

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JÚLIA NANTES HISATOMI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL PARA
DIFERENTES CONSISTÊNCIAS: AGREGADOS NA FAIXA DE 4,8 A 6,3 MM**

APUCARANA

2023

JÚLIA NANTES HISATOMI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL PARA
DIFERENTES CONSISTÊNCIAS: AGREGADOS NA FAIXA DE 4,8 A 6,3 MM**

**ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE FOR DIFFERENT
CONSISTENCIES: AGGREGATES IN THE RANGE OF 4.8 TO 6.3 MM**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Dr. Sergio Tunis Martins Filho.

APUCARANA

2023



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JÚLIA NANTES HISATOMI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL PARA
DIFERENTES CONSISTÊNCIAS: AGREGADOS NA FAIXA DE 4,8 A 6,3 MM**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15/junho/2023

Sergio Tunis Martins Filho
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Antonio Farani de Souza
Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Renan Borelli Galvão
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

APUCARANA

2023

Dedico este trabalho à minha família, por sua dedicação, ensinamentos, incentivo e suporte, mesmo durante momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Apucarana, onde adquiri conhecimento acadêmico e profissional, além do crescimento pessoal.

Ao professor Sergio Tunis Martins Filho, pela disposição e dedicação como meu orientador. Sou muito grata pelos seus ensinamentos, incentivo e empenho. Admiro sua compreensão e consideração para com todos, sendo sempre um exemplo de indulgência e perseverança.

À professora Adriana Faganello por disponibilizar o Laboratório de Materiais da Construção Civil. Ao professor Leonardo Silva por disponibilizar o Laboratório de Estruturas e acompanhar os ensaios de resistência. E a todos os professores que contribuíram para minha formação.

Ao Pedro Aoki, Gustavo Avelino e todos os servidores responsáveis por promover a organização, limpeza e manutenção dos laboratórios.

Às minhas amigas Bruna Pierotti, Taciana Banckes, Maria Eduarda Pelizaro e Amanda Murari, pela compreensão durante minha ausência, e pelos ensinamentos no âmbito profissional. Mulheres, engenheiras e exemplos de esforço e comprometimento.

Ao meu amigo Fernando Dias pelo acolhimento e companheirismo. Ao Daniel Cobo e Rodrigo Novais pelo suporte e contribuição durante o desenvolvimento do TCC. E a todos os meus colegas de graduação que me acompanharam até esse momento.

À minha família por todo apoio e acolhimento. Em especial, aos meus pais e minha irmã que sempre se esforçaram para garantir que eu recebesse uma boa educação, me incentivaram a aproveitar as oportunidades, ensinaram a importância dos valores morais e são minha base, meu porto seguro.

E, principalmente, a Deus, por me dar forças para que eu não desanimasse nos em momentos difíceis e de incerteza.

O fardo é proporcional à força, como a recompensa será proporcional à resignação e à coragem (KARDEC, 1864).

RESUMO

Buscando mitigar os problemas ambientais causados pelas áreas impermeáveis, a aplicação do concreto permeável para auxiliar a drenagem urbana vem crescendo, uma vez que aumenta a infiltração e reduz o escoamento das águas pluviais. O concreto permeável é composto por cimento Portland, agregado graúdo e água, podendo conter aditivos, porém a quantidade de agregado miúdo é reduzida ou inexistente. Os seus benefícios incluem reduzir o pH e poluentes que possam estar presentes na água, reduzir a poluição sonora e o efeito da ilha de calor. Este trabalho busca analisar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável para 5 traços com diferentes relações a/c (água/cimento) e relação P/Ag (pasta/agregado) para agregados de faixa 4,8 – 6,3 mm. Para isso realizaram-se ensaios de densidade no estado fresco e endurecido, ultrassom, permeâmetro de carga constante e de resistência à compressão. Os resultados apontaram que o aumento da relação a/c e P/Ag resultam no aumento da densidade e da resistência, de até 17 MPa, porém reduz a porosidade. O comportamento hidráulico pode ser analisado relacionando a porosidade e o parâmetro d/\sqrt{k} , uma vez que o regime de escoamento é considerado não linear, ou não-Darciano. Além disso, o ponto utilizado da curva de dosagem direciona a moldagem de concreto permeável de modo satisfatório, visto que os resultados obtidos correspondem com as propriedades previstas.

Palavras-chave: Concreto permeável; Permeâmetro de carga constante; Comportamento hidráulico; Relação água cimento; Relação pasta agregado.

ABSTRACT

Seeking to mitigate the environmental problems caused by impermeable areas, the application of permeable concrete to aid urban drainage has been growing, since it increases infiltration and reduces the runoff of rainwater. Permeable concrete is composed of Portland cement, coarse aggregate and water, and may contain additives, but the amount of fine aggregate is reduced or non-existent. Its benefits include reducing the pH and pollutants that may be present in the water, reducing noise pollution and the heat island effect. This work seeks to analyze the physical, mechanical and hydraulic properties of permeable concrete for 5 mixes with different w/c ratios (water/cement) and P/Ag ratio (paste/aggregate) for aggregates in the range of 4.8 – 6.3 mm. Therefore, tests were carried out for density in the fresh and hardened state, ultrasound, constant head permeameter and compressive strength. The results showed that the increase in the w/c and P/Ag ratio resulted in an increase in density and strength, up to 17 MPa, but reduced the porosity. The hydraulic behavior can be analyzed relating porosity and the d/\sqrt{k} parameter, since the flow regime is considered non-linear, or non-Darcian. In addition, the point used on the dosage curve directs the molding of permeable concrete satisfactorily, as the results obtained correspond to the predicted properties.

Keywords: Pervious concrete; Constant head permeameter; Hydraulic behavior; Cement water ratio; Aggregate folder ratio.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico de porosidade X permeabilidade	22
Figura 2 - Gráfico que relaciona Lei de Darcy e Lei de Forchheimer	25
Figura 3 - Relação a/c limite para as respectivas relações P/Ag	29
Figura 4 - Fluxograma da metodologia.....	31
Figura 5 - Esquemática do ensaio de ultrassom.....	38
Figura 6 - Permeômetro de carga constante	40
Fotografia 1 - Peneiramento	28
Fotografia 2 - Agregado lavado na estufa	29
Fotografia 3 - Equipamentos e ferramentas utilizadas.....	33
Fotografia 4 - Moldagem.....	33
Fotografia 5 - Corpos de prova desmoldado após 24 horas.....	36
Fotografia 6 - Pesagem hidrostática.....	37
Fotografia 7 - Ensaio ultrassom.....	39
Fotografia 8 - Permeômetro de carga constante.....	41
Fotografia 9 - Ensaio de resistência à compressão	42
Fotografia 10 - Aparência dos 5 traços para comparação visual	44
Fotografia 11 - Ensaio de resistência à compressão	56
Gráfico 1 - Relação a/c x densidade no estado fresco	45
Gráfico 2 - Relação a/c x densidade no estado endurecido.....	46
Gráfico 3 - Densidade no estado fresco x densidade no estado endurecido	46
Gráfico 4 - Relação a/c x porosidade.....	47
Gráfico 5 - Porosidade x densidade no est. endurecido	48
Gráfico 6 - Densidade no est. endurecido x VPU.....	49
Gráfico 7 - VPU x porosidade	49
Gráfico 8 - VPU média x porosidade média.....	50
Gráfico 9 - Frequência x VPU	51
Gráfico 10 - Velocidade média x gradiente hidráulico (amostra: CP4534-1).....	52
Gráfico 11 - Porosidade x d/\sqrt{k}	54
Gráfico 12 - Relação a/c x resistência à compressão.....	55
Gráfico 13 - Resistência à compressão e porosidade.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição comum do concreto permeável	20
Tabela 2 - Traços	30
Tabela 3 - Quantidade de CPs produzidos e ensaiados.....	34
Tabela 4 - Principais resultados das propriedades	43
Tabela 5 - Dados hidráulicos.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano de Concreto
Coef.	Coeficiente
Cons.	Consumo
Est.	Estado
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
VPU	Velocidade do pulso ultrassônico

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Água/Cimento
σ	Desvio padrão
K	Coefficiente de permeabilidade
k	Coefficiente de permeabilidade intrínseca
L	Comprimento do corpo de prova
d	Comprimento do meio poroso
K'	Constante do princípio de Arquimedes
c	Constante geométrica do meio poroso
D_e	Densidade no estado endurecido
D_f	Densidade no estado fresco
D_t	Densidade teórica
h	Distância entre o fundo do corpo de prova e o nível da água
i	Gradiente hidráulico
g	Gravidade
t	Intervalo de tempo
ρ	Massa específica do fluido
M_c	Massa líquida do concreto
M_c	Massa seca do corpo de prova
M_s	Massa seca dos materiais dosados
M_w	Massa submersa do corpo de prova
P/Ag	Pasta/Agregado
P_f	Porosidade no estado fresco
P_t	Porosidade total
f'_c	Resistência à compressão
f'_{co}	Resistência da matriz
V_s	Soma dos volumes absolutos de cada material
da	Tamanho do agregado
dp	Tamanho médio dos poros.
Q	Taxa de fluxo
Δt	Tempo de escoamento
ΔV	Vazão
q	Velocidade média do fluxo
μ	Viscosidade dinâmica
V_m	Volume dos moldes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	Composição do concreto permeável	19
4.2	Propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável	20
4.2.1	Resistência à compressão e à tração	20
4.2.2	Porosidade e densidade	21
4.2.3	Velocidade de pulso ultrassônico	22
4.3	Propriedades hidrodinâmicas do concreto permeável	23
4.3.1	Escoamento não linear: abordagem não-darciana	23
4.4	Fatores que afetam as propriedades	25
4.4.1	Influência do agregado	25
4.4.2	Relação pasta agregado (P/Ag)	26
4.4.3	Relação água cimento (a/c).....	26
5	MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1	MATERIAIS	28
5.2	MÉTODOS	30
5.2.1	Moldagem	32
5.2.2	Densidade e porosidade.....	35
5.2.3	Ultrassom	38
5.2.4	Permeâmetro.....	39
5.2.5	Resistência à compressão	42
6	RESULTADOS	43
7	CONCLUSÃO	58
7.1	Conclusões específicas	58

1 INTRODUÇÃO

As ações antropológicas já modificaram significativamente 75% da superfície terrestre de todo o planeta, provocando a perturbação, ou até mesmo, a degradação de ecossistemas (DUARTE; BUENO, 2006; IPBES, 2019). O meio ambiente e os problemas ambientais ganharam mais relevância nos últimos tempos, e os mecanismos para mitigar os desastres naturais, mudanças climáticas e restaurar os ecossistemas danificados continuam a ser debatidos, juntamente com o desenvolvimento sustentável.

No contexto da construção civil, essas modificações ocorrem pelo crescimento urbano, construção de estradas e rodovias, com conseqüente aumento das áreas impermeabilizadas nas cidades, principalmente nos países em desenvolvimento, o que provocam um aumento no volume e na velocidade do escoamento superficial (FOSTER; MORRIS; CHILTON, 1999).

A partir do século XX, novos estudos começaram a ser desenvolvidos em relação ao concreto permeável e sua utilidade como material do pavimento poroso, e atualmente é considerado uma *best management practices* (BMP), ou seja, “melhor técnica de gerenciamento”, comum na gestão de sistemas de drenagem urbana com a finalidade de aumentar a infiltração e reduzir o escoamento das águas pluviais (TOMAZ, 2006; TAFAZZOLI, 2018; TEYMOURI; PAUZI; WONG, 2023).

O concreto permeável é constituído por pouco ou nenhum agregado miúdo, garantindo a formação de poros que interligam a sua superfície à base permitindo a passagem do fluido (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2021). Os primeiros usos do concreto poroso ou permeável foram na Europa, em meados do século 19, porém em baixa escala. Após a Segunda Guerra Mundial, tornou-se mais popular por conta da escassez de materiais para construção civil (ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2020).

