

DESEMPENHO EM MISTURAS DRENANTES NA PREVENÇÃO DE ZONAS COM ELEVADO RISCO DE ÁGUA

JOSÉ XIMENES^{1*}, CARLOS DE JESUS¹, JOSÉ AGUIAR², JORGE PAIS²

1: C-TAC – Centre for Territory, Environment and Construction
University of Minho, Campus of Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
ld7465@alunos.uminho.pt , cjesus@civil.uminho.pt

2: C-TAC – Centre for Territory, Environment and Construction
University of Minho, Campus of Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
aguiar@civil.uminho.pt , jpai@civil.uminho.pt

Resumo. *A rápida alteração do clima tem diversas consequências pelo mundo, inclusive nos grandes centros urbanos. Chuvas intensas, como as que ocorreram em diversos países, são relacionadas com danos na infraestrutura urbana e associados a riscos à sua segurança, tornando-se comuns no futuro, relacionados com alterações climáticas. A permeabilidade nos pavimentos rodoviários, particularmente nos pavimentos rígidos de drenagem que os compõem, assume um papel relevante em seu desempenho, influenciando aspetos como segurança e conforto na circulação dos veículos e a durabilidade da vida útil. O impacto da distribuição de permeabilidade de diversas misturas de betão drenante, teve como objetivo de otimizar uma mistura ideal para drenar a água segundos os requisitos técnicos normativos. Realizaram-se diversas misturas drenantes com diferentes razões A/L (0.30;0.35;0.40), relacionando estas com os diferentes tempos de vibração (20; 40; 60 segundos) dos provetes submetidos a diversos ensaios e análises. A porosidade demonstrou ter uma correlação com a escoamento da água, permitindo uma análise da relação entre a permeabilidade e a resistência a compressão do betão, de forma a justificar os requisitos técnicos de segurança, conforto e economia. A investigação destaca a forma de colmatar zonas défcies de escoamento e prevenindo de uma forma os resultados das alterações climáticas.*

Palavras-chave. *Pavimento, Permeabilidade, Porosidade, Escoamento, Resistência*

Summary. *The rapid change in climate has several consequences around the world, including in large urban centers. Intense rains, such as those that occurred in several countries, are related to damage to urban infrastructure and associated with risks to its safety, becoming common in the future, related to climate change. The permeability in road pavements, particularly in the rigid drainage pavements that compose them, plays an important role in their performance, influencing aspects such as safety and comfort in the circulation of vehicles and the durability of the useful life. The impact of the permeability distribution of different draining concrete mixes, aimed to optimize an ideal mix to drain water according to normative technical requirements. Several drainage mixtures were performed with different A/L ratios (0.30;0.35;0.40), relating these to the different vibration times (20; 40; 60 seconds) of the specimens subjected to different tests and analyses. Porosity was shown to be correlated with water flow, allowing an analysis of the relationship between permeability and compressive strength of concrete, in order to justify the technical requirements of safety, comfort and economy. The research highlights how to fill runoff areas and prevent the results of climate change in a way.*

Keywords. *Pavement, Permeability, Porosity, Flow, Resistance*

1. Introdução

Hoje em dia, a sociedade está focada nos riscos associados às mudanças climáticas, levando a mudanças severas, generalizadas e irreversíveis nas economias e ecossistemas em todo o mundo [1]. Um dos efeitos mais frequentes das mudanças climáticas são as fortes chuvas que produzem transbordamentos nos rios e consequentes inundações em aterros, ruas e rodovias. As consequências desses fenômenos são graves, tanto para as populações quanto para a infraestrutura por isso, soluções que os minimizam têm sido implementadas. Uma delas é a aplicação de superfícies porosas para drenar a água acumulada na superfície do pavimento.

Os betões permeáveis são materiais de crescente importância nas tecnologias de construção, utilizados atualmente para construir instalações e infraestruturas sustentáveis e reduzir os riscos de inundações urbanas. O betão permeável pode ser encontrado em todo o mundo na pavimentação de estradas, estacionamento, calçadas, viadutos, ciclovias ou canais de drenagem à beira da estrada. Também é usado em parques de lazer e áreas residenciais, principalmente devido à sua alta permeabilidade e boas propriedades térmicas [2].

O betão poroso é um material de construção sustentável feito de materiais amplamente disponíveis e de fácil manuseio [3]. Contribui para a sustentabilidade ambiental de forma positiva removendo da água superficial os poluentes da primeira descarga (por exemplo, óleo do motor ou líquidos anticongelantes), reduzindo os riscos de contaminação de águas subterrâneas e lagos próximos.

Tennis et al. [4] mostram que o betão permeável apresenta alto desempenho na remoção de poluentes da água. 82 e 95% das taxas de remoção de poluentes sólidos em suspensão foram alcançadas por [5]. Com base nesses resultados, e de acordo com vários autores, os pavimentos porosos podem aumentar a segurança da circulação, evitando o acúmulo de água, reduzindo os riscos de aquaplanagem, ou reduzindo o encravamento da superfície, o brilho ou mesmo o escorregamento [6].

Segundo Hendrickx [7], o betão permeável também reduz o ruído da estrada. A estrutura de material poroso permite um fácil escape do ar preso entre os pneus e o pavimento, causando um ruído rodoviário de menor frequência.

Com grande importância e uso crescente em diferentes tipos de construção, os betões permeáveis são referenciados no Storm Water Technologies Fact Sheet Bioretention da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para gerenciamento de escoamento de água da chuva [8 e 9].

