

Propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável: efeitos da relação pasta/agregado e da energia de compactação

Lucas Eduardo dos Santos^[1], Sergio Tunis Martins Filho^[2] *

^[1] lucas.111202@alunos.utfpr.edu.br, ^[2] sergiotunis@utfpr.edu.br. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil

* autor correspondente

Resumo

Estudos sobre a influência dos materiais constituintes nas propriedades do concreto permeável têm aumentado significativamente nos últimos anos, principalmente devido à sua aplicabilidade em centros urbanos devido à sua permeabilidade. Este material é composto por água, cimento, agregado graúdo e pouco ou nenhum agregado miúdo. Suas propriedades são influenciadas não apenas pelos materiais constituintes, mas também pelo método de produção, que frequentemente carece de padronização metodológica, principalmente no que se refere aos tipos e níveis de energia de compactação. Nesse contexto, o presente estudo avaliou as propriedades físicas (porosidade, densidade e velocidade de pulso ultrassônico – VPU) e mecânicas (resistência à compressão) do concreto permeável, considerando diferentes relações pasta-agregado (P/Ag) e energias de compactação aplicadas com martelo Proctor. Os resultados indicaram que menor porosidade está associada a maior resistência à compressão e VPU. Misturas com menor relação P/Ag (0,40) apresentaram maior porosidade. Ao mesmo tempo, o aumento da energia de compactação resultou em propriedades semelhantes ao traço de referência (P/Ag: 0,50). Além das correlações observadas entre as propriedades avaliadas, este estudo destaca a importância do consumo real de material durante a moldagem, que é diretamente influenciado pela energia de compactação, e como a porosidade afeta a precisão das medições de velocidade de pulso ultrassônico.

Palavras-chave: compactação; concreto permeável; porosidade; resistência à compressão; ultrassom.

Physical and mechanical properties of pervious concrete: effects of the paste-to-aggregate ratio and compaction energy

Abstract

Studies on the influence of constituent materials on the properties of pervious concrete have significantly increased in recent years, mainly due to its applicability in urban centers because of its permeability. This material consists of water, cement, coarse aggregate, and little to no fine aggregate. Its properties are influenced not only by its constituent materials but also by the production method, which often lacks methodological standardization, particularly regarding the types and levels of compaction energy. In this context, the present study evaluated the physical properties (porosity, density, and ultrasonic pulse velocity – UPV) and mechanical properties (compressive strength) of pervious concrete, considering different paste-to-aggregate ratios (P/Ag) and compaction energies applied using a Proctor hammer. The results indicated that lower porosity is associated with higher compressive strength and UPV. Mixes with a lower P/Ag ratio (0.40) exhibited higher porosity. At the same time, increased compaction energy resulted in properties similar to those of the reference mix (P/Ag: 0.50). In addition to the correlations observed among the evaluated properties, this study highlights the importance of the actual material consumption during molding, which is directly influenced by compaction energy, and how porosity affects the accuracy of ultrasonic pulse velocity measurements.

Keywords: compaction; compressive strength; pervious concrete; porosity; ultrasound.

1 Introdução

A intensificação dos eventos climáticos extremos, associada à elevada impermeabilização dos centros urbanos, tem contribuído significativamente para o aumento do escoamento superficial, resultando em diversos impactos socioambientais ao redor do mundo. Nesse cenário, o concreto

permeável apresenta-se como uma solução eficaz para mitigar tais efeitos, em razão de suas propriedades drenantes, que possibilitam a percolação da água para o subsolo (Cahill; Adams; Marm, 2003; Tennis; Leming; Akers, 2004). Esse material é amplamente utilizado em calçadas, estacionamentos e outras pavimentações, tanto na forma de placas quanto de blocos (Gentil et al., 2024; Lima et al., 2025; Simões et al., 2023).

O concreto permeável é composto por água, cimento, agregado graúdo e uma quantidade reduzida ou inexistente de agregado miúdo (Mikami; Pieralisi; Pereira, 2024; Vale et al., 2022; Zhu et al., 2023). Observa-se, entretanto, a ausência de uma metodologia de dosagem consolidada e universalmente aceita que relacione, de forma padronizada, as propriedades do concreto com seus materiais constituintes (ACI, 2010; Chandrappa; Biligiri, 2017; Hisatomi; Martins Filho; Cobo, 2024; Lian; Zhuge, 2010; Martins Filho, 2021; Sahdeo et al., 2020; Torres; Hu; Ramos, 2015).

As propriedades do concreto permeável dependem não apenas da relação água/cimento (a/c) e da granulometria dos agregados, mas também da quantidade de pasta que recobre os grãos do agregado. Relações pasta/agregado (P/Ag) mais elevadas tendem a reduzir o volume de vazios, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência à compressão do material (Gentil et al., 2024; Hisatomi; Martins Filho; Cobo, 2024; Martins Filho; Pieralisi; Lofrano, 2022; Pieralisi et al., 2020). A relevância dos estudos de dosagem está diretamente associada à obtenção de misturas mais eficientes (Martins Filho, 2021; Sahdeo et al., 2020). A dosagem do concreto permeável baseia-se, majoritariamente, em métodos empíricos, e estudos como os de Tennis, Leming e Akers (2004), Nguyen et al. (2014) e o método ACI 522R-10 (ACI, 2010) reforçam que a proporção adequada entre os materiais deve garantir o recobrimento completo dos agregados pela pasta, assegurando a coesão e a estrutura porosa desejada.

Diversos estudos (Bonicelli; Giustozzi; Crispino, 2015; Costa et al., 2018; Deo; Neithalath, 2011; Ghafoori; Dutta, 1995; Lian; Zhuge, 2010; Nguyen et al., 2014) indicam que a energia e o tipo de compactação aplicados durante a moldagem do concreto permeável influenciam diretamente suas propriedades finais, independentemente do método empregado, seja martelo Próctor, haste metálica, rolo compactador ou lançamento em estado solto. Verifica-se que a escolha da técnica de compactação está diretamente relacionada aos objetivos da moldagem, os quais podem variar desde a produção de corpos de prova até a confecção de elementos pré-moldados de grandes dimensões. Em geral, o aumento da energia aplicada, independentemente do método utilizado, resulta em maior densidade e resistência à compressão do concreto, em decorrência da redução de sua porosidade (Anburuvel; Subramaniam, 2022; Ansari; Mahajan, 2020; Ferić et al., 2023; Sahdeo; Chandrappa; Biligiri, 2021).