O concreto permeável possui a composição similar à do concreto comum, ou seja, cimento Portland, agregado graúdo e água, podendo conter aditivos, porém a quantidade de agregado miúdo é reduzida ou inexistente. Por conta da redução do agregado miúdo, o fator água/cimento deve ser inferior em relação ao concreto tradicional para garantir uma boa trabalhabilidade e a formação dos poros interligados. O tamanho dos poros varia entre 2 a 8 mm e o índice de vazios deve variar entre 15 e 35% de modo a proporcionar uma permeabilidade superior a 0,001 m/s (ACI

COMMITTEE 522, 2010; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

O concreto permeável é mais empregado como uma das camadas do pavimento permeável, porém devido a presença dos poros sua densidade e resistência à compressão são inferiores às do concreto comum, variando de 1680 a 1920 kg/m³ e de 2,8 a 28 MPa, respectivamente. Por isso, recomenda-se sua utilização em locais com tráfego leve como estacionamentos, pátios, calçadas, pistas de caminhada e ciclovias (ACI COMMITTEE 522, 2010; ZHONG; LENG; POON, 2018).

É considerado um material sustentável, pois contribui na recarga das águas subterrâneas e na qualidade da água pluvial, além disso existem estudos que evidenciam a absorção de ruídos e redução do efeito da ilha de calor (CARLSON et al., 2011; JANG et al., 2015; KIM et al., 2017; KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012).

Buscando mitigar esses problemas ambientais e reduzir os impactos causados pelas ações de impermeabilização, foi proposto um estudo das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável verificando suas características para diferentes consistências da pasta.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Analisar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do concreto permeável para traços com diferentes relações a/c para agregados de faixa 4,8 – 6,3 mm.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar escoamento no concreto permeável em permeâmetro de carga constante;
- Analisar a influência da relação P/Ag e a/c nas propriedades físicas: densidade e porosidade no estado fresco; e densidade e porosidade no estado endurecido;
- Verificar a resistência à compressão do concreto permeável para diferentes relações a/c e P/A; e
- Avaliar a velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU) para as diferentes porosidades.

3 JUSTIFICATIVA

É possível observar um aumento na procura pela utilização do concreto permeável nos diversos centros urbanos (RANGELOV et al., 2016). À medida que o êxodo rural se intensificou entre 1960 e 1980 no Brasil, causando crescimento das áreas urbanas (IBGE, 2015; ALVES; SOUZA; MARRA, 2011), muitas vezes sem planejamento, gerou uma redução da infiltração da água da chuva e aumento no escoamento superficial por conta da impermeabilização em larga escala, resultando em enchentes urbanas comumente vistas nos países em desenvolvimento, onde o sistema de drenagem é insuficiente (FOSTER; MORRIS; CHILTON, 1999; SANTOS; RUFINO; BARROS, 2016).

A impermeabilização também afeta o balanço hídrico, desequilibrando a recarga das águas subterrâneas, uma vez que dificulta a infiltração próximo a grandes áreas urbanas. Porém, quando essa infiltração desigual ocorre existe o risco de reduzir a quantidade e a qualidade da água nos lençóis freáticos, e até uma possível contaminação do solo e da água infiltrada (CARLSON et al., 2011).

Nesse contexto, muitos estudos vêm sendo realizados para identificar ferramentas que possam reduzir os problemas da drenagem urbana, como o concreto permeável. Além de promover a infiltração de água no solo e reduzir o escoamento superficial, há outros benefícios que colaboram para um ambiente mais sustentável (TOMAZ, 2006; CARLSON et al., 2011).

O concreto permeável ajuda a reduzir poluentes que possam estar presentes na água (KIM et al., 2015, 2017). Thomle (2010) também apresenta um resultado positivo na redução do pH da água após ser filtrada no concreto permeável.

Outro benefício desse material que pode ser observado mais facilmente no dia a dia é a redução de ruído do ambiente, proporcionado pela sua porosidade. Se a densidade for menor, ou seja, é um concreto mais poroso, ou se existe maior número de interligação entre os poros, melhor será a absorção acústica (NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2006; TIE et al., 2020).

Apesar de uma boa absorção acústica, um concreto permeável pouco denso, ou com maior volume de poros conectados, pode reduzir sua resistência à compressão. Desse modo, é necessário um índice de vazios de 10% para que ocorra uma boa absorção acústica e o concreto mantenha sua resistência superior à 20 MPa (ALEMU et al., 2021).

Além da poluição sonora, as ilhas de calor também impactam diariamente a qualidade de vida de pessoas no meio urbano. Apesar de esquentar com o aumento da temperatura, o concreto permeável esfria mais rapidamente quando a temperatura diminui, comparado com o concreto convencional e poderia começar a ser utilizado como pavimento fresco, ou *cool pavement* (HASELBACH et al., 2011).

Apesar de não ter uma refletância solar elevada, por conta da superfície porosa, o concreto permeável armazena menos energia que o concreto tradicional, assim também contribuindo para reduzir o efeito da ilha de calor (KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aplicação do concreto permeável não é tão ampla quanto outras tecnologias mais tradicionais, porém, estudos para caracterizar seu comportamento e verificar sua viabilidade tem aumentado nos últimos anos, para que seja utilizado como um sistema alternativo ou complementar da drenagem urbana (RANGELOV et al., 2016).

O concreto permeável pode colaborar de diversas formas, e mesmo com o crescente interesse dos pesquisadores nesse sistema, ainda não existe uma regulamentação precisa para execução, ensaios e manutenção. A heterogeneidade e a aleatoriedade na formação dos poros, e a interligação entre os mesmos, dificulta uma normatização (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). Entretanto as pesquisas relacionadas a esta tecnologia vêm crescendo e buscando novas abordagens.

Apesar do concreto permeável ser considerado uma ferramenta eficiente para o sistema de drenagem, ainda são necessárias muitas pesquisas para determinar o seu comportamento, performance e manutenção (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). A partir do século XX muitos estudos começaram a ser desenvolvidos para determinar a melhor composição, confecção e manutenção levando em consideração suas propriedades como a taxa de infiltração, resistência à compressão, porosidade e permeabilidade (TOMAZ, 2006).

4.1 Composição do concreto permeável

Em relação a mistura utilizada em diferentes pesquisas, o fator água/cimento varia entre 0,22 e 0,55, o fator agregado/cimento varia entre 1,7 e 6,0, a quantidade de finos varia entre 0 e 20% (ZHON; LENG; POON, 2018), como mostra a Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Composição comum do concreto permeável

Fator água/cimento (a/c)	Fator agregado/cimento (Ag/c)	Areia fina (%)	Autores
0,26 - 0,33	3,2 - 3,7	0 - 15	KEVERN et al. (2011)
0,32 - 0,33	1,7 - 6,0	-	DEO e NEITHALATH (2011)
0,22 - 0,55	2,5 - 3,5	-	ZHONG e WILLE (2015)
0,25 - 0,35	3,2 - 3,9	-	YANG (2011)
0,37 - 0,42	2,9 - 4,2	-	GHAFFORI e DUTTA (1995)
0,27 - 0,35	3,4 - 4,5	0 - 6,5	HUANG et al. (2010)
0,27 - 0,51	4,0 - 4,7	0 - 20	MEININGER (1988)

Fonte: Adaptado de Zhong, Leng e Poon (2018).

A escolha do agregado graúdo tem grande influência na performance do concreto permeável, por exemplo, a utilização de um agregado com formato mais arredondado promove melhor trabalhabilidade. Se o agregado escolhido apresentar uma superfície mais porosa, resultará em um concreto com menor densidade, porém terá uma maior absorção de água e ligação interfacial mais forte com a pasta cimento contribuindo para microestrutura do concreto (ZHUGE, 2008; CHENG et al., 2011; BARNHOUSE; SRUBAR III, 2016; YAP et al., 2018).

4.2 Propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável

4.2.1 Resistência à compressão e à tração

A baixa resistência é considerada um fator limitante do concreto permeável, pois restringe sua utilização, impedindo de ser aplicado em pavimento de tráfego moderado e pesado (MULLIGAN, 2005). A resistência do concreto permeável é inferior à do concreto convencional por conta da grande quantidade de vazios, porém a resistência da matriz, tamanho do agregado e o traço também influenciam significativamente o resultado final (ZHONG; WILLE, 2016).

A incorporação de aditivos e plastificantes, a variação na graduação, e a utilização de agregados menores melhoram a trabalhabilidade e aumentam a área total de ligação entre agregados vizinhos, dessa forma colaborando para aumentar a resistência final. Além disso, a resistência à compressão é diretamente proporcional à resistência da matriz, já a relação P/Ag (pasta/agregado) altera a porosidade total,

podendo aumentar a resistência, entretanto pode diminuir a quantidade de poros e a permeabilidade (ZHONG; WILLE, 2016).

Considerando os fatores que afetam a resistência, a equação 1 abaixo foi proposta por Zhong e Wille (2016) para estimar a resistência à compressão.

$$f'_c = f'_{co} (1 - m\Phi_t) \left(\frac{d_a}{d_p} \right)^n \quad (1)$$

Sendo:

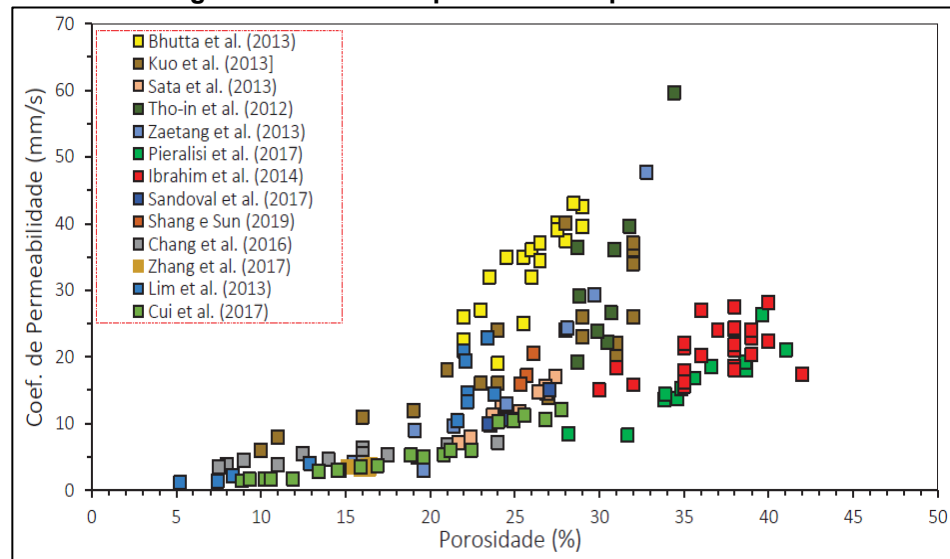
- f'_c : Resistência à compressão;
- f'_{co} : Resistência da matriz;
- t : Porosidade total;
- d_a : Tamanho do agregado, e;
- d_p : Tamanho médio dos poros.

4.2.2 Porosidade e densidade

Para maiores porosidades, menor será sua densidade (TIE et al, 2020) e, conseqüentemente menor sua resistência à compressão (ZHONG; WILLE, 2016).

Como a porosidade afeta diretamente a permeabilidade e a resistência do concreto permeável, é necessário diferenciar a porosidade total, ou seja, a razão entre volume total de poros e volume do material, da porosidade efetiva, que é calculada pela razão entre volume de poros acessíveis e volume do material (ZHONG; WILLE, 2016). A porosidade efetiva é inferior à porosidade total e auxilia a determinar a condutividade hidráulica (ZHONG e WILLIE, 2016). No entanto, através de uma análise estatística, verificou-se que a porosidade total é mais confiável para determinar as propriedades hidráulicas, pois ainda não há métodos laboratoriais bem definidos para estimar com precisão a porosidade conectada, ainda que faça mais sentido físico (MARTINS FILHO, 2021).