No entanto, mais inovação no uso de tal material requer conhecimento de permeabilidade. Este parâmetro está diretamente relacionado à porosidade e deve ser estudado em conjugação com a resistência do material. Assim, é fundamental prevenir efetivamente o acúmulo de água nas estradas e manter as condições de serviço do pavimento.

Pesquisas adicionais sobre parâmetros de projeto e desempenho são essenciais para atingir um desempenho superior de betão permeável para pavimentos rodoviários.

A resistência mecânica do betão permeável é inversamente proporcional à porosidade [10], o que significa que à medida que a porosidade aumenta, a resistência diminui. Portanto, a variabilidade substancial é previsível em relação à resistência e ao desempenho estrutural, uma vez que ambos os parâmetros dependem diretamente da porosidade [11].

Normalmente, a porosidade varia de 15% a 35% do volume total, o que significa que a quantidade de porosidade é um parâmetro muito importante e afeta a permeabilidade, as propriedades mecânicas e a durabilidade do PCPC [12].

Avanços de conhecimento sólido podem ser encontrados na literatura sobre este assunto [13] desenvolveram testes para determinar a porosidade, enquanto [14] e [15] analisaram parâmetros mecânicos. Os autores [15] e [10] examinaram e caracterizaram os parâmetros acústicos do material.

A permeabilidade do betão permeável varia de 11% a 35%, enquanto a porosidade varia de 15% a 25% [16]. National Ready Mix Concrete Association (NRMCA) aponta um valor mínimo recomendado de 15% [17].

Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um betão permeável que possa ser aplicado em pavimentos de betão rodoviário. Este desenvolvimento de betão será realizado por meio de testes de três relações W/C e três tempos de vibração.

Taheri et al. [18] utilizaram custo unitário dos ingredientes para este tipo de mistura, concluíram que o W/C não teve efeito significativo no custo unitário do betão permeável, embora tenha um efeito considerável na resistência.

O desempenho do betão permeável será avaliado por: i) trabalhabilidade através dos ensaios de

abaixamento e vebe; ii) densidade do betão fresco e índice de vazios de ar; iii) resistência à compressão; iv) resistência à abrasão; v) porosidade por imersão; vi) permeabilidade.

No estudo, foi escolhido um agregado adequado em termos de forma. Segundo [19] a porosidade é o principal fator para estimar a eficiência do betão permeável, sendo o desempenho mais afetado pelo tipo de agregado do que pelo tamanho.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1 Materiais

Betões porosos foram produzidos a partir de cimento, agregado mineral de granulação fina e grossa e água. Nenhum aditivo foi adicionado ao betão. Os agregados foram produzidos por um processo específico de obtenção de grãos esféricos ou em forma de agregado arredondado (processo de base empírica), permitindo uma distribuição uniforme dos diferentes tamanhos de partículas no betão.

Considerando que o aumento da porosidade coincide com a diminuição da resistência do betão permeável, a seleção do ligante é de vital importância. Foi utilizado cimento Portland (CEM I 42,5 R) [20].

Os agregados utilizados na produção do betão foram uma mistura de fino (agregado 0/4 mm) e grosso (agregado 4/10 mm e agregado 10/14 mm) que permitiu obter a distribuição granulométrica conforme a especificações da construção das Estradas de Portugal [21].

Os provetes foram preparados com diferentes relações água/cimento (A/C), respetivamente 0,30, 0,35 e 0,40, e submetidos a diferentes tempos de vibração durante 20, 40 e 60 segundos. Para cada betão, foram confeccionados 3 provetes cúbicos (150 × 150 × 150 mm), totalizando 27 provetes.

2.2 Metodologia

Para o dimensionamento do betão permeável, foram ensaiados os 9 betões permeáveis produzidos em laboratório para avaliação de: i) trabalhabilidade através do ensaio de abaixamento e Vebe; ii) densidade do betão fresco e índice de vazios de ar; iii) resistência à compressão; iv) resistência à abrasão; v) porosidade por imersão; vi) permeabilidade.

O teste convencional de abaixamento e o ensaio de Vebe foram usados para avaliar o comportamento reológico do betão.

O ensaio de abaixamento seguiu um padrão europeu (EN 12350-2) [22]. O betão foi derramado em um cone de metal em três camadas. Cada terço da altura do cone foi submetido a vinte e cinco compactações com a haste de compactação padrão. O abaixamento foi determinado pela diferença entre a altura do molde e o betão assentado.

O ensaio de vebe seguiu um padrão europeu (EN 12350-3) [23]. Um cone de abaixamento foi colocado no recipiente do cilindro do equipamento de ensaio de vebe. O betão foi derramado no cone, levantado verticalmente para verificar a queda do betão depois de preenchido. O resultado é o tempo, em segundos, necessário para remodelar completamente o betão após a colocação do disco no topo do betão e o acionamento do vibrador elétrico.

O betão fresco foi ensaiado analisando e correlacionando a densidade fresca (EN 12350-6) [24] com o conteúdo de vazios de ar (EN 12350-7) [25]. Um recipiente com volume e peso conhecidos foi preenchido com betão e vibrado. Em seguida, o excesso de betão foi retirado e o recipiente foi pesado. Cada massa de betão (m_1) foi determinada subtraindo o peso conhecido do recipiente do peso total. A densidade do betão fresco foi calculada a partir da massa (m_1) e do volume conhecido do recipiente. O mesmo recipiente foi usado para determinar o conteúdo de ar do betão fresco.

