011 [48]	-	20.64	23.17
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016 [47]	2670	2273	2242
Resistência à fragmentação Reciclado RCD	%	EN 1097-2:2011 [48]	-	36.16	36.9

**Figura 1** - Distribuição granulométrica de agregados normais e reciclados no fuso de misturas drenantes PA 12.5 (BBd) Betão betuminoso drenante [46].

Os betões permeáveis foram preparados para uma razão (A/C), respetivamente 0,30 e submetidos a tempos de vibração de 40 segundos. Com uma composição mostrada na tabela 4. Diferentes tipos dos provetes do ensaio de betão foram feitos. Para cada tipo de betão poroso foram confeccionados 9 provetes do ensaio cúbicos (150x150x150 mm), 9 (100x100x100 mm) e 9 prismáticos (100x100x400 mm), 4 (400x400x80 mm) e 4 (400x300x80 mm). O aspeto dos provetes do ensaio pode ser observado na fig. 2.

Tabela 4 - Misturas de betão permeável.

No. dos betões	Designação dos betões	CEM I 42,6	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14	RCD 4/14
1	BN-REF	300,0	22,0	1391,0	314,0	0
2	B-RCD 10%		22,9	1091,1	160,5	184,0
3	B-RCD 20%		22,6	929,6	136,8	368,0
4	B-RCD 30%		22,4	769,0	112,9	551,0

NB: A/C de 0,30 e Vibração de 40 segundos



Figura 2 - Aspetto dos provetes do ensaio confeccionados para relações de 0,35 W/C e 40 vibrações em segundos.

2.2. Metodologia

A metodologia de todos os ensaios é baseada na norma europeia. As etapas da preparação dos provetes na câmara de cura são os dimensionamentos do tipo de betão permeável e a marcação, para os ensaios de diferentes tipos de betões permeáveis produzidos em laboratório são as regras para guiar e avaliar com os seguintes procedimentos: i) ensaios de betão fresco para definir a trabalhabilidade através dos ensaios de; a) abaixamento b) Vêbê c) densidade do betão fresco e d) teor de ar. ii) ensaios do betão endurecido para analisar as resistências com os seguintes ensaios de; a) permeabilidade, b) porosidade por imersão, c) resistência à compressão, d) resistência à tração, e) resistência a flexão, f) desgaste com máquina de Los Angeles por cântabro.

O cone de Abrams convencional de slump ou abaixamento e o ensaio de trabalhabilidade e foi utilizado para avaliar o comportamento reológico do betão. O ensaio de queda seguiu a EN 12350-2 :2019 (Norma Europeia) [49].

O ensaio de Vêbê baseado na norma de EN 12350-3 2019 [50]. Um cone de queda foi colocado no recipiente do cilindro do equipamento de ensaio Vêbê. O betão foi derramado no cone, levantado verticalmente para verificar a queda do betão, uma vez preenchido. O resultado é o tempo, em segundos, necessário para moldar completamente o betão após o disco colocado no topo do betão e o vibrador elétrico acionado.

O betão fresco foi testado analisando e correlacionando a densidade fresca (EN 12350-6 :2019) [51] com o teor de ar (EN 12350-7 :2019) [52]. A densidade do betão fresco foi calculada usando a massa e o volume do recipiente conhecido. O mesmo recipiente foi usado para determinar o teor de ar do betão fresco.

Os ensaios de betão endurecido foram realizados utilizando os provetes do ensaio envelhecidos por 28 dias. Os diferentes tipos de provetes do ensaio foram ensaiados para caracterização física e mecânica, utilizando os procedimentos de acordo com a norma para cada tipo de ensaio realizado.

a) A permeabilidade do betão foi caracterizada e avaliada através da determinação do coeficiente de permeabilidade KFH (Coeficiente de queda de cabeça), segundo a norma NLT-327/00 (Norma del Laboratorio de Transporte) [53] Seguindo Neithalath et al. [54] e o padrão ACI 522R-10 (American Concrete Institute) [55], o ensaio Falling Head Permeability foi utilizado para este fim, provetes do ensaio cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) foram usados para ensaiar cada betão. Foram utilizados três provetes do ensaio para cada betão.