A velocidade do pulso ultrassônico (VPU), determinada por meio de ensaio não destrutivo, é uma ferramenta que permite estimar as propriedades do concreto, sendo particularmente sensível à densidade dos materiais (Cosic et al. 2015., Martins Filho, 2021; Ridengaoqier; Hatanaka 2021. Ondas ultrassônicas propagam-se com maior facilidade por meios densos, como a pasta cimentícia e os agregados, mas sofrem atenuação ao atravessar vazios estruturais. Dessa forma, quanto maior o volume de vazios presentes no concreto, menor tende a ser a VPU (Hisatomi; Cogo; Martins Filho, 2024., Martins Filho et al., 2020).

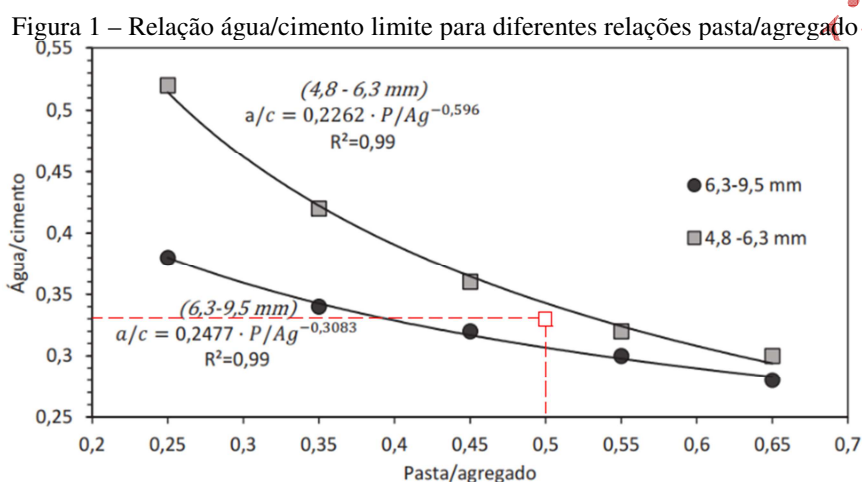
O presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades do concreto permeável (resistência à compressão, densidade endurecida, porosidade e velocidade do pulso ultrassônico) a partir da redução da relação pasta/agregado (P/Ag) e do aumento da energia de compactação com martelo Próctor. A pesquisa, de caráter exclusivamente laboratorial, adota uma abordagem sustentável ao reduzir o consumo de cimento e compensar com maior compactação, buscando verificar a manutenção das propriedades. Ademais, contribui para a definição de parâmetros referentes à aplicação do ensaio de ultrassom em concretos permeáveis.

O resto deste artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta os materiais, traços e procedimentos experimentais adotados; a seção 3 analisa as relações entre as propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável, com ênfase nas correlações observadas a partir dos materiais constituintes; e, por fim, a seção 4 reúne as principais considerações do estudo, destacando os resultados mais relevantes e apresentando sugestões para investigações futuras.

2 Método da pesquisa

As composições utilizadas foram definidas com base no estudo elaborado por Martins Filho (2021), sendo comumente adotadas na literatura para aplicações em concretos permeáveis. A Figura 1 apresenta a relação a/c e a razão P/Ag para duas faixas granulométricas, destacando-se, por meio de um círculo vermelho, o ponto adotado nesta campanha experimental como traço de referência. A razão P/Ag foi fixada em 0,50, por se tratar de uma proporção amplamente utilizada na literatura. Os agregados graúdos utilizados são de origem basáltica, com faixa granulométrica entre 4,8 mm e 9,5 mm, obtidos por peneiramento manual, conforme as normas ABNT NBR 16915:2021 (ABNT, 2021) e ABNT NBR 17054:2022 (ABNT, 2022). Também foram empregados água e cimento Portland CP-II-Z 32, conforme a ABNT NBR 16697:2018 (ABNT, 2018).

Com base no gráfico da Figura 1, a partir da razão P/Ag de 0,50 e considerando que o intervalo granulométrico utilizado abrange duas curvas distintas, foi realizada uma interpolação entre as respectivas equações, a fim de obter a correspondente relação a/c, fixada em 0,33.



Fonte: adaptado Martins Filho (2021)

A Tabela 1 apresenta os traços utilizados: T-50-5 (referência), T-40-5, T-40-10 e T-40-20, com seus respectivos números de golpes aplicados durante a moldagem (5, 10 e 20), utilizando o martelo de Proctor. A compactação com o referido equipamento teve como objetivo padronizar a energia de compactação por golpe, reduzindo a variabilidade dos resultados entre os corpos de prova de um mesmo traço, conforme adotado por autores como Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015), Gaedicke et al. (2016) e Costa et al. (2018). Apesar das tentativas de padronização, Martins Filho (2021) ressalta que a formação do meio poroso resulta de um processo aleatório e singular, refletindo na particularidade de cada corpo de prova.

Tabela 1 – Proporções e golpes por camadas dos traços de concreto permeável

Traço ID	P/Ag	Traço por massa (kg)				Média de consumo real (kg/m³)		
		Cimento	Agregado	a/c	Golpes/Camada	Cimento	Agregado	Água
T-50-5	0,50	1	2,66	0,33	5	503,41	1339,08	166,13
T-40-5	0,40	1	3,32	0,33	5	407,44	1352,69	134,45
T-40-10	0,40	1	3,32	0,33	10	417,06	1384,64	137,63
T-40-20	0,40	1	3,32	0,33	20	433,21	1438,27	142,96

Fonte: dados da pesquisa

Destaca-se que os traços com relação P/Ag reduzida (0,40) foram concebidos com o propósito de investigar a viabilidade de alcançar desempenho equivalente ao traço de maior consumo teórico de cimento (T-50-5), por meio da aplicação de maior energia de compactação.