A porosidade aberta de misturas de betão permeável foi calculada com base nas seguintes normas europeias, EN 12390-7 [26] e EN 1097-6 [27]. Três provetes de cada tipo de mistura com dimensões 100x100x100 foram utilizados para estudar a porosidade a fim de se obter uma média de valores

adequada. A densidade aparente seca de cada provete foi obtida e a densidade real. Com base nesses parâmetros, a porosidade aberta foi obtida.

Os diferentes betões foram ensaiados para caracterização mecânica, utilizando provetes envelhecidos 28 dias.

A resistência à compressão foi avaliada por compressão seguindo a (EN 12390-3) [28]. A resistência à abrasão foi avaliada usando o teste de abrasão Cântabro seguindo uma norma (NLT-362) [29], em que a massa perdida após 300 rotações a uma velocidade de 33 rpm no tambor Los Angeles é medida. Quanto menor for o resultado do ensaio Cântabro, melhor será a resistência à abrasão.

A permeabilidade do betão foi caracterizada e avaliada através da determinação do coeficiente de permeabilidade KFH, de acordo com a norma (NLT-327) [30]. Seguindo Neithalath e Olek [31, 15] e a norma do relatório (522R-06) [32], o ensaio de Permeabilidade de falling Head foi usado para esse fim, conforme ilustrado na Figura 19a. provetes cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) foram usados para ensaio de cada betão. Três repetições foram utilizadas para cada betão.

Cada provete (com seção transversal de CA) foi conectado a um cilindro graduado (com seção transversal de AP), preenchido com água até atingir a marca desejada. O vazamento lateral foi evitado selando a amostra dentro de uma luva extensível (ver Figura 19b).

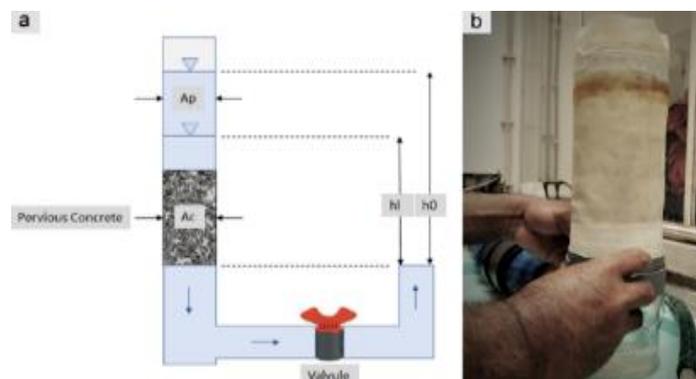


Figura 19. (a) Esquemas do aparelho de ensaio KFH e (b) imagem da preparação do provete

A água passa pelo corpo do provete, sendo registada a distância de percurso L (mm) e o tempo t (s). Os espaços do tubo e provete são cheios com água até uma determinada altura h0 (mm), caindo até atingir um ponto pré-determinado h1 (mm). O tempo é registado a partir da abertura da válvula e para quando atinge h1. O coeficiente k de permeabilidade foi calculado usando a equação de Darcy (Eq. 1) [33]:

$$K = \frac{A_p \times L}{A_c \times t} \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (1)$$

O fluxo e a permeabilidade foram determinados por meio do ensaio de permeâmetro LCS, seguindo o procedimento (NLT-327) [30] padrão espanhol, conforme mostrado na Figura 20, usando amostras cúbicas de 150 × 150 × 150 mm³. Três repetições por betão foram ensaiadas. O tempo foi registado para o fluxo de um determinado volume de água através de um orifício de 3 cm de diâmetro. A vazão resultou da perda de carga hídrica, quantificada pelo coeficiente de permeabilidade KLCS.

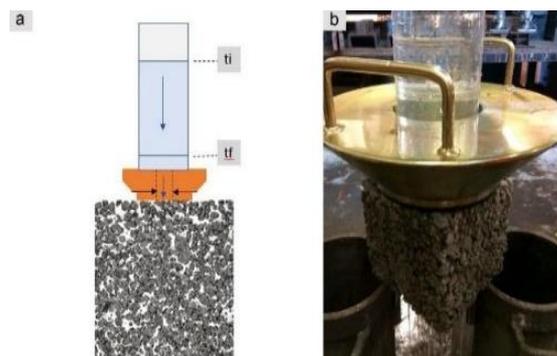


Figura 20. (a) Esquemas e (b) imagem do permeâmetro usado para quantificar o fluxo (NLT-327)

O coeficiente de permeabilidade (K_{LCS}) foi calculado com base no tempo de fluxo T (em segundos), de acordo com a equação (2):

$$\ln(K_{LCS}) = 7.624 - 1.348 \ln(T) \quad (2)$$

A equação 2 permite a caracterização da permeabilidade do betão permeável e valida os coeficientes calculados de acordo com os requisitos técnicos para pavimentos permeáveis definidos em uma norma europeia (EN 13108-7) [34].

Os betões foram testados quanto à porosidade de imersão, seguindo uma norma europeia ("EN-12390-7) [26], e utilizando os provetes cúbicos. Cada amostra foi inicialmente saturada. Em seguida, as faces laterais foram seladas com uma luvas extensível. Por fim, a face inferior foi colocada sobre uma placa de acrílico e as juntas resultantes foram seladas com silicone.