b) Para os ensaios de porosidade foram escolhidos provetes do ensaio para analisar a absorção de água por imersão no betão produzido, o cubo com dimensão de 100x100x100 mm com 28 dias de cura. O procedimento de ensaio foi adaptado, conforme NP 581-1969 [56], seguindo cuidadosamente todos os procedimentos de ensaio. Os provetes do ensaio foram colocados no recipiente com água de forma que ficassem imersos em 1/3 de sua altura, por um período de 24 horas; Os provetes do ensaio foram pesados até a condição de superfície saturada até a condição de massa seca e secos em estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C até massa constante e as massas para o cálculo foram registradas.

c) Foi utilizado equipamento hidráulico para determinar a resistência à compressão do

betão, cumprindo todas as instruções de acordo com a norma EN 12390-3 [57]. No caso deste ensaio, foi aplicada uma velocidade de 13,5 kN/s de acordo com o tamanho do provete de 150x150x150 mm.

d) Para o ensaio de tração os provetes do ensaio são cilíndricos de acordo com a norma EN 12390-1 [58], mas uma relação altura e diâmetro deve ser aceita pelas normas, EN 12350-1 [59] e EN 12390-2 [60] e EN 12390-6 [61] sobre a determinação da resistência à tração de provetes do ensaio.

e) Os provetes do ensaio para o ensaio de flexão são prismas de 100 x 100 x 400 mm conforme EN 12390-1 [58] e EN 12390-5 [62] e o procedimento segue as instruções da norma.

3. Resultados

3.1. Ensaio de betão fresco

A trabalhabilidade do betão foi avaliada pelos ensaios de abaixamento e vêbê (fig.3). Os resultados dos abaixamentos são 0 mm, e o Vêbê varia de 6,3 a 9,8 segundos, conforme mostrado na tabela 5 e o resultado mostra de normal trabalhabilidade. O aumento dos agregados reciclados reduz o resultado do ensaio Vêbê por isso definimos as percentagens do agregado reciclados para a analisar. Como os resultados do abaixamento, não foi possível estabelecer uma correlação entre os parâmetros de trabalhabilidade dos betões estudados.



Figura 3 - a) Equipamento de ensaio Vêbê, b) Ensaio Vêbê real.

Na Fig. 4 apresenta-se os resultados do ensaio de Vêbê, densidade do betão fresco e teor de ar. O teor de vazios de ar varia entre 3,2 a 8%, e a densidade varia entre 1973,3 kg/m³ a 2139 kg/m³, esses valores são consistentes com a literatura para betão permeável e mostrados em (Fig. 4a, 4b e 4c).

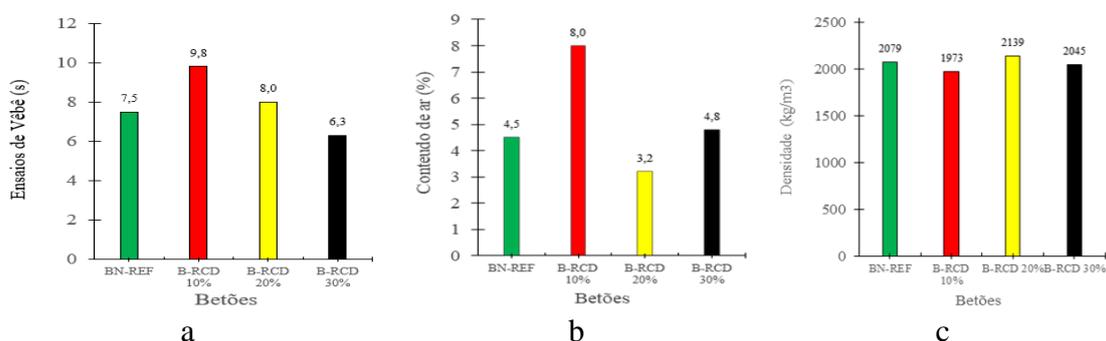


Figura 4 - Resultado do betão fresco a) ensaio de vêbê, b) conteúdo de ar, c) densidade do betão fresco.