A mistura do concreto foi executada conforme as recomendações de Schaefer et al. (2006). A moldagem foi realizada em moldes cilíndricos com dimensões de 10 × 20 cm, sendo a compactação

dividida em três camadas. O martelo de Proctor utilizado possuía massa de 2,5 kg, e o número de golpes foi definido com base nas contribuições de Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015). A altura de queda do soquete foi padronizada em 30,5 cm, sendo os golpes aplicados de forma distribuída em cada camada, de modo a alcançar densidades representativas das condições reais de aplicação em campo, embora os ensaios tenham sido conduzidos em ambiente laboratorial. Foram moldados sete corpos de prova por traço. A cura do concreto foi realizada em condições ambientais não controladas, caracterizando-se como cura seca.

Os ensaios realizados incluíram densidade no estado fresco, porosidade e densidade no estado endurecido, velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão, conforme discriminado na Tabela 2.

Tabela 2 – Número de corpos de provas para os ensaios

Traço ID	Porosidade total	Densidade no estado fresco/endurecido	Resistência à compressão	VPU
T-50-5	7	7	7	7
T-40-5	7	7	7	7
T-40-10	7	7	7	7
T-40-20	7	7	7	7

Fonte: dados da pesquisa

As determinações de densidade e porosidade seguiram os procedimentos descritos nas normas ASTM C1688 (ASTM, 2023) e ASTM C1754 (ASTM, 2021), respectivamente. O ensaio de resistência à compressão foi conduzido em prensa hidráulica, conforme as normas ABNT NBR 5738:2015 (ABNT, 2015) e ABNT NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). Para o ensaio de ultrassom, seguiram-se os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM C597 (ASTM, 2023). Utilizou-se o equipamento PROCEQ/Pundit Lab, operando com frequência de 24 kHz. Foram registrados os valores da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) para diferentes fatores de ganho (FG), disponíveis para ajuste no equipamento: 1×, 5×, 10×, 20×, 50×, 100×, 200× e 500×, os quais refletem a sensibilidade de leitura do transdutor. Foram registrados, ainda, os respectivos valores de precisão para cada leitura realizada em cada corpo de prova.

3 Resultados e discussões

Na Tabela 3 pode ser observado os resultados das propriedades dos traços desenvolvidos.

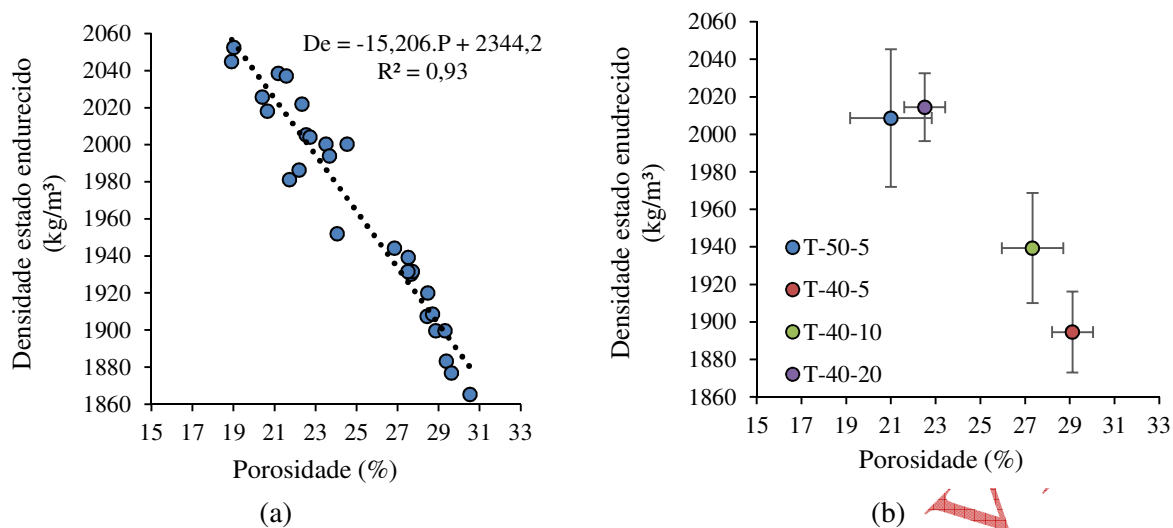
Tabela 3 – Propriedades para cada traço do concreto permeável

Traço ID	Densidade estado fresco (kg/m ³) (σ)	Densidade estado endurecido (kg/m ³) (σ)	Porosidade (%) (σ)	VPU 500× (m/s) (σ)	Resistência à compressão (MPa) (σ)
T-50-5	2055,55 (38,70)	2008,63 (36,72)	20,66 (1,83)	3877 (89)	11,45 (1,01)
T-40-5	1933,87 (24,72)	1894,58 (21,57)	29,31 (0,91)	3522 (36)	7,88 (0,84)
T-40-10	1975,16 (29,21)	1939,33 (29,37)	27,53 (1,38)	3687 (61)	8,81 (1,18)
T-40-20	2057,37 (17,15)	2014,45 (18,09)	22,55 (0,92)	3679 (81)	8,88 (1,00)

Fonte: dados da pesquisa

As Figuras 2a e 2b ilustram a relação entre a densidade no estado endurecido e a porosidade. A Figura 2a apresenta a equação de regressão linear e seu coeficiente de determinação (R^2), enquanto a Figura 2b exibe as médias dessas propriedades, com seus respectivos desvios-padrão, para cada traço avaliado.