O peso de cada provete saturado com a configuração completa foi registado. Posteriormente, a membrana foi preenchida com água e pesada. O peso da água adicionada é a diferença entre as duas pesagens. O valor alcançado é quantificado como percentagem de poros.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. Trabalhabilidade de betão permeáveis

A trabalhabilidade do betão anterior foi avaliada pelos ensaios de abaixamento e V_b , ver Figura 21 Fig. 4a e 4b. Os resultados do ensaio de abaixamento mostram um valor constante de 0, consistente com o comportamento de trabalhabilidade típico para betões permeáveis.



Figura 21. (a) Abaixamento e (b) ensaio de Vêbê

Os resultados dos ensaios de Vêbê variam de 6,17 a 9,67 s, indicando que à medida que a relação a/c das misturas aumenta, o valor dos ensaios de V_B diminui. O aumento do a/c reduz o resultado de ensaio de Vêbê. Como os resultados do abaixamento foram 0, não foi possível estabelecer correlação entre os parâmetros de trabalhabilidade dos betões estudados.

3.2 Densidade de betão fresco e conteúdo de ar

A Figura 22 apresenta os resultados da densidade do betão fresco e do teor de ar. A densidade varia entre 1886 kg / m³ e 2.088 kg / m³, enquanto o conteúdo de vazio de ar varia entre 4 e 7%. Esses valores são consistentes com a literatura para betão permeável [17].

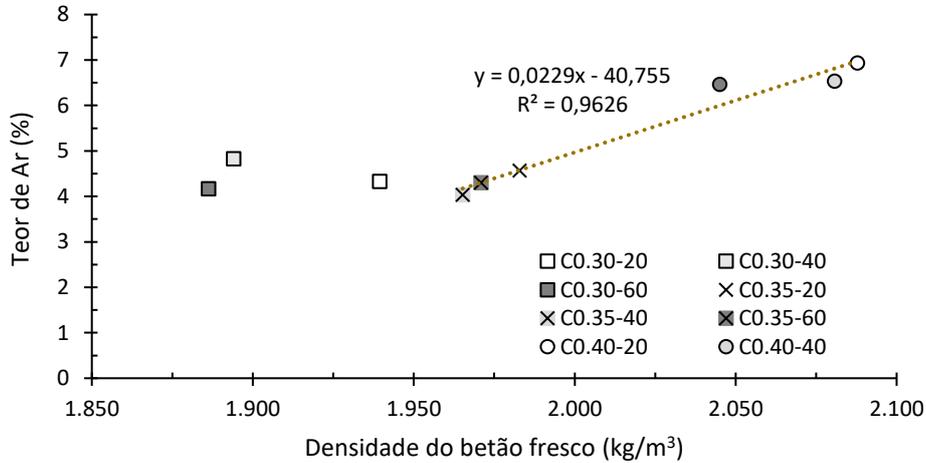


Figura 22. Correlação entre o conteúdo de ar e a densidade do betão fresco

Os valores apresentados na Figura 22 também mostram que o teor de vazios de ar é semelhante para os betões C0.30 e C0,35, sendo que o C0.40 apresenta maior teor de vazios de ar, provavelmente devido à melhora da trabalhabilidade desta mistura. Parece que existe uma correlação linear entre o conteúdo de vazios de ar e a densidade para betões com um a/c ≥ 0,35.

3.3 Porosidade

Os resultados da porosidade, apresentados na Figura 23, estão na faixa entre 20,1% e 24,6%. Os menores valores foram obtidos com o betão C0,40-40 e os maiores com o betão C0,30-40.

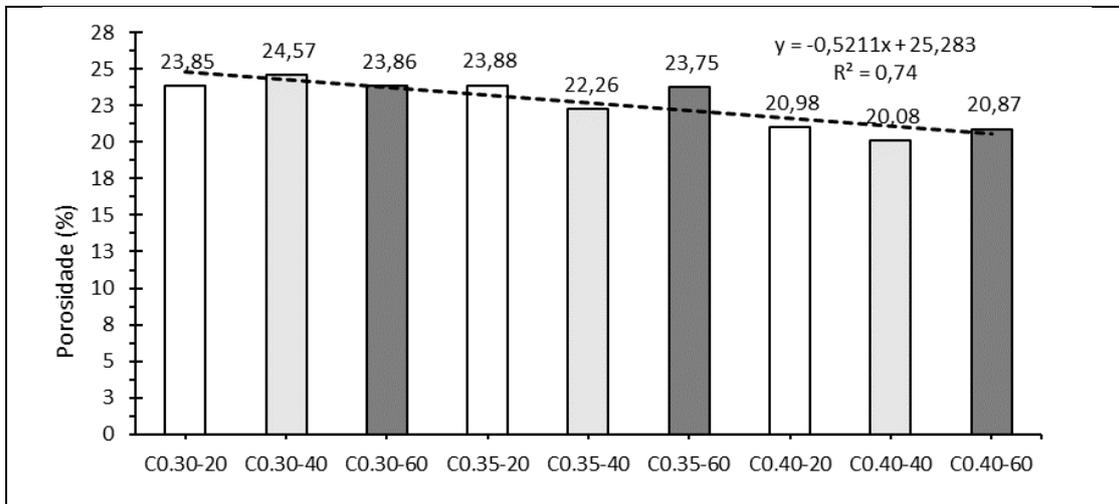


Figura 23. Efeito da vibração e da razão w/c na porosidade do betão permeável

A porosidade apresenta uma tendência linear de acordo com os valores observados na figura 8. A tendência está relacionada a uma relação entre os tempos de vibração e as relações água / ligante de cada mistura. No entanto, a porosidade é significativamente reduzida à medida que a razão a/c aumenta, conforme visto na tendência na Figura 23.