Os resultados dos abaixamentos são zero e os valores médios dos resultados do ensaio de Vêbê estão entre 10 - 6 segundos para o ensaio de betão referência e betões de B-RCD (Fig.4). A melhor trabalhabilidade é verificada para betão de referência e para betão com maior percentagem de RCD. Isso se deve ao tamanho maior dos agregados reciclados em comparação com os

agregados normais (Fig. 4a).

Os valores apresentados na tabela 5 também mostram que o teor de vazios de ar é semelhante para 20%, 30% dos betões reciclados e de referência. Com 10% reciclado possuindo maior teor de vazios de ar, devido à maior porosidade desta mistura. Causada pela trabalhabilidade reduzida (Fig. 4b). As densidades das misturas são semelhantes com um valor menor para 10% de agregado reciclado confirmando a maior porosidade.

2.2. Ensaio de Permeabilidade do betão endurecido

Em relação a permeabilidade tem três ensaios de permeabilidade de KLCS (Coefficient Laboratories de Caminos de Santander), permeabilidade de KFH (Coefficient Falling Head) e permeabilidade conforme a Porosidade.

A permeabilidade do betão foi avaliada pelo ensaio de coeficiente KLCS conforme descrito na metodologia. Os resultados do ensaio são mostrados na tabela 6 e na fig. 5. Esses resultados de permeabilidade estão entre 4,6 a 12,9 mm/s expressos em função do fluxo de água. O betão com agregado reciclado apresenta menor permeabilidade devido à maior absorção de água desses agregados.

Os resultados das Tabelas 6 e Figuras 5a mostram os resultados entre 20 e 34 segundos, de acordo com o padrão. A permeabilidade do betão diminui com a incorporação de agregados reciclados devido à maior absorção de água desses agregados.

A permeabilidade obtida com o ensaio Falling Head Permeability (KFH) está indicada na Tabela 6 e Fig. 5 com os resultados de 2,5 -12 mm/s. Em comparação, o menor fluxo de água foi com agregado reciclado, e a referência é maior. No entanto, todos os testes estão na faixa de 11-35 segundos de acordo com a norma NLT-327/00 [53].

Os resultados da porosidade por imersão são mostrados na tabela 6 variam entre 18,6% e 21,9% e a Fig. 5 é uma comparação com padrão. Os menores valores foram alcançados pelo betão de BN-REF e os maiores pelo betão B-RCD. A porosidade por imersão se mantém com o aumento da proporção de agregado reciclado, o que significa que a porosidade aberta é semelhante.

Na Tabela 6 são apresentados a porosidade e o volume de vazios do betão com B-RCD. Há uma tendência de diminuição do volume de vazios com a incorporação de RCD. Isso se deve à maior absorção de água dos agregados reciclados. Na fig. 6 mostra os resultados normais em comparação com os ensaios do padrão e autores nos artigos publicados.

Na Fig. 7 é mostrada uma comparação entre as porosidades do padrão e os resultados de outro país na citação da autora Vanessa M. K. Há uma tendência para que as porosidades deste estudo sejam menores. Isto é devido à presença de agregados reciclados.

Tabela 6 - Resultado do Ensaio de permeabilidade e porosidade.