Figura 2 – Relação entre densidade no estado endurecido e porosidade



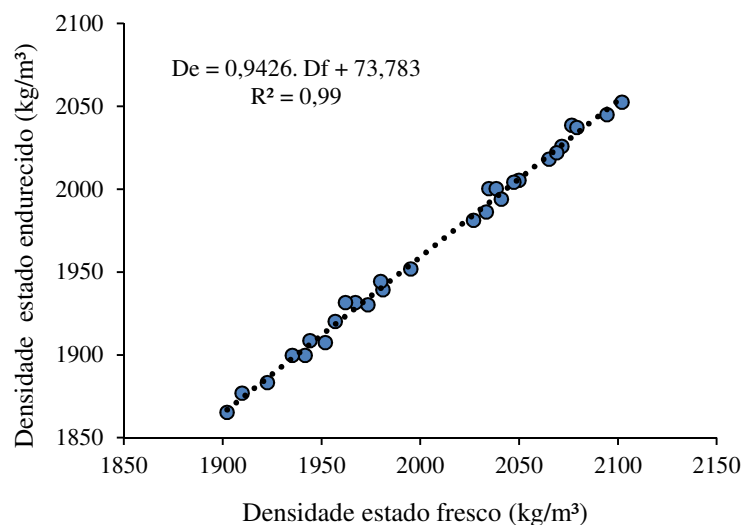
Fonte: dados da pesquisa

Verifica-se que o aumento da porosidade está associado à redução da densidade no estado endurecido, padrão também identificado por diversos autores (Ansari; Mahajan, 2020; Hisatomi; Martins Filho; Cobo, 2024; Ibrahim et al., 2014; Sahdeo; Chandrappa; Biligiri, 2021). A regressão linear apresentou bom ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,93. Entre os traços com relação P/Ag de 0,40, observou-se que o aumento da energia de compactação resultou na diminuição da porosidade. O traço T-50-5, com maior relação P/Ag, apresentou menor porosidade em comparação ao T-40-5, embora ambos tenham sido submetidos à mesma energia de compactação, o que pode ser atribuído à maior quantidade de pasta presente no T-50-5, contribuindo para a redução dos vazios estruturais.

Adicionalmente, verificou-se que os traços T-40-20 e T-50-5, embora distintos quanto à relação P/Ag, apresentaram densidades e porosidades semelhantes após o aumento da energia de compactação. Tal resultado reforça a influência da energia de compactação no comportamento do concreto permeável, demonstrando que essa variável pode compensar diferenças relativas ao consumo efetivo dos materiais constituintes. A natureza porosa do concreto permeável implica que pequenas variações na composição ou nos métodos de compactação resultem em diferentes características físicas.

A Figura 3 ilustra a relação entre a densidade no estado endurecido e a densidade no estado fresco.

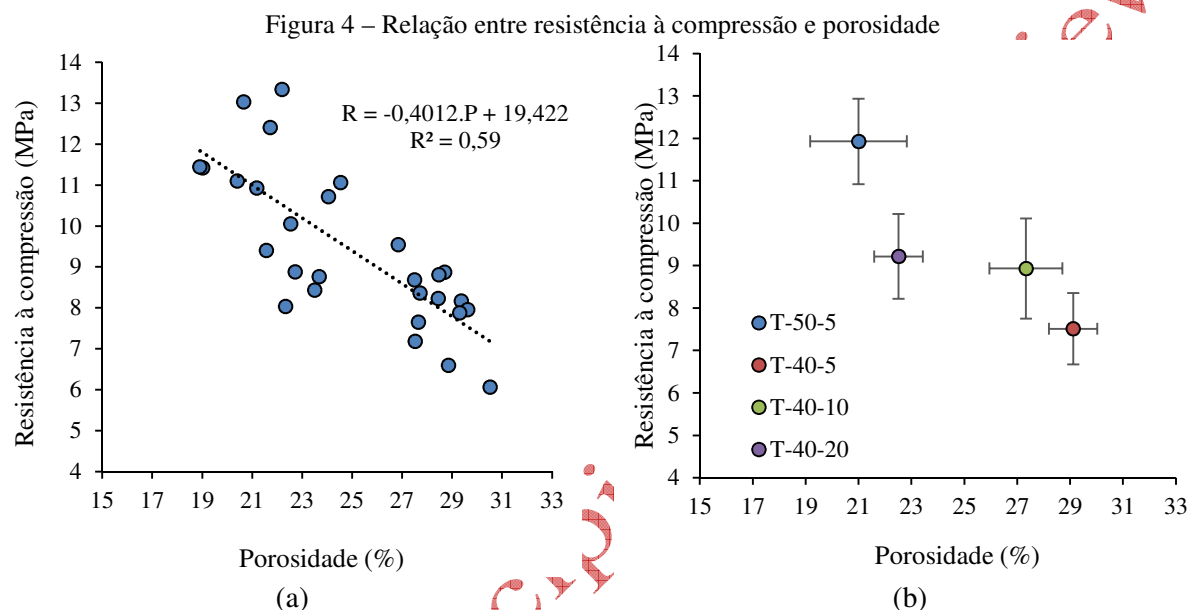
Figura 3 – Relação entre densidade no estado endurecido e no estado fresco



Fonte: dados da pesquisa

Observou-se, ainda, que a densidade do concreto permeável é maior no estado fresco do que no estado endurecido, comportamento também relatado por Martins Filho (2021) e por Hisatomi, Cogo e Martins Filho (2024). A redução da densidade após o endurecimento pode estar relacionada à retração da pasta durante o enrijecimento, processo influenciado pelas reações exotérmicas de hidratação do cimento. Além disso, destaca-se que, diferentemente do concreto convencional, o concreto permeável apresenta maior superfície específica em contato com a atmosfera. Essa característica possui relevância prática, pois, além de contribuir para a caracterização física do material, envolve fatores que podem influenciar sua aplicação no estado fresco, auxiliando na definição de parâmetros de projeto para pavimentos permeáveis.

As Figuras 4a e 4b retratam a influência da porosidade sobre a resistência à compressão.



Fonte: dados da pesquisa

A Figura 4a evidencia a tendência de redução da resistência à compressão com o aumento da porosidade, apresentando um coeficiente de correlação de 0,59. Essa redução está associada à diminuição das áreas efetivas para a transmissão de tensões, comportamento amplamente corroborado pela literatura, que indica de forma consistente que meios mais porosos comprometem a resistência à compressão do concreto permeável (Anburuvel; Subramaniam, 2022; Ferić et al., 2023; Hisatomi; Cogo; Martins Filho, 2024; Ibrahim et al., 2014; Sahdeo; Chandrappa; Biligiri, 2021). O desvio padrão observado nessa correlação pode estar relacionado à variabilidade entre os traços, especialmente quanto ao consumo de cimento. Isso sugere que, além da porosidade, outras variáveis, como o teor de brita, influenciado pela energia de compactação, também podem impactar significativamente a resistência do material.