3.4 Resistência à compressiva

A Figura 24 apresenta os resultados da resistência à compressão para cada betão ensaiado. Com uma gama de valores entre 16 e 22 MPa, os resultados mostram que os betões ensaiados cumprem os requisitos técnicos relativos ao parâmetro de resistência à compressão para pavimentos permeáveis [35].

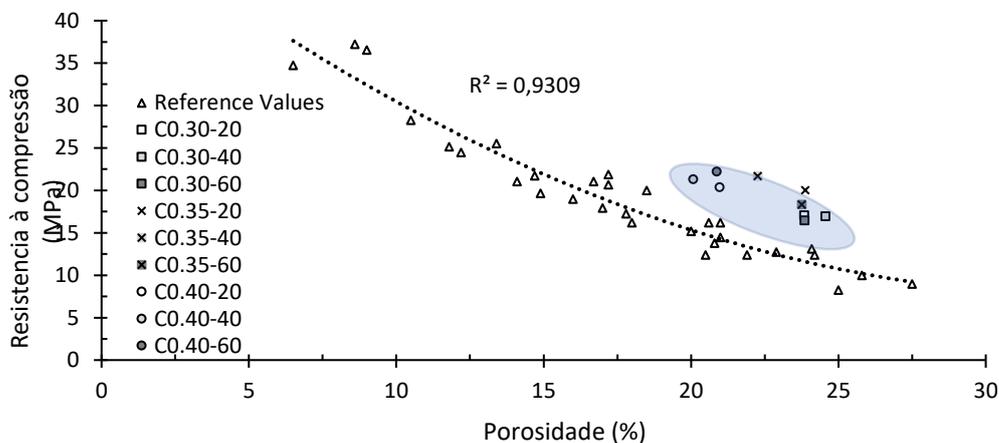


Figura 24. Correlação entre resistência à compressão, conteúdo de porosidade e valores de referência

Esses resultados mostram que os betões C0.40 alcançaram maiores valores de resistência à compressão. Devido à maior trabalhabilidade, o betão C0.40 com 60 segundos de vibração apresenta o maior valor de resistência à compressão (22,20 MPa). Em relação à porosidade dos resultados, os valores variam entre 20,0% e 24,5%.

Os valores obtidos, tanto para resistência à compressão quanto para conteúdo de porosidade dos provetes envelhecidos, se correlacionam bem com os valores de referência [35].

3.5 Abrasão por cântabro

A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio de abrasão Cântabro e sua correlação com a resistência à compressão. Os resultados de Cambro para relações A/C mais baixas correspondem o betão com maior abrasão.

O betão com maior relação A/C (C0,40) apresentou a menor abrasão e maior resistência à compressão, sendo visível que o aumento da relação A / C produz melhores betões com alta resistência à compressão e baixa abrasão Cântabro. Um ajuste linear pode ser proposto para essa relação, apesar do coeficiente de correlação reduzido de 0,65 obtido para essas nove medidas.

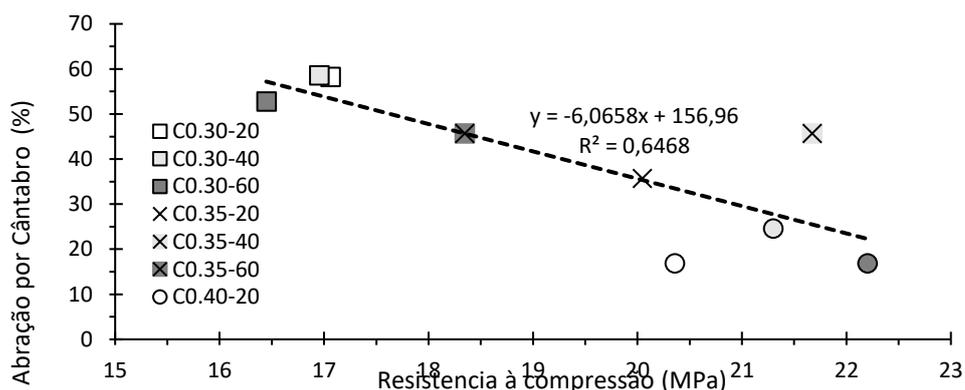


Figura 25. Correlação entre os resultados do ensaio de abrasão Cântabro e a resistência à compressão

3.6. Permeabilidade

A permeabilidade do betão foi avaliada pelo ensaio de Permeabilidade de Falling Head e o ensaio de LCS conforme descrito na metodologia. Os resultados serão expressos em função da absorção de água, pois estão relacionados aos vazios de ar no betão.

A permeabilidade obtida com o ensaio de Permeabilidade de Falling Head é indicada na Figura 26 em comparação com os resultados de porosidade aberta, enquanto a Figura 27 apresenta a permeabilidade LCS. A comparação entre ambas a permeabilidade é indicada na Figura 28.