O coeficiente de permeabilidade é a propriedade que distingue o concreto permeável do concreto tradicional e por isso é considerada fundamental para garantir a sua funcionalidade, apesar de existir uma tendência da permeabilidade aumentar com o aumento da porosidade essa relação não é suficiente, como mostra a Figura 1 (NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010).

Figura 1 - Gráfico de porosidade X permeabilidade

Fonte: Martins Filho (2021).

Essa baixa correlação pode ser explicada pelo fato da porosidade estar relacionada a característica volumétrica, enquanto a permeabilidade é um parâmetro que caracteriza as propriedades do fluxo através do material, e que não depende apenas do volume dos poros, mas também da estrutura e distribuição dos poros, suas interligações e tortuosidade (NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2006; NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010; MARTINS FILHO; PIERALISI; LOFRANO, 2022).

4.2.3 Velocidade de pulso ultrassônico

O ensaio de ultrassom é utilizado para determinar a velocidade de pulso ultrassônico (VPU), também chamado de onda ultrassônica, no concreto permeável, o qual não é destrutivo (BOGAS; GOMES; GOMES, 2013). Esse parâmetro ajuda a analisar a qualidade do concreto, defeitos e fissuras internas, assim como o módulo de elasticidades, densidade, resistência à compressão, homogeneidade, entre outras propriedades do concreto (LORENZI et al., 2015; HONG et al., 2020).

Quanto maior a densidade, maior a VPU (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a), além disso, o tempo de cura é fator importante, pois com o passar do tempo, a porosidade diminui, e aumenta a densidade, a resistência à compressão, e consequentemente, a VPU (LIU et al., 2018; GODINHO et al., 2020).

Também foi verificado que apesar de uma alta porosidade resultar em uma baixa VPU, quando se mantém essa porosidade com agregados de maior diâmetro, a VPU aumenta (RIDENGAOQUIER; HATANAKA, 2021). Isso ocorre devido a maior homogeneidade para agregados de diâmetros inferiores e maior heterogeneidade

para agregados maiores, sendo que no último caso existe um caminho menor para a onda ultrassônica (RIDENGAOQIER; HATANAKA, 2021).

Em relação ao teste de ultrassom, é recomendado aplicar uma camada espessa de gel entre a superfície do corpo de prova e do transdutor, por conta da superfície irregular resultante da baixa relação pasta/agregado (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a). Além disso, devem ser analisados os intervalos de porosidade, pois em alta porosidade há atenuação da propagação da onda ultrassônica (MARTINS FILHO et al., 2020).

4.3 Propriedades hidrodinâmicas do concreto permeável

O escoamento de um fluido no concreto permeável envolve diversas variáveis tanto do meio poroso, como a porosidade total e efetiva, a rugosidade, a temperatura, densidade, e a viscosidade do fluido. Destaca-se que o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica relaciona o fluido com meio poroso, e a permeabilidade intrínseca considera apenas o meio poroso (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 1988; NUTTING, 1930 apud MARTINS FILHO, 2021).

A dinâmica do fluido em meios porosos pode ser estudada seguindo abordagens darcianas, que seguem a Lei de Darcy para escoamento linear, ou não-darcianas, como por exemplo a Lei de Forchheimer para escoamentos não lineares, conforme observado na abordagem de Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022).

4.3.1 Escoamento não linear: abordagem não-darciana

Em casos que a velocidade de infiltração é baixa, e o regime é laminar, a Lei de Darcy pode ser utilizada, porém quando a velocidade de infiltração aumenta o comportamento não linear torna-se mais evidente, então equações não lineares são mais adequadas (ZHANG et al., 2018; LEDERLE et al., 2020; MARTINS FILHO; PIERALISI; LOFRANO, 2022). Como observado Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022) a equação de Forchheimer mostrou-se com bom ajuste entre os resultados do escoamento.

Assim, o equacionamento representa melhor o comportamento do fluido no meio poroso quando existe um coeficiente linear e outro quadrático, como no caso da equação de Forchheimer, descrita pela equação 2 e representada na Figura 2.

$$i = a \cdot q + b \cdot q^2 \quad (2)$$

Sendo:

- i : gradiente hidráulico (m/m);
- a : coeficiente linear;
- q : velocidade média do fluxo (m/s), e;
- b : coeficiente quadrático.

Ahmed e Sunada (1969, apud MARTINS FILHO; PIERALISI; LOFRANO, 2022) apresentam os coeficientes a e b descritos nas equações 3 e 4, e a constante c na equação 5.

$$a = \frac{\mu}{\rho \cdot g \cdot k} \quad (3)$$

$$b = \frac{1}{g \cdot c \cdot d} \quad (4)$$

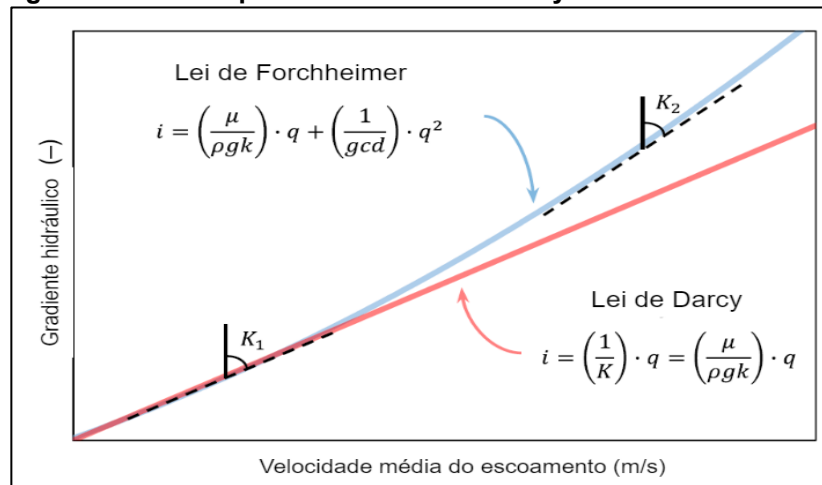
$$c = k/d^2 \quad (5)$$

Sendo:

- μ : viscosidade dinâmica do fluido ($Pa \cdot s$);
- ρ : massa específica (kg/m^3);
- g : aceleração gravitacional (m/s^2);
- k : coeficiente de permeabilidade intrínseco (m^2);
- c : constante do meio poroso, e;
- d : comprimento característico do meio poroso (m);

Como mencionado anteriormente, na Figura 2 pode ser observada a relação da Lei de Darcy, apenas com coeficientes lineares, e da Lei de Forchheimer, com o coeficiente linear e quadrático.

Figura 2 - Gráfico que relaciona Lei de Darcy e Lei de Forchheimer



Fonte: Adaptado de Martins Filho (2021).

Assim, a partir das considerações metodológicas, para caracterizar o escoamento no meio poroso, propostas por Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022), reescrevendo a equação 2 obtemos a equação 6.

$$i = \left(\frac{\mu}{\rho \cdot g \cdot k} \right) \cdot q + \left(\frac{1}{g \cdot c \cdot d} \right) \cdot q^2 \quad (6)$$

A partir desta, destaca-se que os termos obtidos d e \sqrt{k} (ou e d/\sqrt{k}) são parâmetros hidráulicos relacionados a definição da heterogeneidade do meio poroso e que auxiliam na interpretação das propriedades hidráulicas do concreto permeável (MARTINS FILHO; PIERALISI; LOFRANO, 2022).

4.4 Fatores que afetam as propriedades

4.4.1 Influência do agregado

A ACI 522R-10 (2010) afirma que os agregados utilizados na mistura de concreto permeável devem ser rígidos, limpos e ausentes de vestígios de sujeira, argila ou produtos químicos que podem prejudicar a hidratação do cimento ou ligação pasta/agregado.

A dimensão do agregado influencia significativamente a porosidade e o coeficiente de permeabilidade, pois a utilização de agregados de maior dimensão resulta em poros maiores e no aumento do coeficiente de permeabilidade (SCHAEFER et al., 2006; YU et al., 2019). Além da porosidade, a dimensão do agregado também interfere na resistência à compressão, pois quando o diâmetro

médio agregado é menor, a quantidade de ligações com agregados vizinhos é maior, aumentando a resistência à compressão (ZHONG; WILLE, 2016).

Normalmente o agregado miúdo não é adicionado no concreto permeável, porém uma adição de até 7% pode aumentar a resistência sem prejudicar a permeabilidade (KEVERN et al., 2008).

A substituição dos agregados naturais por agregados reciclados provoca uma redução na resistência à compressão (SRIRAVINDRARAJAH; WANG; ERVIN, 2012), porém a adição de polímero de silano pode contribuir significativamente com o desempenho mecânico, mantendo sua porosidade original (LIU et al., 2019).

4.4.2 Relação pasta agregado (P/Ag)

A relação entre pasta e agregado deve ser corretamente medida, pois a pasta deve envolver e ligar os agregados formando um sistema de transmissão de esforços e garantindo a formação de poros interligados (ACI 522, 2010; MARTINS FILHO, 2021).

Quando o volume de pasta aumenta a resistência à compressão também aumenta, porém a porosidade e permeabilidade diminuem (KEVERN, et al., 2008; DEO; NEITHALATH, 2011; MARTINS FILHO, 2021), e ainda pode causar a segregação da mistura e a impermeabilização da camada inferior (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017; MARTINS FILHO, 2021).

4.4.3 Relação água cimento (a/c)

Lian e Zhunge (2010) estudaram as relações a/c de 0,3 até 0,38, em intervalos de 0,02, e definiram a/c igual a 0,34 como ponto ótimo, já Debnath e Sakar (2019) estudaram as relações a/c de 0,28, 0,30, 0,32 e 0,35, e definiram que a faixa ótima está entre 0,30 e 0,32. Chandrappa e Biligiri (2016b) verificaram que ao variar a relação a/c de 0,25 até 0,35, aumentou a consistência e facilitou o adensamento, porém diminuiu a porosidade e a permeabilidade.

Buscando estabelecer uma metodologia para definir uma relação a/c ideal, Nguyen et al. (2014) desenvolveram um teste de drenagem da pasta de cimento, sendo a consistência ideal alcançada se não houver excesso de pasta. Após realizar o teste de drenagem para concretos com relação a/c de 0,28 aumentando 0,02 até 0,40, Nguyen et al. (2014) concluíram que a consistência ideal é dada pela relação a/c

de 0,36, pois relações inferiores dificultam o adensamento e relações superiores pode causar a segregação da pasta.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados para este trabalho.

5.1 MATERIAIS

Em relação aos materiais, serão utilizados:

- Cimento Portland CP-II-Z-32;
- Agregado retido na faixa 4,8mm a 6,3mm, e;
- Água.

O pedrisco foi peneirado garantindo a utilização de agregados na faixa de 4,8 a 6,3 mm, como mostra a Fotografia 1. Foi necessário lavar o agregado para retirada de finos, resíduos ou contaminantes, uma vez que a brita utilizada é da UTFPR-AP e estava armazenada em uma área aberta e sem proteção. Após a lavagem, o pedrisco foi colocado na estufa para secagem, como mostra a Fotografia 2.

Com base no trabalho desenvolvido por Martins Filho (2021), foi definida a utilização de cimento Portland CP-II-Z-32, o qual atende os requisitos da norma ABNT NBR 16697 (2018).

Fotografia 1 - Peneiramento



Fonte: Autoria própria (2023).