A Figura 4b demonstra que, de modo geral, o aumento da energia de compactação resultou na redução da porosidade, acompanhada por elevação da resistência à compressão. Esse comportamento já foi amplamente discutido na literatura, a qual aponta que diferentes níveis de energia de compactação podem impactar significativamente as propriedades do concreto permeável (Bonicelli; Giustozzi; Crispino, 2015; Cavalaro; Blanco; Pieralisi, 2018; Costa et al., 2018; Pieralisi; Cavalaro; Aguado, 2017). No entanto, o traço T-40-20 não apresentou os mesmos valores de resistência à compressão do traço T-50-5. Uma hipótese para essa discrepância é que a maior energia de compactação tenha favorecido principalmente a acomodação dos agregados, sem efeito equivalente sobre a pasta de cimento, responsável pela ligação entre os grãos. Isso pode ter resultado em menor resistência, apesar das densidades e porosidades semelhantes entre os traços.

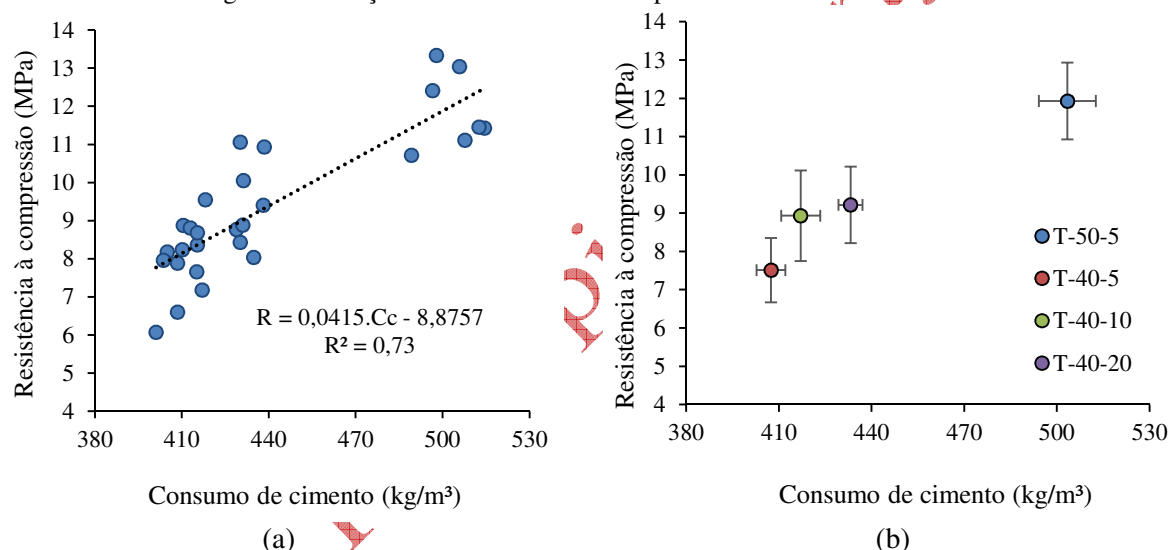
Para os traços com a mesma relação P/Ag de 0,40, observou-se um limite na eficácia da compactação. O aumento da energia de 5 para 10 golpes resultou em ganho de resistência à

compressão. No entanto, a aplicação de 20 golpes não promoveu aumento adicional de resistência, embora tenha reduzido significativamente a porosidade. Esse comportamento pode ser atribuído à limitação no rearranjo dos agregados, possivelmente em virtude do alcance de um adensamento máximo. Assim, a redução da porosidade estaria relacionada principalmente ao preenchimento dos vazios com pasta de cimento, sem reflexo direto na resistência mecânica.

As relações estabelecidas entre a energia de compactação e a densidade, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, apresentam grande relevância. Considerando as evidentes lacunas de conhecimento, especialmente no que se refere à ausência de padronização entre os métodos de compactação utilizados em laboratório e aqueles aplicados em campo, como em pavimentos, levanta-se a hipótese de que o concreto permeável possa ser aplicado in loco com densidade equivalente à obtida em laboratório, buscando-se garantir propriedades semelhantes. No entanto, conforme já apontado por autores como Costa et al. (2018), o mesmo traço de concreto permeável apresentou diferentes permeabilidades quando produzido em laboratório e aplicado em campo, em razão dos distintos métodos de compactação empregados. Trata-se, portanto, de uma temática promissora para investigações futuras.

As Figuras 5a e 5b apresentam a correlação entre resistência à compressão e consumo de cimento dos traços de concreto permeável.