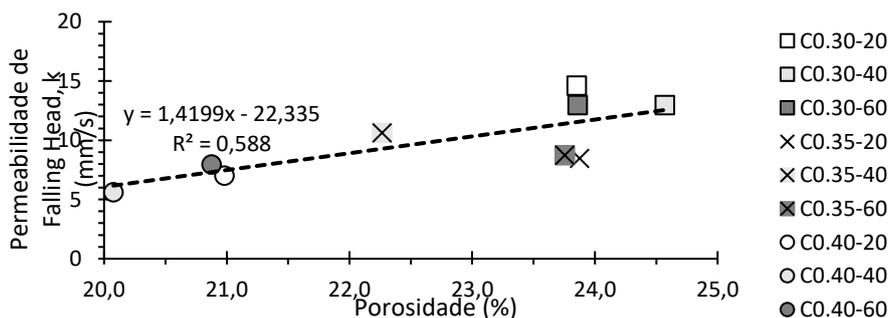


Figura 26. Ensaio de permeabilidade de Falling Head

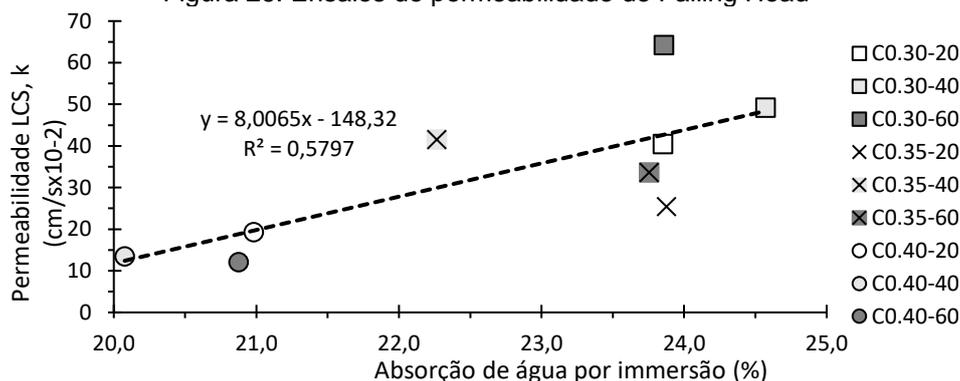


Figura 27. Ensaio de permeabilidade de LCS e a absorção de água por imersão

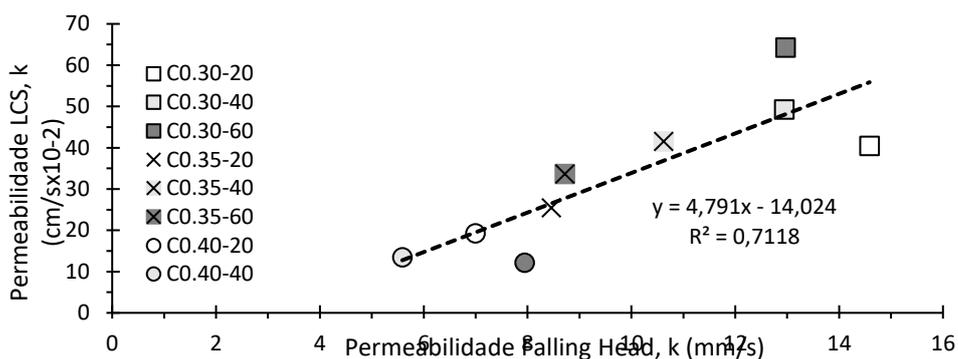


Figura 28. Correlação entre Falling Head e permeabilidade LCS

A Figura 26 mostra que um aumento na porosidade é correspondido por um aumento nos valores de Falling Head, revelando assim a influência dos tempos de vibração sobre as estruturas porosas das misturas.

Durante o estudo, ficou claro que os aumentos na proporção A/C das misturas estão relacionados com a porosidade e permeabilidade mais baixas, conforme observado nos resultados dos ensaios de permeabilidade Falling Head e LCS.

A existência de poros internos fechados contribui para esses menores valores de permeabilidade em ambos os ensaios. Conforme mostrado nas Fig. 9 e 10, tal comportamento é causado pelos tempos de vibração das misturas. Como observado, tempos de vibração mais longos contribuíram para a perda de conectividade entre os poros.

A Figura 28 mostra uma correlação linear clara entre os valores dos ensaios de permeabilidade de Falling Head e LCS. Tais resultados confirmam que maiores razões a/c estão relacionadas a menores valores de permeabilidade em ambos os ensaios, conforme explicado anteriormente.

Com base nos resultados explicados acima, torna-se claro que os tempos de vibração das misturas influenciam negativamente o parâmetro de permeabilidade.

A Figura 27 mostra que um aumento na porosidade é correspondido por um aumento nos valores de Falling Head, revelando assim a influência dos tempos de vibração sobre as estruturas porosas das misturas.

Durante o estudo, tornou-se claro que os aumentos na relação A/C das misturas estão relacionados com a porosidade e permeabilidade mais baixas, conforme observado nos resultados dos ensaios de permeabilidade Falling Head e LCS.

A existência de poros internos fechados contribui para esses menores valores de permeabilidade em ambos os ensaios. Conforme mostrado nas Figuras. 9 e 10, tal comportamento é causado pelos tempos de vibração das misturas. Conforme os requisitos técnicos (EP - Estradas de Portugal) [21] para o curso da superfície dos pavimentos, seguindo os parâmetros de permeabilidade in situ da norma (NLT-327) [30], requerem valores de drenagem aceitáveis para betões permeáveis na gama entre 10 a 30 segundos. Estes correspondem a um coeficiente k de permeabilidade entre 91,85 e 20,89 cm / s x 10⁻².

Os resultados mostram que os betões C0.30 e C0.35 atendem a esses requisitos. Os valores de permeabilidade C0,30 caem no valor limite mínimo, enquanto C0,35 mostra valores de faixa média aceitáveis. Portanto, os resultados de C0.35 estão alinhados com os requisitos técnicos aceitáveis para camadas de desgaste de betão permeável para pavimentos. Os betões ensaiados também foram avaliados quanto à permeabilidade vertical de acordo com a Norma Europeia (EN 13108-7) [34].