Betões	Permeabilidade K_{LCS}		Permeabilidade	Porosidade por
	Laje (mm/s)	Cubo (mm/s)	K_{FH} (mm/s)	Imersão (%)
BN-REF	28,9	12,9	12,0	18,6
B-RCD 10%	19,9	10,4	10,0	21,9
B-RCD 20%	19,6	4,6	2,5	18,6
B-RCD 30%	34,0	4,8	3,9	19,4

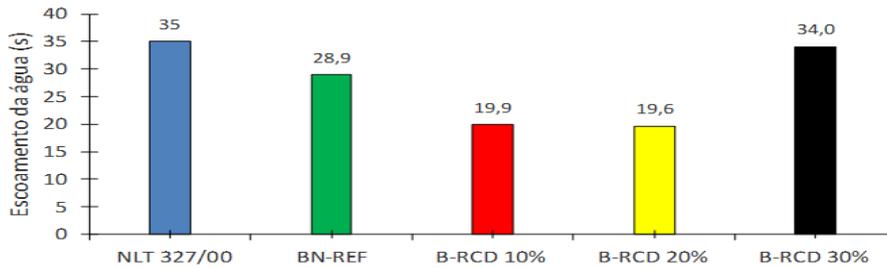


Figura 5 - Comparação do escoamento da água com o padrão [53].

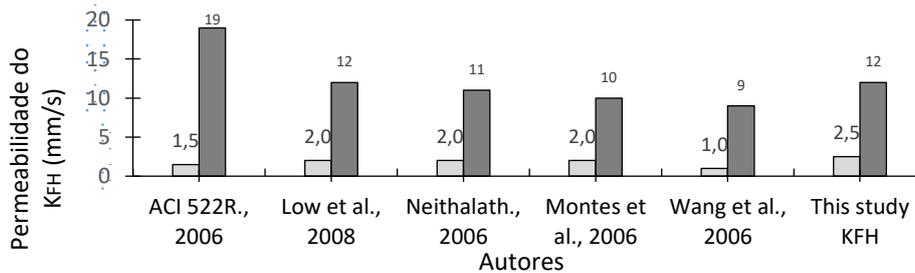


Figura 6 - Comparação da permeabilidade do KLCS e KFH com o padrão [55] e autores [63], [54], [64], [29].

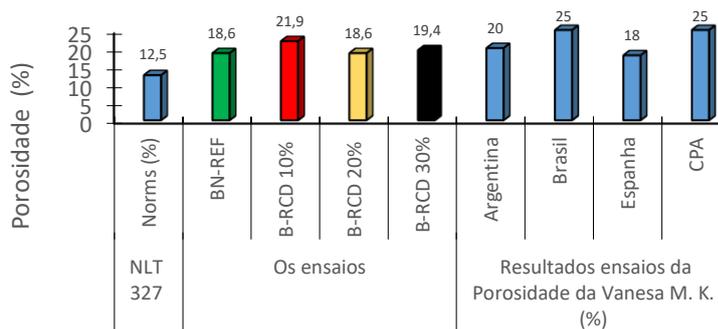


Figura 7 - Comparação da porosidade com a norma [53] e resultados da Autora Vanesa [65].

3.3. Ensaios mecânicos do betão endurecido

A Tabela 7 mostra os resultados de resistência à compressão para cada betão ensaiado. Com uma faixa de valores entre 8,9 a 21,7 MPa, os resultados mostram que os betões ensaiados atendem aos requisitos técnicos quanto ao parâmetro de resistência à compressão para pavimentos permeáveis.

Esses resultados mostram que os betões de referência atingiram maiores valores de resistência à compressão devido ao uso de agregados normais. Em relação aos resultados para o teor de vazios, os valores estão na faixa entre 18,6% e 21,9%. (Tabela 6).

Os valores obtidos para o betão com agregado reciclado estão abaixo do valor de 21,7 MPa. Isto está de acordo com a resistência à compressão obtida por autor A. Bonicelli [66].

Os ensaios de resistência à tração dos provetes do ensaio são cilíndricos de acordo com a EN 12390-1 [56], mas uma relação altura e diâmetro deve ser aceita pelas normas. EN 12390-2 [33] e 12390-6:2003 [59]. Os resultados mostram o valor entre 1,5 a 2,0 MPa. Isto está de acordo com o valor obtido por autor A Bonicelli [66].