Figura 5 – Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento

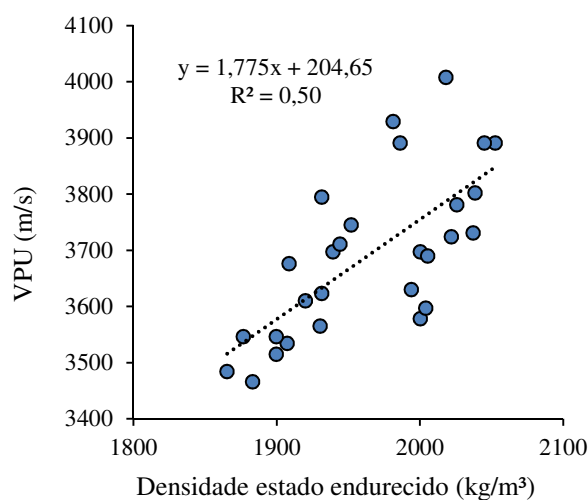


Fonte: dados da pesquisa

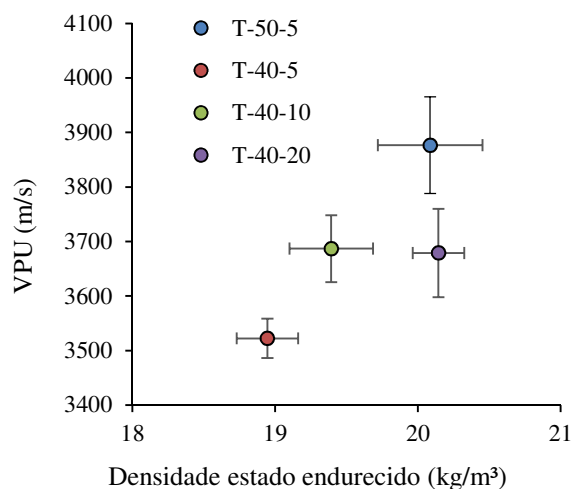
De modo geral, observa-se que o aumento do consumo de cimento está associado à elevação da resistência à compressão. Contudo, é relevante destacar que o concreto permeável apresenta particularidades em relação ao concreto convencional no que se refere ao ganho de resistência. Pequenas variações na porosidade, por exemplo, podem impactar significativamente esse parâmetro. Assim, as interpretações acerca da relação entre o consumo de materiais e o desempenho mecânico devem ser realizadas com cautela. Outros fatores, como a energia de compactação, já discutida anteriormente, bem como a disposição do esqueleto granular, incluindo a espessura da pasta que conecta os agregados, entre outros elementos, também influenciam os resultados, conforme apontado por autores como Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015), Nguyen et al. (2014) e Pieralisi, Cavalaro e Aguado (2017).

As Figuras 6a e 6b apresentam a relação entre a velocidade do pulso ultrassônico (VPU), com fator de ganho (FG) ajustado em 500x, e a densidade no estado endurecido. As Figuras 6c e 6d ilustram a correlação entre a VPU e a porosidade.

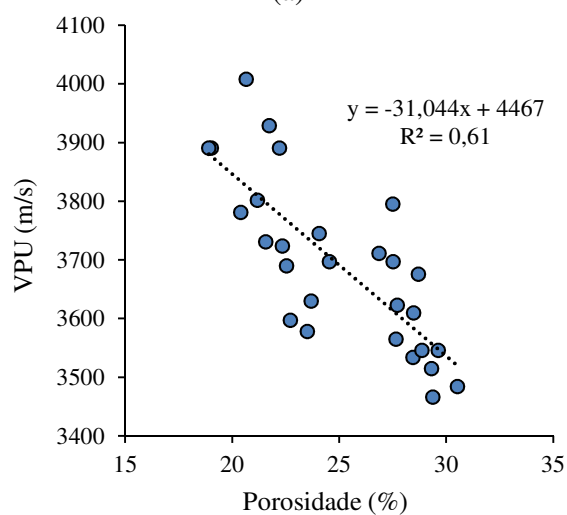
Figura 6 – Relação entre VPU (FG-500x) e densidade estado endurecido (a) e (b) e porosidade (c) e (d)



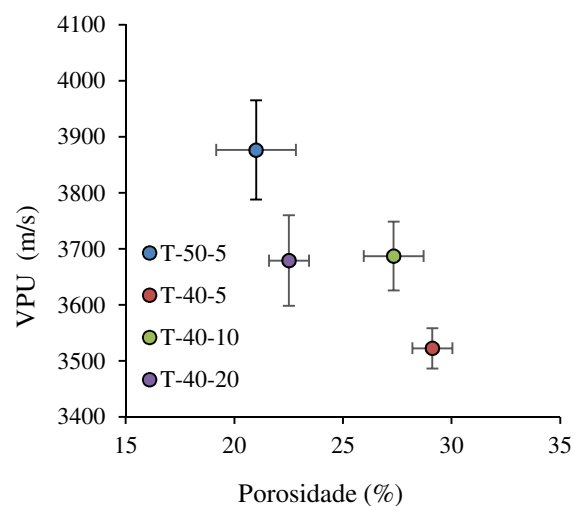
(a)



(b)



(c)



(d)

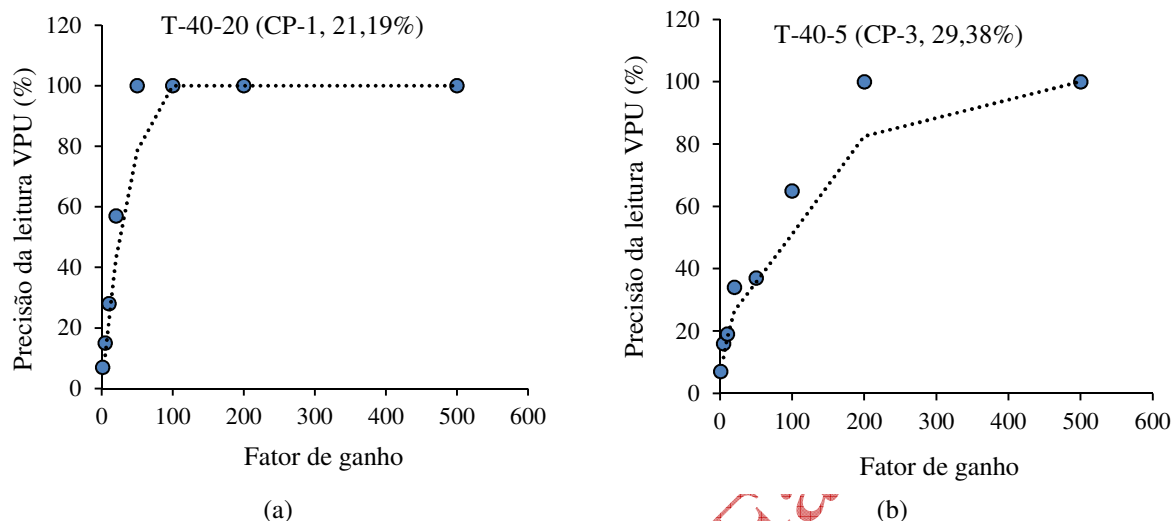
Fonte: dados da pesquisa

Verifica-se que menores valores de porosidade (ou, inversamente, maiores densidades) tendem a resultar em valores mais elevados de VPU, como observado por diversos autores (Chandrupa; Biligiri, 2017; Cosic *et al.*, 2015; Hisatomi; Cogo; Martins Filho, 2024; Martins Filho *et al.*, 2020). Esse comportamento decorre da propagação do pulso ultrassônico através dos constituintes sólidos do concreto (pasta e agregado), com atenuação significativa nos vazios de ar.