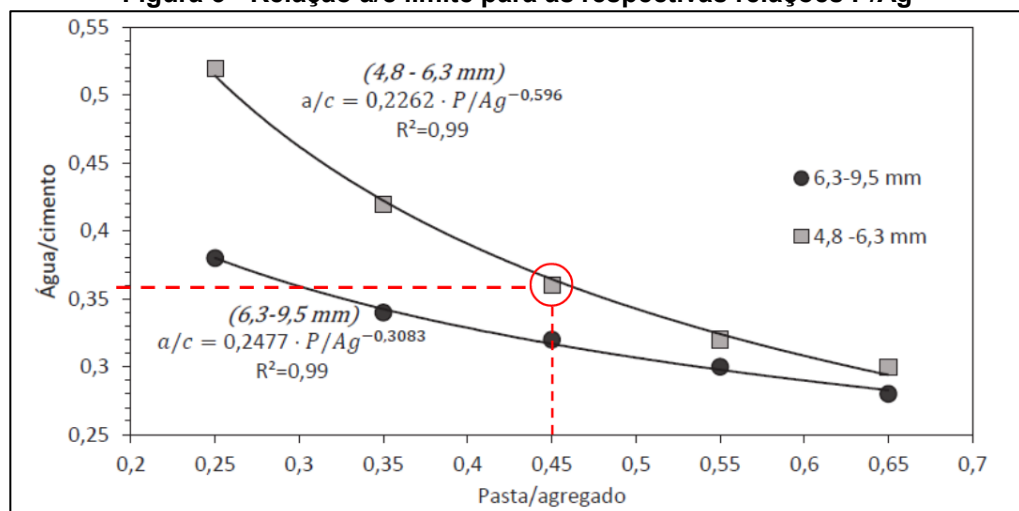
Fotografia 2 - Agregado lavado na estufa



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a determinação dos traços será utilizado o traço referência CP4536 obtido por Martins Filho (2021), destacado na Figura 3, através de um estudo de dosagem, o qual significa: cimento Portland (CP); relação pasta agregado ($P/Ag = 0,45$); e relação água cimento ($a/c = 0,36$). A relação a/c limite é determinada pelo teste de drenagem adaptado de Nguyen et al. (2014), o qual as relações P/Ag e a/c obtidas estão relacionadas a um traço que não apresente falta ou excesso de pasta, garantindo uma boa consistência. Dessa forma, Martins Filho (2021) elaborou uma curva de dosagem considerando a relação a/c limite para respectiva relação P/Ag , como mostra a Figura 3.

A moldagem foi feita com golpes de haste e agregados com distribuição uniforme.

Figura 3 - Relação a/c limite para as respectivas relações P/Ag 

Fonte: Martins Filho (2021).

A Tabela 2 apresenta os 5 traços escolhidos, sendo um deles o traço de referência. Também apresenta a quantidade em quilogramas de cada material adicionado na betoneira, e o consumo real médio de cimento calculado após encontrar a densidade endurecida.

Tabela 2 - Traços

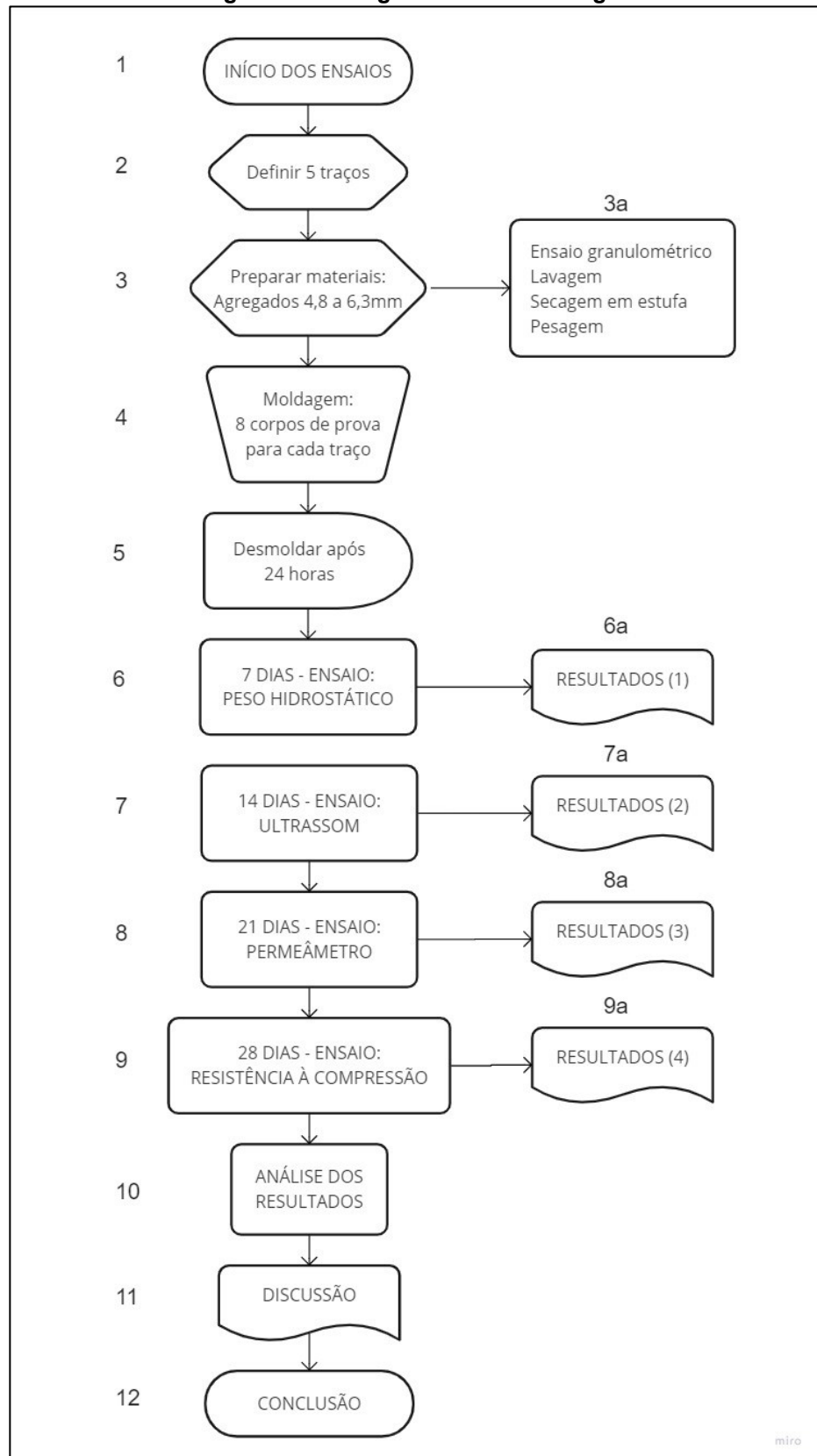
Traços	Relação P/Ag	Traço em massa			Quantidade em kg			Cons. real médio de cimento (kg/m ³)
		CIMENT	AGR	A/C	CIMENT	AGR	ÁGUA	
CP4534	0,45	1	2,98	0,34	6,72	20	2,28	417,94
CP4536 (REF)	0,45	1	3,02	0,36	6,62	20	2,38	427,24
CP4538	0,45	1	3,07	0,38	6,52	20	2,48	432,98
CP4540	0,45	1	3,11	0,40	6,43	20	2,57	423,57
CP5536	0,55	1	2,47	0,36	8,09	20	2,91	514,13

Fonte: Autoria própria (2022).

5.2 MÉTODOS

A metodologia segue as etapas indicadas no fluxograma apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria (2022).

Visando a análise laboratorial do concreto permeável e agregar conhecimento de suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas, foram feitos os ensaios de

peso hidrostático no estado fresco e endurecido, ultrassom, permeâmetro de carga constante e resistência à compressão.

A moldagem e os ensaios dos corpos de prova foram feitos no laboratório de materiais da construção civil e laboratório de estruturas da UTFPR-AP, Bloco P. Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Peneiras granulométricas 4,75 e 6,3 mm;
- Estufa;
- Moldes de CP com diâmetro de 100 mm e altura 200 mm;
- Balança 120 kg;
- Balança hidrostática;
- Betoneira 120 litros;
- Ultrassom PROCEQ/Pundit Lab;
- Permeâmetro de carga constante, e;
- Máquina universal de ensaios WDW-300E.

Foram definidos 5 traços, variando a relação de pasta e agregado (P/Ag) e o fator água cimento (a/c), para uma melhor compreensão do concreto permeável. Os traços escolhidos e a metodologia adotada foram definidos tomando como referência o estudo de Martins Filho (2021). Os procedimentos descritos a foram repetidos para todos os corpos de prova.

5.2.1 Moldagem

Primeiramente, foi realizado o peneiramento do pedrisco para garantir uma faixa granulométrica com distribuição uniforme de 4,75 a 6,3 mm, ou seja, utilizando apenas os agregados retidos na peneira 4,75 mm. O agregado foi lavado e colocado na estufa para secagem.

Os materiais foram pesados e misturados na betoneira para a moldagem de 8 corpos de prova para cada traço. Martins Filho (2021) utiliza procedimentos descritos por Schaefer et al. (2006), seguindo as instruções a mistura foi feita da seguinte forma: na betoneira foram lançados todo o agregado e todo o cimento, misturados por dois minutos; a água foi adicionada e misturados por mais um minuto; em seguida, a betoneira foi desligada e o concreto foi misturado manualmente para incorporar o material retido na parede da betoneira e garantir a homogeneidade; após

um minuto de mistura manual, a betoneira foi ligada novamente, e o concreto foi misturado por mais um minuto.

Fotografia 3 - Equipamentos e ferramentas utilizadas



Fonte: Autoria própria (2023).

Os moldes dos CPs foram devidamente lubrificadas com óleo desmoldante e o concreto foi colocado em três camadas, sendo que cada camada recebeu 25 golpes de haste para compactação. Para completar todo o volume do molde de CP, foi acrescentada uma última camada, sem compactação, e nivelada com uma pá de pedreiro.

Fotografia 4 - Moldagem



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 3 apresenta a quantidade de CPs produzidos e ensaiados, além da idade em que foram realizados os ensaios.

Tabela 3 - Quantidade de CPs produzidos e ensaiados

Idade do concreto	0 dias (após a moldagem)	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Traço	Densidade no est. fresco	Densidade no est. endurecido	Ensaio de ultrassom	Permeâmetro de carga constante	Resistência à compressão
CP4534	9	9	9	3	9
CP4536	9	9	9	3	9
CP4538	8	8	8	3	8
CP4540	8	8	8	3	6
CP5536	9	9	9	3	9

Fonte: Autoria própria (2023).

Foram realizados apenas 3 ensaios de permeâmetro de carga constante para cada traço, pois se trata de um ensaio que consome um volume muito grande de água, e visando reduzir esse desperdício, foi estipulado que este teste não seria feito para todos os CPs. Além disso, dois corpos de prova do traço CP4540 foram separados para realização de outros testes posteriormente, e por isso não foram todos rompidos no ensaio de resistência à compressão.

5.2.2 Densidade e porosidade

Os ensaios e fórmulas que foram usados para a determinação da densidade e porosidade têm como base a ASTM C1745 (2012 apud NASSIRI, 2020; SHERWANI et al; HUNG, 2021, MARTINS FILHO, 2021).

Estado fresco

A pesagem no estado fresco é feita logo após a moldagem, sendo necessário apenas uma balança de precisão. Primeiro é necessário verificar o peso e identificar os moldes ainda vazios, e após a moldagem e compactação, o corpo de prova é pesado e os valores anotados.

É necessário determinar a densidade teórica, representada pela equação 7, pois será utilizada na determinação da porosidade.

$$D_t = \frac{M_s}{V_s} \quad (7)$$

Sendo:

- D_t : Densidade teórica (kg/m^3);
- M_s : Massa seca de todos os materiais (kg); e
- V_s : Volume absoluto de cada material (m^3).