Os ensaios de resistência à flexão nos provetes do ensaio são paralelepípedicos de acordo com a norma EN 12390-5, [60] mas a relação comprimento/largura e espessura deve ser aceita pelas normas. Verificou-se que para cada mistura de betão de BN-REF e B-RCD os resultados estão entre 2,1 a 4,3 MPa, conforme Tabela 7 e Fig. 10. A comparação com os resultados de autor

Cosic et al [67] mostra que o resultado é semelhante.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios mecânicos

Misturas	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmica (MPa)
Ref	21.7	1.5	4.3	3.96
10% RCD	8.9	1.6	2.1	2.51
20% RCD	18.6	2.0	3.7	3.67
30% RCD	16.7	1.9	3.6	3.25

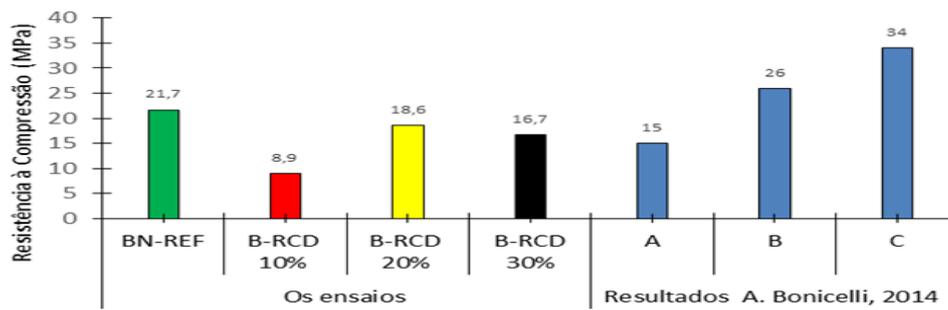


Figura 8 - Comparação do resultado da resistência à compressão.

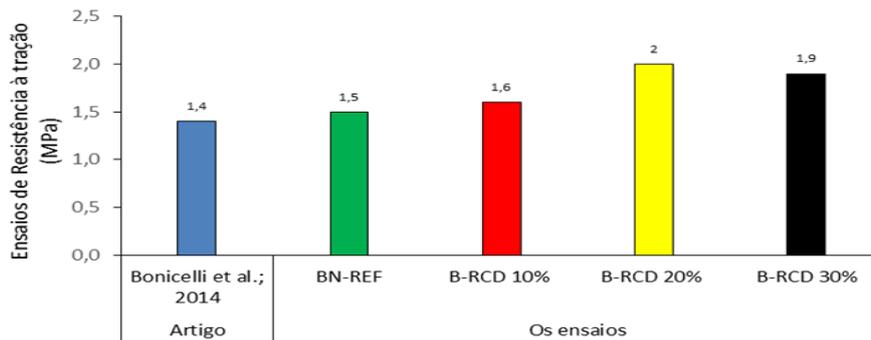


Figura 9 - Comparação do resultado dos ensaios de resistência à tração.

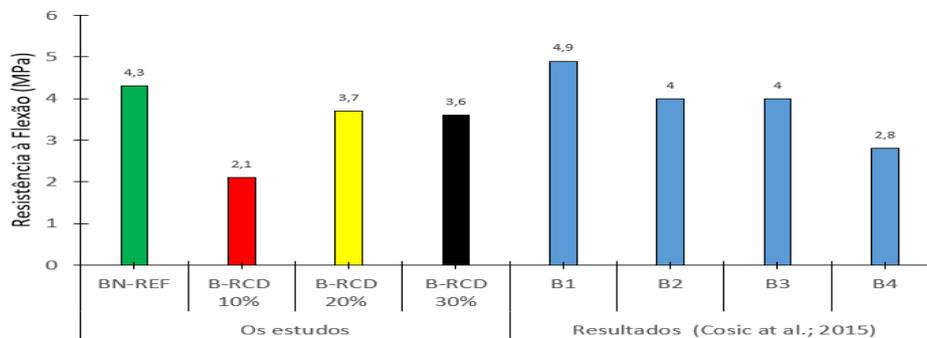


Figura 10 - Comparação do resultado do ensaio de resistência à flexão.