Os resultados mostram que todos os betões ensaiados atendem à norma EN 13108-7 [34] quanto à aplicação de betão permeáveis. C0.30 é classificado como a classe superior (kv4.0), enquanto C0.35

é classificado como a classe média (kv2.0 - kv2.5), mas com consideráveis valores de permeabilidade vertical.

3.7 Modelagem de porosidade usando o software image j

A análise da porosidade foi realizada usando os mesmos provetes cúbicos dos ensaios de porosidade aberta. Os provetes foram preenchidos com um cimento muito fluido para garantir que todos os poros existentes fossem preenchidos. Em seguida, os provetes foram divididos em 4 fatias de 25 mm cada. A porosidade de amostra é calculada como o valor médio de todas as fatias [15].

Aplicando o procedimento de processamento de imagem preto e branco são produzidas para cada fatia. A porosidade é quantificada como uma porcentagem subtraindo a área branca da área preta. Por meio desse processo, é obtida uma imagem digital mostrando a porosidade vertical para cada face da fatia. A análise da porosidade foi realizada nos provetes utilizados nos ensaios de condutividade hidráulica, onde foi avaliada a permeabilidade vertical.

O primeiro ensaio é fazer imagens de cada face de corte, usando uma escala conhecida, ver Figura 29a. A escala será utilizada pelo software para relacionar as dimensões dos poros e quantificar seu percentual. No segundo ensaio, cada imagem é formatada em 8 bits em preto e branco, permitindo ao software distinguir poros de agregados (Figura 29b e Figura 29c).

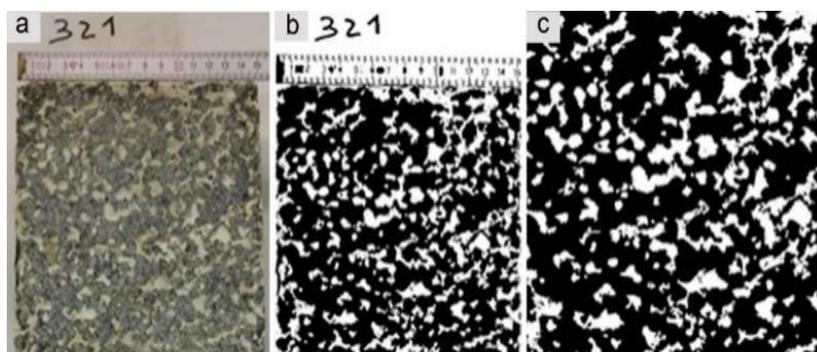


Figura 29. Exemplos de diferentes ensaios do procedimento de análise da porosidade realizado em uma amostra C0.30-20: (a) imagem não tratada; (b) 8 bits de volta e imagem em branco; (c) detalhe da imagem.

Os resultados dos ensaios de porosidade apresentam valores na faixa de 23,7% a 35,2%, enquanto, para os resultados dos ensaios de porosidade de imersão, esses valores estão entre 20,0% e 24,5%. Assim, foi possível estabelecer uma tendência entre a porosidade e a absorção de água, porém os valores de ambas são diferentes. A diferença se deve principalmente ao cálculo da porosidade.

O método de cálculo da porosidade inclui toda a porosidade da área do corpo de prova em ensaios, incluindo a porosidade fechada que não tem acesso à permeabilidade. Este fator contribui de alguma forma para uma pequena dispersão dos valores de porosidade em ambos os métodos. Outro motivo que está relacionado à diferença nos valores apresentados é com a localização do corte na amostra, o que provavelmente afeta a avaliação da porosidade.

Na análise global do estudo de porosidade realizado para os dois métodos, porosidade e porosidade aberta, conclui-se que quanto menor a relação W/C, maior a porosidade interna.

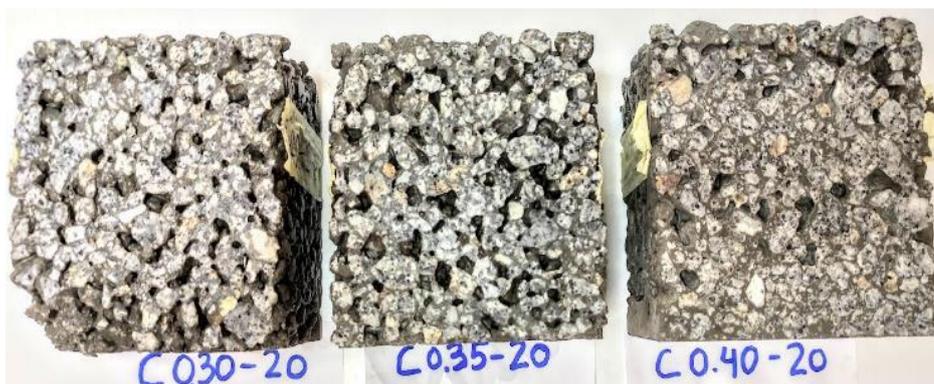


Figura 30. Observação visual da porosidade no corte da seção da amostra para cada tipo de mistura A/C