Conhecendo o volume de cada molde e a massa dos CPs no estado fresco, é possível determinar a sua densidade experimental, e conseqüentemente sua porosidade, relacionando a densidade experimental com a teórica. Para isso foram utilizadas as equações 8 e 9.

$$D_f = \frac{M_{cf}}{V_m} \quad (8)$$

$$P_f = \frac{D_t - D_f}{D_t} \cdot 100 \quad (9)$$

Sendo:

- D_f : Densidade no estado fresco (kg/m^3);
- M_{cf} : Massa do CP no estado fresco (kg);
- V_m : Volume do molde (m^3); e
- P_f : Porosidade no estado fresco (%).

Nas primeiras 24 horas após a moldagem, os corpos de prova foram deixados em um ambiente plano, seco e sem vibrações para a cura inicial. Passadas as 24 horas, foi feita a desmoldagem e os demais ensaios.

Estado endurecido

Para determinar a densidade e porosidade no estado endurecido, foi necessário esperar aproximadamente 7 dias de cura e realizar a pesagem hidrostática. Primeiramente, o CP precisa ficar saturado, por isso foi deixado em um tanque submerso em água por 24 horas anteriores ao teste. Após esse período, ele é retirado da água e sua superfície seca, em seguida foi pesado em uma balança de precisão, e o valor foi anotado.

Fotografia 5 - Corpos de prova desmoldado após 24 horas



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o próximo passo, foi utilizada uma balança hidrostática, a qual possui um cesto metálico vazado acoplado na sua parte inferior, e um balde cheio de água logo abaixo da balança, como mostra a Fotografia 6. O CP no estado endurecido foi colocado no cesto metálico, pendurado por um fio e submerso no balde d'água, garantindo que todos os vazios acessíveis fossem preenchidos, sem que o cesto encoste no fundo ou nas laterais do balde.

Fotografia 6 - Pesagem hidrostática



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2023).

Feita a pesagem, o CP foi levado para a estufa, onde ficou por outras 24 horas, de modo a garantir que estivesse totalmente seco. Então foi feita uma nova pesagem em balança de precisão com o CP endurecido e seco.

Assim como a pesagem no estado fresco, é possível obter a densidade e porosidade no estado endurecido, utilizando as equações 10 e 11.

$$D_e = \frac{K' \cdot M_{ce}}{\phi^2 \cdot L} \quad (10)$$

$$P_t = \left[1 - \left(\frac{K' \cdot (M_{ce} - M_{cw})}{\rho_w \cdot \emptyset^2 \cdot L} \right) \right] \cdot 100 \quad (11)$$

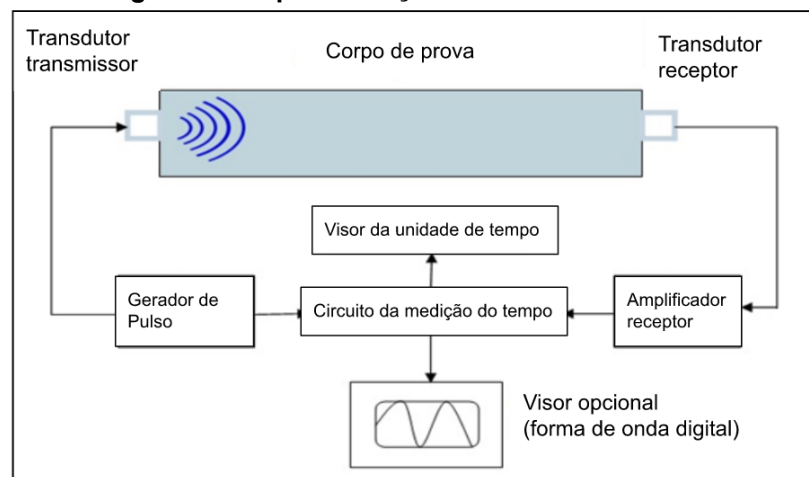
Sendo:

- D_e : Densidade no estado endurecido (kg/m^3);
- K' : Constante = 1.274.240,00 ($mm^3 \cdot kgm^3 \cdot g$);
- M_{ce} : Massa do CP no estado endurecido seco (kg);
- \emptyset : Diâmetro do CP (mm);
- L : Comprimento do CP (mm);
- P_t : Porosidade total no estado endurecido (%);
- M_{cw} : Massa do CP no estado endurecido submerso (kg); e
- ρ_w : Massa específica da água (kg/m^3).

5.2.3 Ultrassom

Este ensaio foi realizado após 14 dias de cura do CP e utilizando um equipamento de ultrassom PROCEQ/Pundit Lab, esquematizado pela Figura 5, o qual possui um gerador de pulsos que transmite as ondas de um transdutor para outro, no sentido longitudinal do corpo de prova, e o amplificador receptor capta os dados das ondas que sofreram espalhamento ao longo do corpo de prova (JAIN; PATANKAR; KULKARNI, 2021). O próprio aparelho de ultrassom processa esses dados e apresenta os resultados do tempo e velocidade do pulso ultrassônico.

Figura 5 - Esquematização do ensaio de ultrassom



Fonte: Adaptado de Jain, Patankar e Kulkarni (2021).

Em relação aos parâmetros escolhidos, foi determinada uma vibração de onda ultrassônica de 24 kHz, o fator de amplificação do receptor com ajuste de 500, ou seja,

54 dB e comprimento longitudinal do CP de 0,20 m, como mostra a Fotografia 7 (MARTINS FILHO et al., 2020). Também foram feitos testes nas frequências 32 kHz, 54 kHz e 82 kHz para avaliar se haveria uma diferença significativa nos resultados. Para garantir que o teste fosse eficaz, foi aplicada uma camada grossa de gel, uma vez que a superfície do CP possui muitas irregularidades (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; MARTINS FILHO et al., 2020).

Fotografia 7 - Ensaio ultrassom



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023).

5.2.4 Permeâmetro

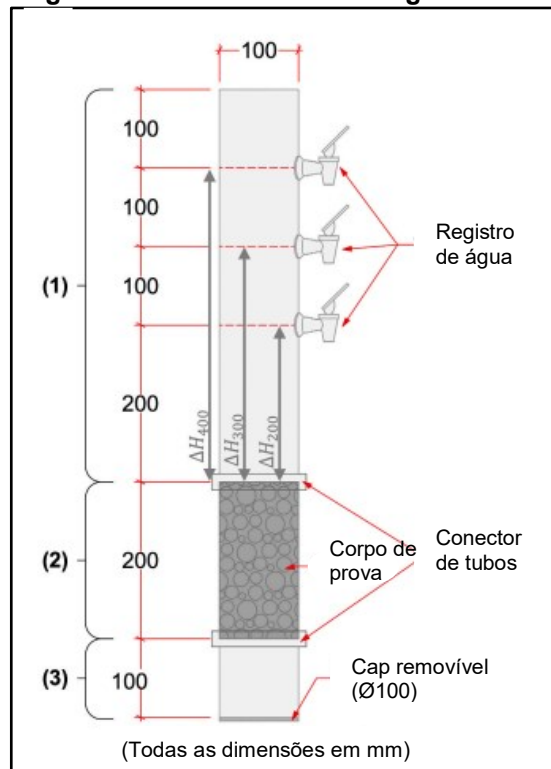
Em relação às propriedades hidrodinâmicas, vale ressaltar que não existe uma norma que regulariza a metodologia utilizada para avaliar o escoamento de um fluido no concreto permeável, no entanto, vários autores afirmam que o ensaio do permeâmetro com carga hidráulica constante pode ser utilizado para descrever o comportamento do escoamento quando o concreto possui alta porosidade e permeabilidade (KIM; GADDAFI; YOSHITAKE, 2016; PIERALISI, 2017; LEDERLE et al., 2020; MARTINS FILHO; PIERALISI; LOFRANO, 2022).

Neste trabalho foi realizado o ensaio do permeâmetro para 3 cargas hidráulicas constantes em três corpos de prova de cada traço, e após 21 dias de cura.

O permeâmetro possui 3 partes, como esquematizado na Figura 6: (1) um tubo de PVC com 3 torneiras, a uma altura de 20, 30 e 40 cm; (2) o corpo de prova que será envolvido por fita adesiva e papel filme, de modo a evitar perda de água pelas laterais do CP; e (3) um tubo de PVC para direcionar a água para um balde, que será colocado na parte inferior do permeâmetro.

Cada torneira controla a altura da coluna de água, criando uma pressão estática. Considerando a temperatura da água a 20 °C, é possível afirmar que as pressões estáticas serão de 1,96, 2,94 e 3,92 kPa, da torneira inferior para a superior.

Figura 6 - Permeâmetro de carga constante



Fonte: Adaptado de Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022).

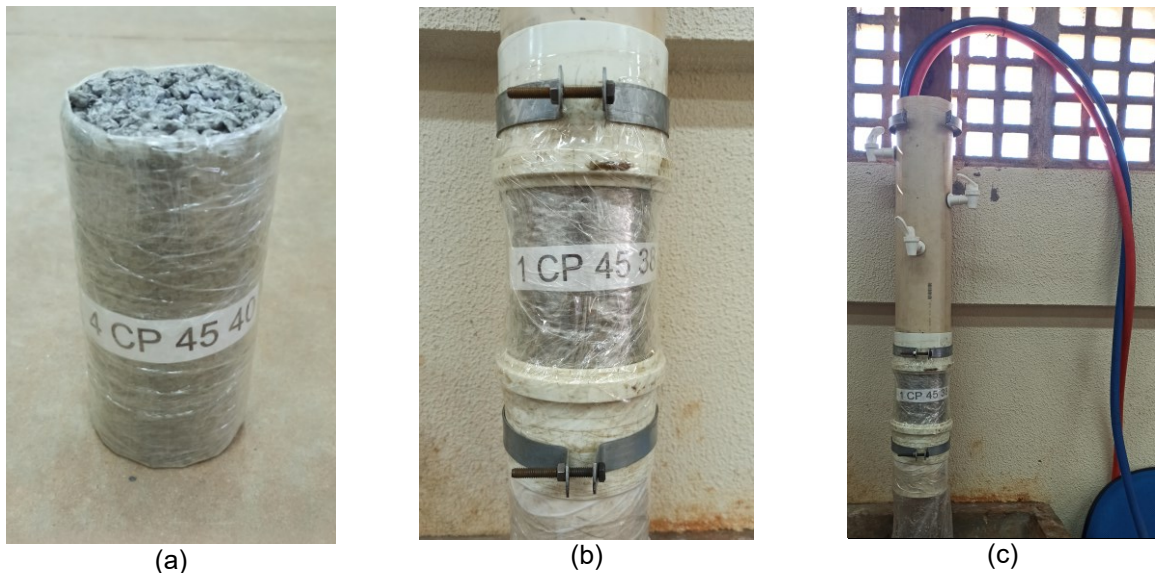
Com base na proposta de Martins Filho (2021), primeiramente o corpo de prova foi revestido por fita adesiva e papel filme nas laterais, de modo a dificultar a perda de água e concentrar a passagem apenas pelos poros interligados no centro do CP, como mostra a Fotografia 8a.

Em seguida, foram encaixados os tubos superior e inferior com ajuda de desmoldante e fita adesiva. Por último, o permeâmetro foi fixado por abraçadeiras

ajustáveis em uma tábua, garantindo sua verticalidade, e um balde foi colocado abaixo do tubo inferior para aparar a água que escoar pelo CP, como mostra a Fotografia 8b.

O ensaio consiste em posicionar mangueiras flexíveis no tubo superior do permeâmetro e regular a vazão de água garantindo que a carga hidráulica permaneça constante durante 1 min, durante esse período o balde que foi colocado abaixo do permeâmetro foi preenchido pela água que escoou pelo CP, como mostra a Fotografia 8c.

Fotografia 8 - Permeâmetro de carga constante



Fonte: Autoria própria (2023).

Passado o tempo de ensaio, o balde foi retirado e pesado para determinar o volume de água e a vazão promovida pelo corpo de prova. Utilizando as equações 12, 13 e 14 foi possível determinar o gradiente hidráulico, a vazão e a velocidade média do fluxo, respectivamente.