4. Discussão

A necessidade de reaproveitamento desses resíduos revela-se de extrema importância tanto para o meio ambiente, quanto por questões econômicas e em relação aos parâmetros de sustentabilidade.

Neste, análise dos ensaios, em geral os resultados apresentam “quanto maior a porosidade, menor será a resistência mecânica e maior a permeabilidade” e assim ao contrário.

5. Conclusões

Este artigo projetou e ensaiou três tipos dos betões de RCD (Resíduos de construção e demolição) com uma referência de betão permeável BN-REF para obter betão otimizado para pavimentação de estradas e melhorar a segurança removendo rapidamente as águas pluviais de sua superfície. Do estudo, foi possível concluir que:

- Os ensaios de abaixamento não permitiram estabelecer qualquer correlação entre os betões estudados porque o valor é 0 mm. No entanto, com base nos resultados do ensaio de Vêbê, a trabalhabilidade aumenta com a incorporação de agregados reciclados devido ao seu maior tamanho em relação aos agregados normais e reciclados.

- Em relação às variações dos parâmetros de permeabilidade em cada proporção de quatro misturas, detetou-se que os diferentes tipos dos betões de B-RCD influenciam neste parâmetro. No entanto, os resultados estão dentro dos limites da norma NLT -327/00 e EN 13108-7:2013. Assim também, os ensaios de permeabilidade do coeficiente de Falling Head KFH coeficiente do padrão ACI 522R-10

- Os volumes vazios ou porosidade, os valores estão entre 18,59 a 21,94% significa que está dentro dos limites da norma NP 581-1969.

- Pelos resultados apresentados e discutidos neste artigo, o betão permeável foi identificado como otimizado devido ao seu desempenho físico e mecânico, respeitando as especificações de permeabilidade.

- Os ensaios de caracterização mecânica mostraram que o betão de referência obteve maior resistência à compressão em relação à mistura RCD. Devido ao uso de materiais normais, o resultado apresentou a maior resistência à compressão (21,7 MPa). Os betões de B-RCD 30% resultam no resultado mais alto devido à porosidade mais baixa.

- Com valores que variam de 8,9 MPa a 21,7 MPa, foi comprovado que todos os betões ensaiados atendem aos requisitos de resistência à compressão do betão permeável.

- A necessidade de reaproveitamento desses resíduos revela-se de extrema importância tanto para o meio ambiente, quanto por questões econômicas e em relação aos parâmetros de sustentabilidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Adenda nº 20 ao Protocolo de Cooperação Cultural, Científica, Pedagógica e Institucional entre a Universidade do Minho e a Universidade Nacional de Timor Lorosa'e. O primeiro autor agradece o apoio da Universidade Nacional de Timor Lorosa'e esta investigação foi concluída com sucesso.

Referências

- [1] Leandro M. Souza, Cleber D. Assis, Silvia B. G. Souto, Agregado reciclado: um novo material da construção civil, 2014 <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/11297/pdf>.
- [2] A. Vanacker, Recycling of concrete at precast concrete plant, Paris, juliet, 55-67, 1996.
- [3] United States Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>
- [4] E. Nemirovsky, A. Welker, R. Traver, Evaporation from a previous concrete stormwater control measure: parameterization, quantifying, and evaluation, World Environmental and Water Resources Congress (2011) 3610-3619.
- [5] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, Characterizing enhanced porosity concrete using electrical