Na Figura 30 observa-se visualmente ao aumentar a/c diminui significativamente o número de poros. Este fator é influenciado pela vibração aplicada às misturas e pela relação a/c, esta causa está relacionada à fluidez da matriz que permite um arranjo mais fácil das partículas, como pode ser visto na Figura 30, que C0.40 possui uma malha com mais poros fechados do que as outras misturas.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo realizaram-se os ensaios de diferentes betões permeáveis para obter o betão otimizado para pavimentação de estradas e melhorar a segurança ao remover a água da chuva rapidamente da sua superfície. Do estudo realizado neste trabalho, foi possível concluir que:

- Os resultados do abaixamento não permitiram estabelecer qualquer correlação entre os betões estudados. Um valor constante de 0 foi obtido para todos os betões, correspondendo a um valor típico para betão permeável. Porém, a partir dos resultados do ensaio de Vebe, os betões C0.40 apresentam a melhor trabalhabilidade;
- Os ensaios de caracterização mecânica mostraram que os betões de relação 0,40 A/C obtiveram maior resistência à compressão. Devido à maior trabalhabilidade, C0,40-60 apresentou a maior resistência à compressão (22,20 MPa). Os resultados do ensaio de Vebe validam a influência do parâmetro de trabalhabilidade sobre a resistência à compressão. Devido à natureza do abaixamento, a validação usando este ensaio foi inviável;
- Com valores variando de 16 MPa a 22 MPa, foi comprovado que todos os betões ensaiados atendem aos requisitos de resistência à compressão do betão permeável. Os resultados do ensaio de abrasão Cântabro também revelaram que relações a/c mais baixas são combinadas com baixa resistência à abrasão;
- Em relação às variações dos parâmetros de permeabilidade em cada relação a/c, não foram detetadas progressões lineares que pudessem influenciar os diferentes tipos de vibração sobre este parâmetro. No entanto, os resultados mostram uma tendência de aumento contínuo da permeabilidade após a diminuição da razão a/c. Tal comportamento é devido a propriedades reológicas do betão;
- Uma tendência semelhante foi observada para a resistência à compressão. Um aumento na permeabilidade é combinado com uma diminuição da resistência à compressão;
- A permeabilidade LCS mostra que as misturas C0.30 e C0.35 atendem às especificações técnicas de permeabilidade para betão permeáveis;
- Os resultados também mostram que todos os betões ensaiados atendem à norma EN 13108-7 para aplicação de betão permeáveis. C0.30 é classificado como a classe superior (kv4.0), enquanto C0.35 é classificado como a classe média (kv2.0 - kv2.5), mas com considerável permeabilidade vertical;
- Os valores da porosidade variam entre 23,7% e 35,2%, enquanto para a porosidade aberta, estão

2003. "Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials." CIP 38 - Pervious Concrete." 2004. NRMCA, 66 Canal Center Plaza, Suite 250, Alexandria, VA 22314: National Ready Mixed Concrete.
- [16] Debnath, Barnali, and Partha Pratim Sarkar. 2018. "Pervious Concrete as an Alternative Pavement Strategy: A State-of-the-Art Review." *International Journal of Pavement Engineering* 8436. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217>.
- [17] Taheri, Bahram M., and Amir M. Ramezani-pour. 2021. "Optimizing the Mix Design of Pervious Concrete Based on Properties and Unit Cost." *Advances in Concrete Construction* 11 (4): 285–98. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.11.4.285>.
- [18] Hosseini, Seyed Azim, and Ali Toghrol. 2021. "Effect of Mixing Nano-Silica and Perlite with Pervious Concrete for Nitrate Removal from the Contaminated Water." *Advances in Concrete Construction* 11 (6): 531–44. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.11.6.531>.
- [19] SECIL. 2018. "Supratek Cimento Portland." Fábrica Maceira-Liz.
- [20] EP - Estradas de Portugal. 2014. "Pavimentação - Características Dos Materiais." *Caderno de Encargos Tipo Obra 03*: 125.
- [21] EN 12350-2. 2019. "Testing Fresh Concrete. Slump Test." BSI, 12.
- [22] EN 12350-3. 2019. "Testing Fresh Concrete. Vebe Test." BSI, 12.
- [23] EN 12350-6. 2019. Testing Fresh Concrete. Density. BSI.
- [24] EN 12350-7. 2019. Testing Fresh Concrete. Air Content. Pressure Methods. BSI.
- [25] EN-12390-7 - Testing Hardened Concrete. Density of Hardened Concrete, BSI." 2019.
- [26] EN 1097-6. 2013. "Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Determination of Particle Density and Water Absorption." BSI, 54.
- [27] EN 12390-3. 2019. "Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens." BSI, 24.
- [28] NLT-362/92. 1992. "Efecto Del Agua Sobre La Cohesión de Mezclas Bituminosas de Granulometría Abierta, Mediante Ensayo Cántabro de Pérdida Por Desgaste." *Espana: Normativa de carreteras*.
- [29] NLT-327/00. 2000. "Permeabilidad in Situ de Pavimentos Drenantes Mediante Permeámetro LCS." *Normativa de carreteras. Espana*.
- [30] Neithalath, Narayanan, Jason Weiss, and Jan Olek. 2006. "Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements." *ResearchGate*, no. 315: 1–22.
- [31] 522R-06. 2010. "Pervious Concrete." *Technical Documents*.
- [32] Barnes, Stephen. 2002. *Principles of Geotechnical Engineering*.
- [33] EN 13108-7. 2013. "Bituminous Mixtures - Material Specifications - Part 7: Porous Asphalt Mélanges, BSI." Vol. 44.
- [34] Meininger, Richard C. n.d. "No-Fines Pervious Concrete for Paving." *Concrete International* 10 (8).
- [35]