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (12)$$

$$q = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (14)$$

Sendo:

- i : gradiente hidráulico (m/m);
- ΔH : nível de água (m);
- L : a altura do CP (m);
- q : velocidade média do fluxo (m/s);

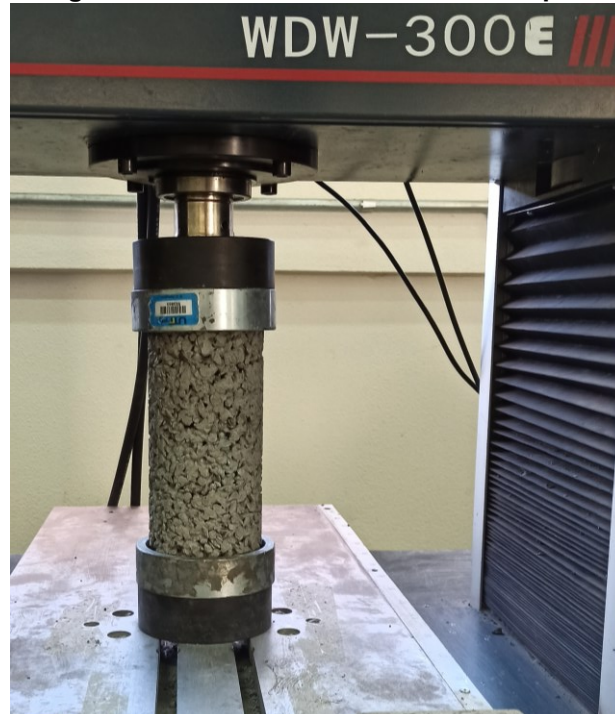
- Q : vazão (m^3/s);
- A : a área da seção transversal do CP (m^2);
- ΔV : volume de água (m^3); e
- Δt : tempo do ensaio (s).

Posteriormente, foram definidos os parâmetros hidráulicos (d/\sqrt{k}) conforme abordagem proposta por Martins Filho, Peralisi e Lofrano (2022), que utilizam um equacionamento de Forchheimer, juntamente com as definições de Ahmed e Sunada (1969).

5.2.5 Resistência à compressão

O ensaio de resistência foi realizado seguindo as orientações da ABNT NBR 5739 (2007). Este ensaio foi feito no laboratório de estruturas da UTFPR-AP, utilizando uma prensa WDW-300E com carregamento constante de 0,30 MPa/s para cada CP com 28 dias. O capeamento foi feito com neoprene na parte superior e inferior do CP, de modo a regularizar e distribuir de forma mais homogênea possível os esforços de compressão, como mostra a Fotografia 9.

Fotografia 9 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autoria própria (2023).

6 RESULTADOS

Foi proposta a análise das propriedades do concreto permeável para 5 traços diferentes. Com base no traço referência, foram escolhidos outros 3 traços variando apenas a relação a/c. Para o último traço foi mantida a relação a/c da referência e alterada a relação P/Ag para uma abordagem mais completa.

A Tabela 4 apresenta os principais dados obtidos por meio dos ensaios, para cada traço foi calculada a média dos resultados, e entre parênteses, abaixo da média estão dispostos o desvio padrão.

Tabela 4 - Principais resultados das propriedades

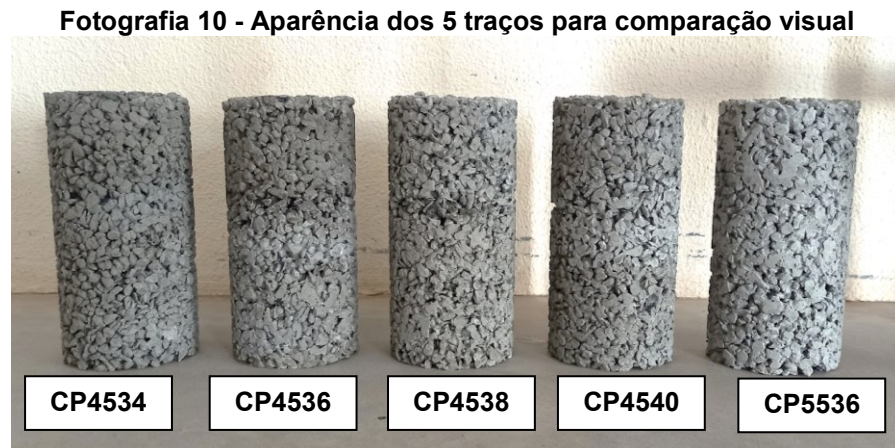
Traço	Densidade no est. fresco (kg/m ³) (σ)	Densidade no est. endurecido (kg/m ³) (σ)	Porosidade total (%) (σ)	Vazão (l/s) (σ)			Resistência à compressão (MPa) (σ)
				ΔH = 20cm	ΔH = 30cm	ΔH = 40cm	
CP4534	1847,47 (44,39)	1799,67 (42,50)	32,42 (1,92)	0,18 (0,03)	0,20 (0,04)	0,23 (0,05)	7,49 (1,43)
CP4536 REF	1894,58 (47,91)	1872,18 (45,00)	28,17 (2,25)	0,15 (0,04)	0,17 (0,05)	0,19 (0,05)	7,46 (1,74)
CP4538	1990,71 (41,69)	1928,75 (39,79)	25,02 (2,22)	0,12 (0,03)	0,14 (0,04)	0,16 (0,04)	11,49 (1,68)
CP4540	1962,06 (41,77)	1915,76 (39,00)	23,39 (2,81)	0,05 (0,06)	0,06 (0,07)	0,07 (0,08)	11,31 (1,70)
CP5536	2024,45 (47,77)	1970,23 (45,05)	21,72 (2,67)	0,06 (0,03)	0,07 (0,03)	0,08 (0,04)	13,49 (2,57)

Fonte: Autoria Própria (2023).

Com esses resultados é possível observar uma similaridade nas propriedades de densidade, porosidade e resistência entre os traços CP4538 e CP4540. Essa semelhança ocorre, por conta da baixa variação do fator a/c. Além disso, o traço CP5536 possui uma porosidade e vazão próximas à do traço CP4540, porém com um ganho de resistência. Podendo ser consequência do maior consumo de cimento, uma vez que o primeiro tem um consumo médio de 514,13 kg/m³, enquanto o CP4540 consumiu em média 423,57 kg/m³, como verificado na Tabela 2.

Desse modo, é válido afirmar que a variação do traço tem uma influência significativa nas propriedades do concreto permeável. Lembrando que a resistência à compressão do traço CP4540 foi calculada apenas para as 6 amostras rompidas, desse modo, sua média compreende uma quantidade de dados inferior em

comparação com os outros traços. De modo a complementar esta análise inicial, a Fotografia 10 proporciona uma comparação visual entre os diferentes traços.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Pela aparência dos CPs, é possível observar que tanto o aumento da relação a/c quanto da relação P/Ag reduz a quantidade de poros. Isso ocorre pelo aumento da quantidade de água na mistura, deixando-a mais fluida e facilitando o adensamento na moldagem.

À medida que aumentou relação a/c a consistência da mistura era mais fluida e o adensamento foi mais eficaz.

Para a análise dos resultados foram divididas 4 subseções seguindo a ordem dos ensaios realizados. Inicialmente, serão discutidas as propriedades físicas, ou seja, densidade no estado fresco e endurecido, e a porosidade. Em seguida, serão analisados os resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.

A terceira subseção será dedicada às propriedades hidráulicas e análise das constantes hidráulicas d , \sqrt{k} e d/\sqrt{k} , adquiridas a partir das equações que relacionam a velocidade da vazão e o gradiente hidráulico. Por último serão analisadas as propriedades mecânicas e a relação entre a resistência e outras propriedades.

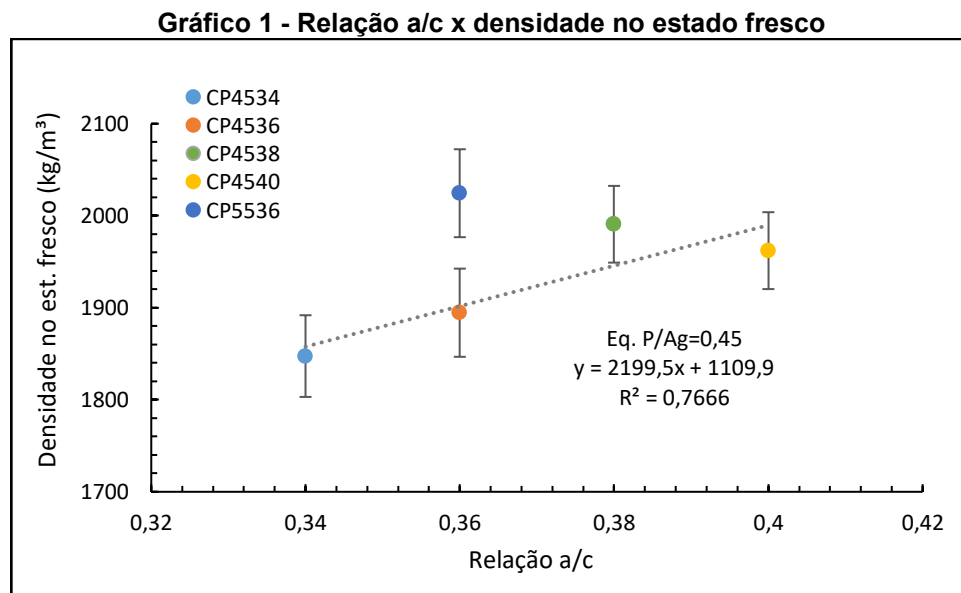
Foram utilizados gráficos e tabelas como instrumento para interpretação dos dados obtidos. Alguns gráficos apresentaram apenas a média dos resultados, nesses casos foi incluso uma barra de erros que mostra o desvio padrão.

Todos os gráficos apresentam uma linha de tendência, uma ou mais equações e o desvio padrão (R^2). Todas as equações possuem uma indicação para explicar se englobam todos os valores, como uma equação geral, ou apenas uma parte dos resultados.

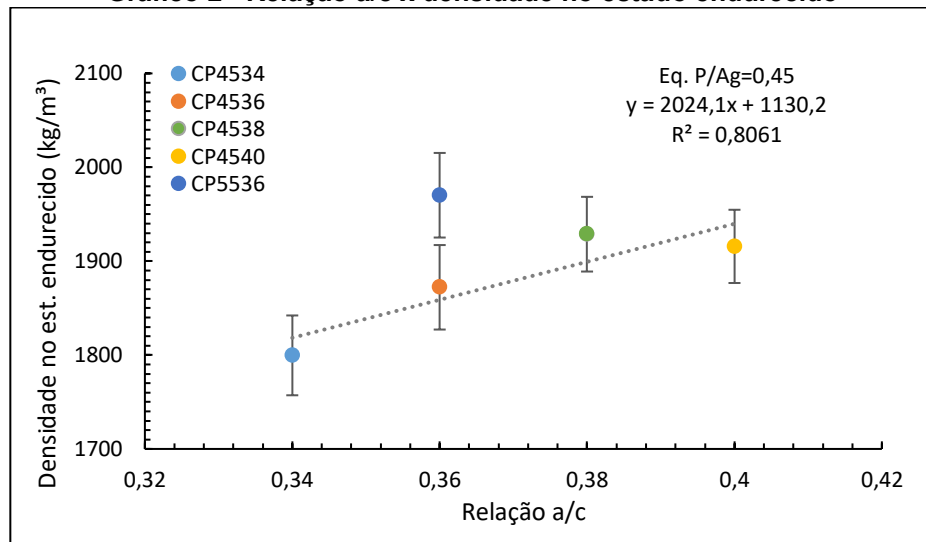
Densidade e Porosidade

Para os 4 traços com a relação P/Ag de 0,45, a quantidade em massa da mistura permaneceu a mesma – igual a 29 kg –, porém houve uma diferença na quantidade de CPs moldados. Foi possível moldar 9 CPs para os traços com relação a/c inferiores, e apenas 8 CPs para os traços com maior relação a/c, verificando a influência do fator a/c na fluidez e facilidade de adensamento da mistura, o que era esperado.