- impedance to predict acoustic and hydraulic performance, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 2074-2085.
- [6] L. Haselbach, M. Boyer, J.T. Keavern, V. Schaefer, Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems, *Transport research Records* 2240 (2011) 107-115.
- [7] J. Luck, S. Workman, M. Coyne, S. Higgins, Solid material retention and nutrient reduction properties of pervious concrete mixture, *Biosystems Engineering* 100 (2008) 401-408.
- [8] J. Yang, G. Jiang, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 381–386, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).
- [9] CIP 38 - Pervious Concrete, National Ready Mixed Concrete, NRMCA, 66 Canal Center Plaza, Suite 250, Alexandria, VA 22314, 2004. <https://www.nrmca.org/>.
- [10] B. Debnath, P.P. Sarkar, Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review, *Int. J. Pavement Eng.* 8436 (2018). <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217>.
- [11] S.V. Bittencourt, M. da Silva Magalhães, M.E. da Nóbrega Tavares, Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate, *Case Stud. Constr. Mater.* 14 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00473>.
- [12] Epa, Storm Water Technology Fact Sheet Bioretention, Epa. (1999) 8. <https://doi.org/832-F-99-006>.
- [13] O. Deo, N. Neithalath, Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, *Mater. Sci. Eng. A.* 528 (2010) 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>.
- [14] L. Crouch, M. Cates, V. Dotson, K. Honeycutt, D. Badoe, Measuring the Effective Air Void Content of Portland Cement Pervious Pavements, *Cem. Concr. Aggregates*, 25 (2003) 1–5. <https://doi.org/10.1520/CCA10516J>.
- [15] S.W. Dean, F. Montes, S. Valavala, L. Haselbach, A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete, *J. Astm Int.* 2 (2005). <https://doi.org/10.1520/JAI12931>.
- [16] A. Zouaghi, M. Kumagai, T. Nakazawa, Fundamental study on some properties of pervious concrete and its applicability to control stormwater run-off, 22 (2000) 43–50.
- [17] J. Olek, W.J. Weiss, N. Neithalath, A. Marolf, E. Sell, W. Thornton, Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials, (2003). <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/16086>.
- [18] W.D. Martin, N.B. Kaye, B.J. Putman, Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 59 (2014) 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034>.
- [19] Tam, V. W. Y., Tam, C. M., and Le, K.N, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1) (2007) 82–101.
- [20] S. Ismail, M. Ramli, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 464–476.
- [21] P. Saravanakumar, K. Abhiram, B. Manoj, Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 611–617.
- [22] Y. Kim, et al., Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates-comparative assessment of assorted techniques. *Journal of Cleaner Production*, 191 (2018) 339–349.
- [23] F. Kazemian, H. Rooholamini, A. Hassani, Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 690–700.
- [24] H. Dilbas, Ö. Cakır, H. Yildirim, An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method. *Construction and Building Materials*, 252 (2020) 119118.
- [25] E. Güneş, et al., Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 172–183.

- [26] Y. C. Liang, et al., Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5) (2015) 04014163.
- [27] C. Shi, et al., Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*, 86 (2018) 130–138.
- [28] W. M. Shaban et al., Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 216 (2019) 632–647.
- [29] J. Wang et al., Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 234 (2020) 117366.
- [30] W. M. Shaban et al., Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 276 (2021) 121940.
- [31] V. W. Y. Tam, C. M. Tam, Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, 42(10) (2007) 3592–3602.
- [32] J. Li, H. Xiao, Y. Zhou, Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1287–1291.
- [33] S. Pradhan, S. Kumar, S. Barai, Recycled aggregate concrete: Particle packing method (PPM) of mix design approach. *Construction and Building Materials*, 152 (2017) 269–284.
- [34] W. Zhang, et al., Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 203 (2019) 60.
- [35] Y. Yue, et al., An industrial applicable method to improve the properties of recycled aggregate concrete by incorporating nano-silica and micro-CaCO₃. *Journal of Cleaner Production*, 259 (2020) 120920.
- [36] N. Kisku, et al., Development of durable concrete from C&D waste by adopting identical mortar volume method in conjunction with two-stage mixing procedure. *Construction and Building Materials*, 256 (2020) 119361.
- [37] N. Kisku, et al., Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach. *Structures*, 24 (2020) 742–753.
- [38] D. Xuan, B. Zhan, C. Poon, Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65 (2016) 67–74.
- [39] Y. Abut et al., A comparative study on the performance of RCC for pavements casted in laboratory and field. *International Journal of Pavement Engineering*, (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1823391>.
- [40] Portland Cement Association, Thickness design for concrete highway and street pavements. Skokie, IL: PCA, USA, 1984.
- [41] AASHTO, Guide for design of pavement structures. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [42] CROW, Design software for concrete roads (VENCON 2.0, CD ROM D925) [Computer softw], 2004.
- [43] AASHTO, Mechanistic empirical pavement design guide. A manual of practice-interim edition. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [44] Indian Roads Congress, 2015. Guidelines for the design of plain jointed Rigid pavements for highways. In: IRC 58, Indian Roads Congress, New Delhi, India, June, Fourth revision, 2015.
- [45] SECIL, Supratek Cimento Portland, Fábrica Maceira-Liz, 2018.
- [46] EP - Estradas de Portugal, Pavimentação Características dos materiais, Cad. Encarg. Tipo Obra. 03 (2014) 125.
- [47] NP EN 1097-6:2000. Test for mechanical and physical properties of aggregate part 6: Determination of particles density and water absorption, 2000.
- [48] NP EN 1097-2:2002. Los Angeles Machine Wear Resistance Test Instituto Português da Qualidade, p. Caparica, Lisboa, 2002.
- [49] EN 12350-2, Testing fresh concrete. Slump test, BSI. 2019.
- [50] EN 12350-3, Testing fresh concrete. VB test, 2019.