Observa-se, ainda, uma diferença nos valores de VPU entre os traços T-50-5 e T-40-20, apesar de apresentarem densidades e porosidades médias semelhantes. Essa diferença pode estar associada à heterogeneidade dos materiais constituintes, seja pela variação na quantidade de pasta de cimento, seja no teor de agregados adensados. Esse comportamento corrobora as considerações discutidas nas Figuras 4 e 5. Por outro lado, os traços T-40-10 e T-40-20, embora apresentem porosidades distintas, demonstram valores de VPU semelhantes. Essa aparente incongruência sugere a hipótese de que a distribuição espacial, a tortuosidade do meio poroso e a concentração dos diferentes materiais constituintes podem exercer influência significativa na propagação do pulso ultrassônico, independentemente da porosidade média do traço. Para CPs com porosidades próximas, ainda que distintas, é possível que um corpo com maior porosidade apresente um caminho preferencial que favoreça a transmissão do pulso ultrassônico de forma semelhante à observada em meios com menor porosidade.

As Figuras 7a e 7b ilustram a relação entre a precisão interna das leituras de VPU e o fator de ganho (FG), considerando os corpos de prova CP-1 do traço T-40-20 (Figura 7a) e CP-3 do traço T-40-5 (Figura 7b), com porosidades de 21,19% e 29,38%, respectivamente.

Figura 7 – Relação entre a precisão da leitura VPU e o fator de ganho (FG) para CP-1 (T-40-20) (a) e CP-3 (T-40-4) (b)



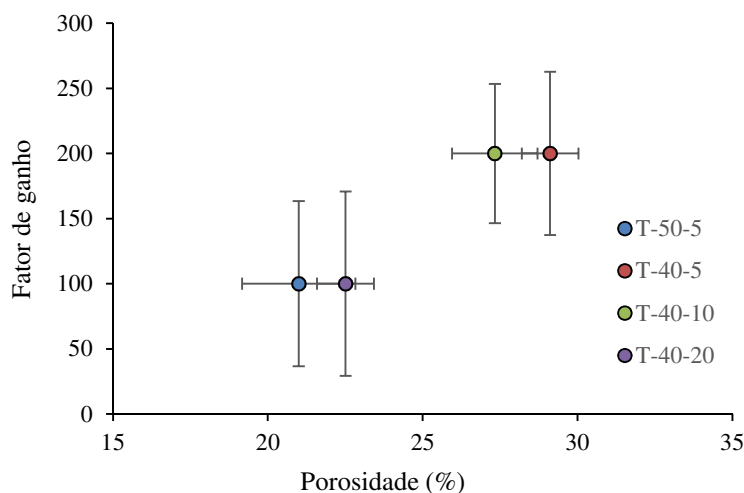
Fonte: dados da pesquisa

A precisão das leituras, fornecida diretamente pelo equipamento durante as medições, reflete a confiabilidade dos dados obtidos para cada FG. Observa-se que essa precisão tende a aumentar com o incremento do FG, devido à maior sensibilidade dos transdutores do aparelho. Além disso, em relação aos dois CPs apresentados, verificou-se que, para menor porosidade, é possível alcançar 100% de precisão com valores menores de FG. Por exemplo, o traço CP-1 (T-40-20), com porosidade inferior, atingiu máxima precisão com $FG = 50\times$, enquanto o traço CP-3 (T-40-5), com porosidade mais elevada, exigiu $FG = 200\times$ para alcançar o mesmo nível de precisão.

A presença de volumes significativos de vazios promove a atenuação das ondas ultrassônicas, dificultando a obtenção de leituras confiáveis e exigindo, portanto, maior ajuste na sensibilidade do equipamento. Esse comportamento também foi observado por Chandrappa e Biligiri (2017), que enfatizaram a importância da calibração do método ultrassônico para garantir medições consistentes, tema ainda pouco explorado na literatura sobre concreto permeável.

A Figura 8 complementa a análise anterior ao apresentar o fator de ganho médio necessário para a obtenção de precisão de leitura de 100% em função da porosidade média dos traços desenvolvidos.

Figura 8 – Relação entre o fator de ganho e a porosidade



Fonte: dados da pesquisa

Verifica-se que traços com menor porosidade requerem menores valores de FG para alcançar precisão máxima. Essa tendência reforça a correlação entre o elevado volume de vazios e a dificuldade de propagação das ondas ultrassônicas no concreto permeável, corroborando o discutido anteriormente.

4 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, foram observados comportamentos coerentes com os descritos na literatura sobre concreto permeável. Verificou-se que maiores densidades estavam associadas a menores porosidades e a maiores resistências à compressão. Ademais, constatou-se que a densidade no estado fresco foi superior à densidade no estado endurecido.

O aumento da energia de compactação nos traços com menor relação P/Ag resultou em propriedades físicas, como densidade e porosidade, semelhantes às do traço com maior consumo teórico de cimento. Essa similaridade foi alcançada mesmo com uma redução de 16,20% no consumo de cimento, ao comparar os traços T-50-5 e T-40-20. Tal resultado evidencia a viabilidade de reduzir o consumo de cimento sem comprometer as propriedades físicas do concreto permeável, desde que a energia de compactação seja adequadamente intensificada. Essa estratégia contribui para práticas construtivas mais sustentáveis.

Em relação às propriedades mecânicas, constatou-se que a resistência à compressão aumentou com o acréscimo no número de golpes do martelo Próctor. Contudo, esse comportamento foi observado apenas nos traços com a mesma relação P/Ag de 0,40, particularmente entre 5 e 10 golpes. O traço compactado com 20 golpes não apresentou desempenho mecânico equivalente ao traço com relação P/Ag de 0,50. Esse resultado destaca a relevância da proporção P/Ag para o desempenho final do concreto permeável.

A VPU aumentou com a redução da porosidade. Ainda assim, observou-se que a VPU é sensível à composição dos materiais constituintes do concreto permeável, possivelmente em razão das variações nas densidades e na tortuosidade do meio. Nesse contexto, destaca-se a importância do ajuste adequado do FG no método do ultrassom, uma vez que concretos com maiores porosidades requerem fatores de ganho mais elevados para assegurar medições precisas.

Dessa forma, o presente estudo permitiu estabelecer considerações relevantes acerca das propriedades do concreto permeável, em especial no que se refere à energia de compactação e à definição de parâmetros para medições confiáveis por meio do ultrassom. Sugere-se, contudo, que investigações futuras ampliem a análise para diferentes relações P/Ag combinadas a distintos níveis de compactação, bem como incluam faixas granulométricas variadas, tendo em vista as limitações impostas pelos traços abordados neste estudo.