A densidade tem como papel exprimir essa diferença entre a manutenção da massa e variação do volume. Pode ser observado nos Gráficos 1 e 2 a correlação entre fator a/c e as densidades no estado fresco e endurecido, respectivamente.

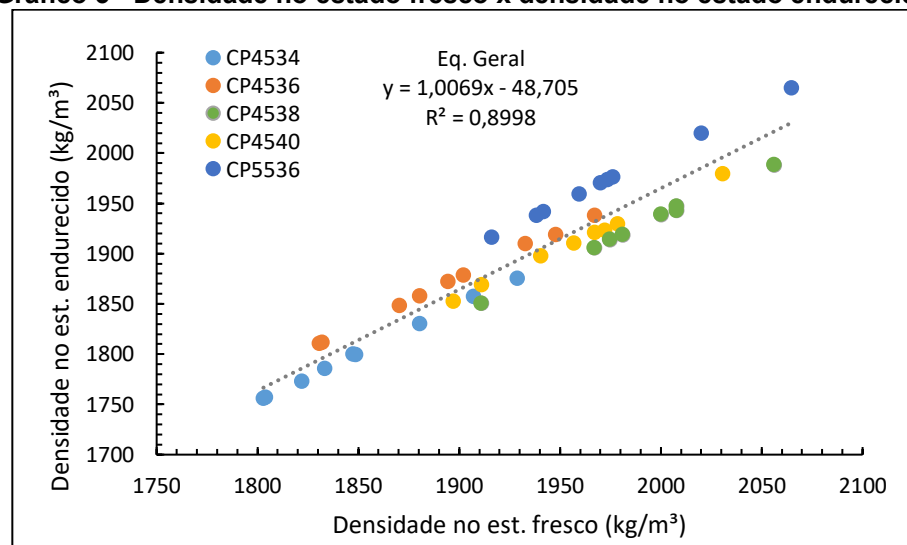


Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 2 - Relação a/c x densidade no estado endurecido

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos gráficos é possível observar a clara tendência que o aumento da relação a/c resulta no aumento da densidade, no entanto observa-se que o CP4538 e o CP4540 são estatisticamente iguais, decorrentes da alta variabilidade que a moldagem incorre para traços com consistências próximas. Vale ressaltar que em ambos os gráficos, a linha de tendência e equação geradas consideram apenas os traços com P/Ag igual a 0,45. Em seguida, o Gráfico 3 faz uma correlação entre as densidades no estado fresco e endurecido.

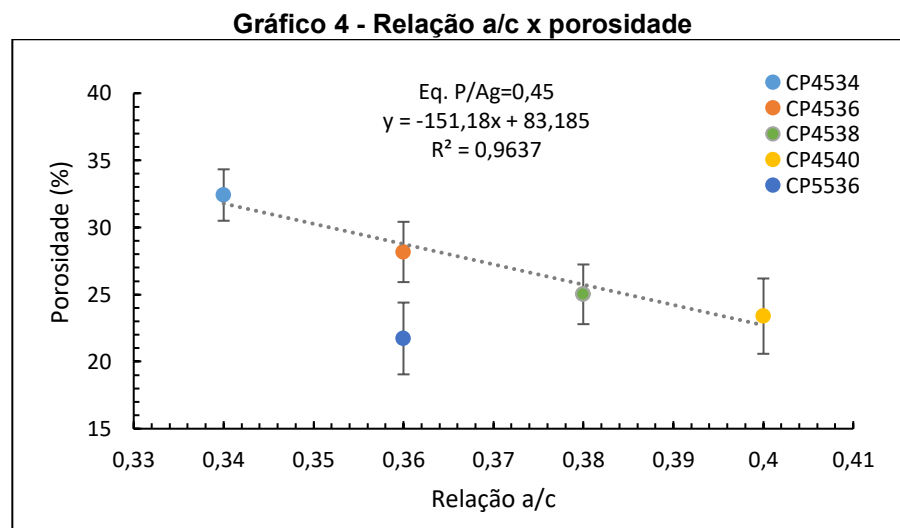
Gráfico 3 - Densidade no estado fresco x densidade no estado endurecido

Fonte: Autoria própria (2023).

A densidade no estado fresco é sempre maior que a densidade no estado endurecido, pois a primeira é calculada após a moldagem, enquanto no estado

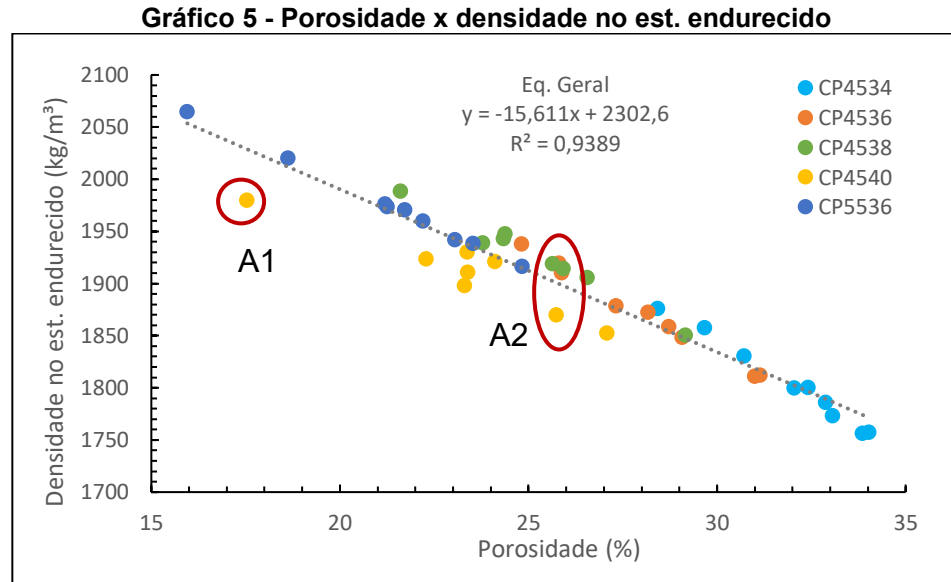
endurecido o CP teve cura de 7 dias e está seco. Assim como todo concreto, o concreto poroso tem um processo de hidratação da mistura e, após um período de tempo, parte da água evapora reduzindo a massa do CP. Devido a presença dos poros e maior superfície livre, a evaporação é mais rápida.

A porosidade é uma das propriedades físicas mais importantes do concreto permeável e afeta diretamente a densidade. Dessa forma, os Gráficos 4 e 5 foram elaborados para apresentar a influência do fator a/c na porosidade, e a relação entre porosidade e densidade no estado endurecido, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2023).

No gráfico relação a/c por porosidade, foram colocadas a média e o desvio padrão dos resultados de cada traço. A linha de tendência e equação foram geradas para os traços com relação P/Ag igual a 0,45.



Fonte: Autoria própria (2023).

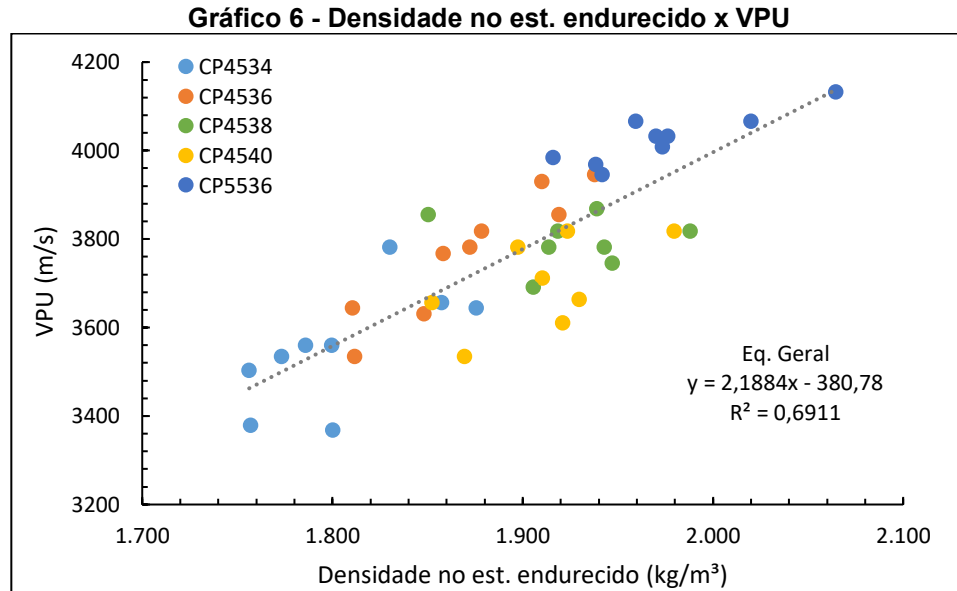
Analisando os gráficos de forma conjunta, é possível observar que o aumento da relação a/c reduz a porosidade, e consequentemente aumenta sua densidade no estado endurecido, reforçando a importância na dosagem dos traços.

O último gráfico apresenta todos os resultados individuais, e nele foram destacadas duas regiões, A1 e A2. A primeira se refere a um corpo de prova do traço CP4540 com a porosidade e densidade divergentes em relação aos outros pontos da mesma mistura, isso se deve provavelmente a variabilidade da força de compactação durante a moldagem. Já o destaque A2 evidencia um grupo de corpos de prova com porosidades bem próximas, porém com densidades diferentes, podendo indicar a imprecisão dos ensaios para definição da porosidade.

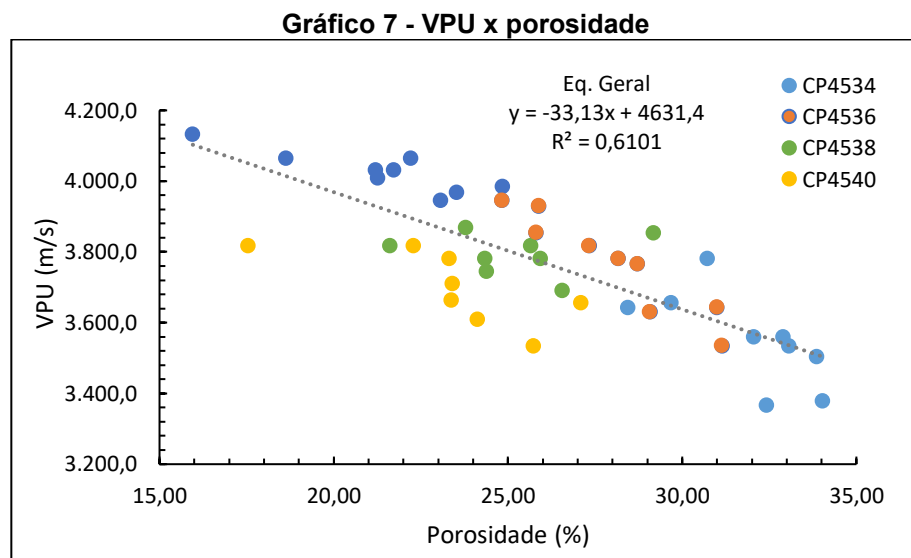
No entanto, destaca-se que o resultado continua valioso, bem como menciona Martins Filho (2021), que independente do CP pertencer ao mesmo traço, cada meio poroso é único e a análise de suas propriedades é válida ainda que o traço apresente alta variabilidade em decorrência da produção/compactação, ou até da sua infinita possibilidade da tortuosidade do meio poroso.

Velocidade do pulso ultrassônico

O Gráfico 6 e 7 apresentam a influência da densidade no estado endurecido e da porosidade na velocidade do pulso ultrassônico, para uma frequência de 24 kHz, respectivamente.