- [51] EN 12350-6, Testing fresh concrete. Density, 2019.
- [52] EN 12350-7, Testing fresh concrete. Air content. Pressure methods, 2019.
- [53] NLT-327/00, Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes mediante permeámetro LCS, Espana, 2000.
- [54] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements, ResearchGate. (2006) 1–22.
- [55] ACI 522R-06, Pervious Concrete, 2010.
- [56] NP- 581:1969, Determination of volumic masses and water absorption of aggregates and stones; standard written in Portuguese, 1969.
- [57] EN 12390-3, 2003. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, BSI. (2019) 24. standard written in portuguese.
- [58] EN. 12390-1: 2003, Tests of hardened concrete part 1: Shape, dimensions and other requirements for testing specimens and molds, 2003; standard written in portuguese.
- [59] EN. 12350-1: 2002, Fresh Concrete Tests Part 1: Sampling, 2002; standard written in portuguese.
- [60] EN. 12390-2, Tests of hardened concrete. Part 2: Execution and curing of specimens for mechanical strength tests. 2009; standard written in portuguese-
- [61] IPQ, NP EN 12390-6, Tests of hardened concrete - Part 6: Tensile strength by compression of specimens. for. 14, 2003: standard written in portuguese.
- [62] NP EN 12390-5, Hardened concrete, bending strength pdf.
- [63] Low K, Harz D, Neithalath N. Statistical characterization of the pore structure of enhanced porosity concrete, Proceedings in CD of the 2008 Concrete Technology Forum, Denver, National Ready Mix Concrete Association, 2008.
- [64] Montes, L. Haselbach, Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete, Environ. Eng. Sci., 23 (2006) 960–969.
- [65] V. D. L. F. Francisco, A Drenagem Superficial e o seu Impacto Funcional e Estrutural na Vida dos Pavimento, Universidade de Porto, 2009.
- [66] A. Bonicelli, F. Giustozzi, M. Crispino, M. Borsa, Investigation on the functional and mechanical performance of differentially compacted pervious concrete for road pavements, (2014) 265–272.
- [67] K. Ćosić, L. Korat, V. Ducman, I. Netinger, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, Constr Build Mater 78 (2015) 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>.

ORCID

J.M.C.B. Ximenes	0000-0002-5749-553X (https://orcid.org/0000-0002-5749-553X)
J.L.B. Aguiar	0000-0003-3954-5721 (https://orcid.org/0000-0003-3954-5721)
C.M.G. Jesus	0000-0001-5119-3867 (https://orcid.org/0000-0001-5119-3867)
J.C. Pais	0000-0002-7555-1195 (https://orcid.org/0000-0002-7555-1195)