Agradecimentos

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana (UTFPR/AP).

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

SANTOS, L. E: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados. **MARTINS FILHO, S. T.:** revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10:** report on pervious concrete. Farmington Hills: ACI, 2010.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688 / C1688M.** Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete. West Conshohocken: ASTM, 2023.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754 / C1754M.** Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. West Conshohocken: ASTM, 2021.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597.** Pulse velocity through concrete. West Conshohocken: ASTM, 2023.

ANBURUVEL, A.; SUBRAMANIAM, D, N. Investigation of the effects of compaction on compressive strength and porosity characteristics of pervious concrete. **Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board**, v. 2676, n. 9, p. 513-525, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981221087236>.

ANSARI, A.; MAHAJAN, M. Influence of compaction methods on functional and structural performance of pervious concrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)**, v. 11, n. 7, p. 94-105, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34218/IJCET.11.7.2020.009>.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102-110, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>.

CAHILL, T. H.; ADAMS, M.; MARM, C. Porous asphalt: the right choice of porous pavements. **HMAT: Hot Mix Asphalt Technology**, v. 8, n. 5, p. 26-40, 2003. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/664393>. Acesso em: 09 mai. 2025.

CAVALARO, S. H. P.; BLANCO, A.; PIERALISI, R. Holistic modelling approach for special concrete: from fresh- to hardened-state. **RILEM Technical Letters**, v. 3, p. 84-90, 2019. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.67>.

COSIC, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69-76, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500013>.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Investigations on pervious concrete properties using ultrasonic wave applications. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 45, n. 5, p. 1736-1749, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20160117>.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4181-4189, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055>.

ELANGO, K. S.; GOPI, R.; SARAVANAKUMAR, R.; RAJESHKUMAR, V.; VIVEK, D.; RAMAN, S. V. Properties of pervious concrete: a state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, Part 2, p. 2422-2425, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.839>.

FERIĆ, K.; KUMAR, V. S.; ROMIĆ, A.; GOTOVAC, H. Effect of aggregate size and compaction on the strength and hydraulic properties of pervious concrete. **Sustainability**, v. 15, n. 2, 1146, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021146>.

GAEDICKE, C.; TORRES, A.; HUYNH, C.T.; MARINES, A. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 271- 278, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.031>.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 7, n. 3, p. 183-191, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:3\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:3(183)).

GENTIL, F. S.; RIBEIRO, F. R. C.; MENEGOTTO, C. W.; SILVA, I. W.; KAZMIERCZAK, C. S. Influence of cement paste thickness and volume of on pervious concrete properties. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 5, e17509, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000500009>.

HISATOMI, J. N.; MARTINS FILHO, S. T.; COBO, D. T. Analysis of pervious concrete properties for mixtures of different w/c ratios. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, e04387, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-080>.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete: an experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2664-2671, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>.

LIMA, M. S.; CHAVES, M. T. R.; AGUIAR, M. F. P.; FARIAS, T. R. L. Influência do resíduo de construção e demolição como agregado na produção de concreto para pavimentos permeáveis. **Revista Principia**, v. 62, e8566, 2025. DOI: <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2024id8566>.

MARTINS FILHO, S. T.; BOSQUESI, E. M.; FABRO, J. R.; PIERALISI, R. Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 483-500, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000300003>.

MARTINS FILHO, S. T. **Metodologia de caracterização do escoamento não linear no concreto permeável**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/72412>.

MARTINS FILHO, S. T.; PIERALISI, R.; LOFRANO, F. C. Framework to characterize nonlinear flow through pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 151, 106633, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106633>.

MIKAMI, R. J.; PIERALISI, R.; PEREIRA, E. Influence of compaction energy on pervious concrete properties and vertical porosity distribution. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000200003>.

NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271-282, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>.

PIERALISI, R.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 149-160, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.009>.

PIERALISI, R.; SANDOVAL G. F. B.; SEGURA-CASTILLO, L.; BARBOSA, M. N. C.; ASSUNÇÃO S. T. Contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de dosagem para concreto permeável baseada no desempenho. **Journal of Urban Technology and Sustainability**, v. 3, n. 1, p. 18-27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.47842/juts.v3i1.19>.

RAMOS, M. O.; PINHEIRO, I. G.; SOUSA JUNIOR, L. G. Influência da porosidade na condutividade térmica, resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 515-528, 2021. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5536>.

RIDENGAOQUIER, E.; HATANAKA, S.; PALAMY, P.; KURITA, S. Experimental study on the porosity evaluation of pervious concrete by using ultrasonic wave testing on surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 300, 123959, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123959>.

SAHDEO, S. K.; CHANDRAPPA, A.; BILIGIRI, K. P. Effect of compaction type and compaction efforts on structural and functional properties of pervious concrete. **Transportation in Developing Economies**, v. 7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40890-021-00129-0>.

SAHDEO, S. K.; RANSINCHUNG, G. D.; RAHUL, K. L.; DEBBARMA, S. Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 255, 119260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119260>.

SCHAEFER, V. R.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T.; WHITE, D. J. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. Report. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2006. Disponível em: https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/38663/dot_38663_DS1.pdf. Acesso em: 26 maio 2025.

SIMÕES, O. G.; ZANOTELLI, J.; PILAR, R.; SCHANKOSKI, R. Avaliação das propriedades mecânicas e de permeabilidade de peças de concreto permeável contendo resíduos de rocha ornamental. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 4, p. 241-254, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400701>.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. Skokie: Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete, 2004.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850-859, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187>.

VALE, R. S.; OLIVEIRA, J. H.; ARMESTO, L. M.; SERAFINI, R. Concreto permeável de cimento Portland: permeabilidade e resistência à compressão. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 4, p. 289-306, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i4.5054>.

ZHU, Y.; FU, H.; WANG, P.; XU, P.; LING, Z.; WEI, D. Pore structure characteristics, mechanical properties, and freeze-thaw resistance of vegetation-pervious concrete with unsintered sludge pellets. **Construction and Building Materials**, v. 382, 131342, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131342>.