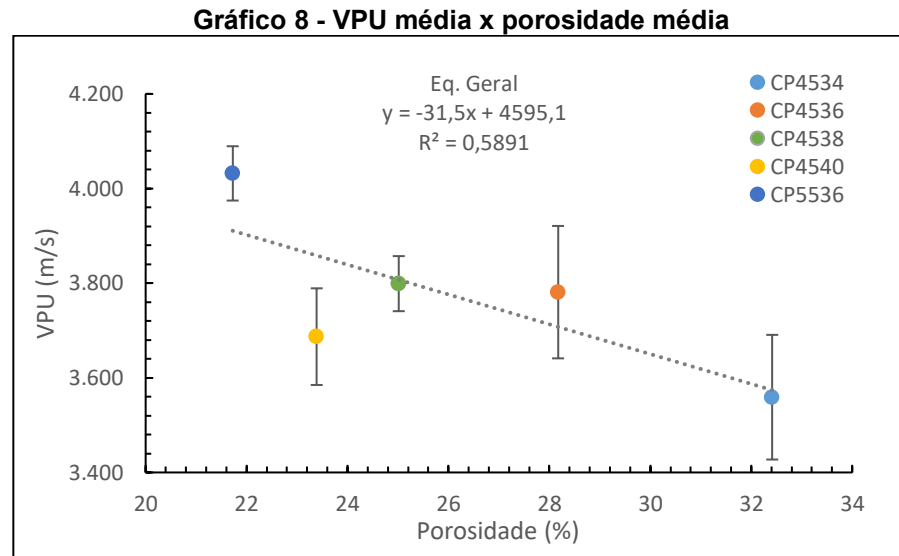
Fonte: Autoria própria (2023).



Fonte: Autoria própria (2023).

É possível observar que o aumento da densidade resulta no aumento da velocidade, e sabendo que a porosidade e a densidade são inversamente proporcionais, essa relação é confirmada quando analisamos a influência da porosidade na VPU. Isso ocorre, pois, a onda ultrassônica tem mais facilidade de atravessar meios sólidos, e como a porosidade indica o número de vazios, quanto maior a porosidade, maior a quantidade de vazios e menor a VPU.

Existe uma grande dispersão dos pontos, por isso foi elaborado o Gráfico 8, o qual apresenta a média da VPU e seu desvio padrão, em relação à média da porosidade.

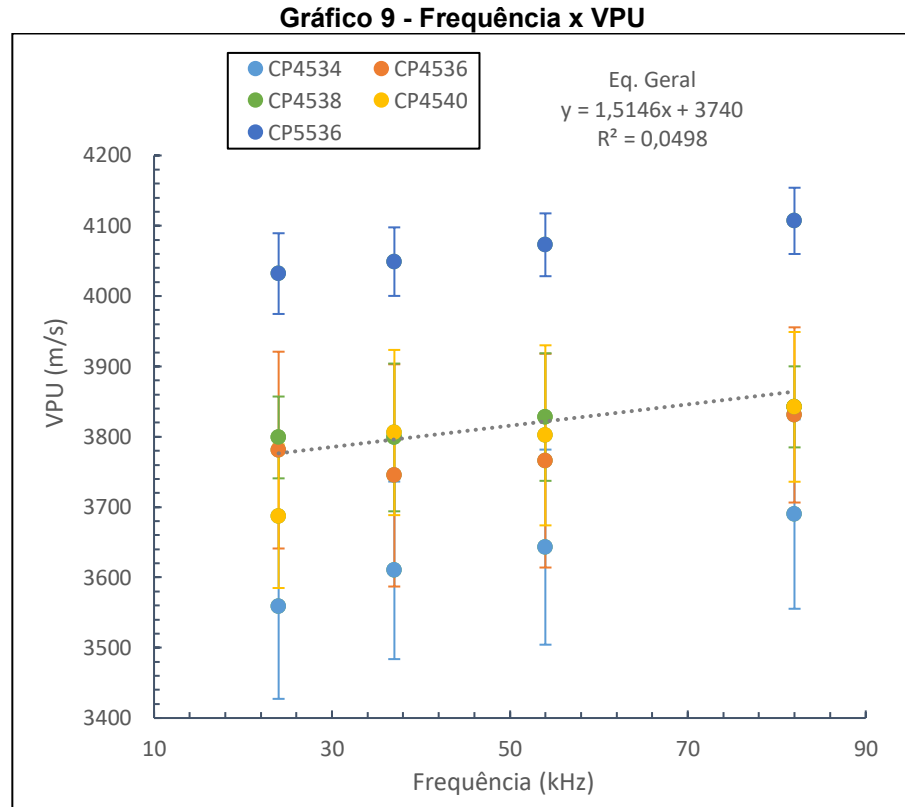


Fonte: Autoria própria (2023).

O Gráfico 8 mostra que o aumento na porosidade resulta em uma maior dispersão e maior desvio padrão para amostras de um mesmo traço. Isso ocorre, pois, a precisão desse ensaio é menor para corpos de prova com alta porosidade como verificado por Martins Filho et al. (2020).

Em relação a divergência do traço CP4540, sua VPU está abaixo do esperado e seu desvio padrão está muito elevado. Essa variação ocorreu, por conta da imprecisão no momento da moldagem, resultando em uma superfície com mais irregularidades, se comparada com os outros traços. Reforçando a importância da sistematização e constância na moldagem e execução dos experimentos.

Em seguida, o Gráfico 9 mostra a relação entre as diferentes frequências e a velocidade do pulso ultrassônico.



Fonte: Autoria própria (2023).

Apesar de existir uma diferença, o aumento da vibração da onda não interfere de forma significativa na velocidade, uma vez que a sua variação apresenta um coeficiente de crescimento linear de apenas 1,5146. Entretanto, vale ressaltar que durante o experimento, foi observada uma redução na precisão dos resultados para a frequência de 82 kHz. Enquanto as frequências 24, 32 e 54 kHz apresentavam uma precisão de 100 %, a maior frequência, de 82kHz, tinha uma variação de 90 a 80% na precisão.

Desse modo, pode-se entender que a velocidade do pulso ultrassônico pode ser obtida a partir de diferentes frequências, sendo recomendado utilizar frequências na faixa de 20 a 60 kHz.

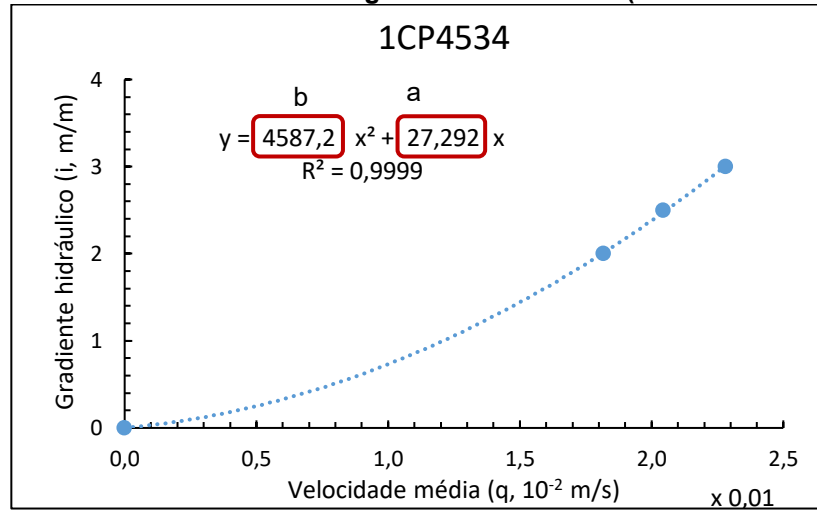
Comportamento hidráulico

O ensaio do permeâmetro de carga constante proporciona dados para 3 cargas hidráulicas, considerando que o ponto inicial sempre será x e y igual a zero, podemos gerar uma linha de tendência polinomial e sua respectiva equação.

Essa equação segue o modelo de Forchheimer, ou seja, possui os coeficientes linear e quadrático, representados por “a” e “b”, respectivamente

(MARTINS FILHO; PIERALISI; LOFRANO, 2022). A fim de exemplificar a abordagem realizada por Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022), pode ser observado no Gráfico 10 a relação entre velocidade média e gradiente hidráulico para a amostra 1 do traço CP4534.

Gráfico 10 - Velocidade média x gradiente hidráulico (amostra: CP4534-1)



Fonte: Autoria própria (2023).

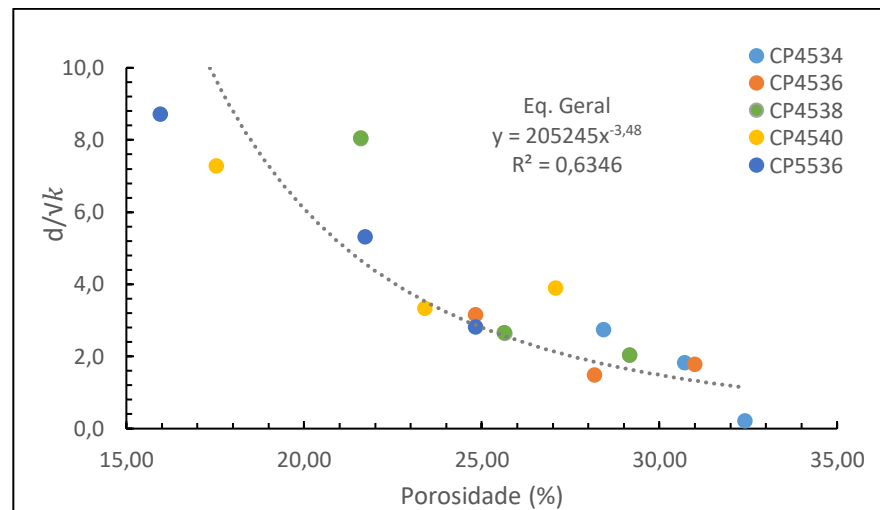
A Tabela 5 apresenta o resultado dos parâmetros d , \sqrt{k} e d/\sqrt{k} calculado a partir dos valores a e b , e utilizando as equações 8, 9 e 10, para cada corpo de prova.

Tabela 5 - Dados hidráulicos

Traço	CP	Pt (%)	a (s/m)	b ($10^3 \text{ s}^2/\text{m}^2$)	\sqrt{k} (10^{-5})	d (10^{-5})	d/\sqrt{k}
	1	28,43	27,2920	4,5872	6,1115	16,8079	2,7502
CP 45 34	2	30,72	22,9020	2,7943	6,6716	12,2011	1,8288
	8	32,42	64,4250	0,5613	3,9778	0,8712	0,2190
CP 45 36 REF	1	24,83	54,3330	7,4194	4,3315	13,6554	3,1526
	5	28,17	41,3970	3,0596	4,9623	7,3909	1,4894
	9	31,00	20,0200	2,5377	7,1356	12,6758	1,7764
CP 45 38	1	21,61	89,5070	24,2930	3,3747	27,1409	8,0424
	6	25,65	72,1550	7,1779	3,7587	9,9479	2,6467
	8	29,17	35,4500	3,8576	5,3624	10,8818	2,0293
CP 45 40	2	17,54	98,9770	23,1440	3,2092	23,3832	7,2863
	4	23,40	42,0950	6,8997	4,9210	16,3908	3,3308
	8	27,09	16,6060	5,0636	7,8349	30,4926	3,8919
CP 55 36	1	15,95	298,8900	48,1390	1,8468	16,1059	8,7212
	6	21,72	155,3100	21,1600	2,5619	13,6244	5,3180
	9	24,84	77,7520	7,9221	3,6208	10,1889	2,8140

Fonte: Autoria própria (2023).

Considerando que o parâmetro d/\sqrt{k} caracteriza o comportamento do fluido no meio poroso, o Gráfico 11 foi elaborado para apresentar a relação desse parâmetro com a porosidade total.

Gráfico 11 - Porosidade x d/\sqrt{k} 

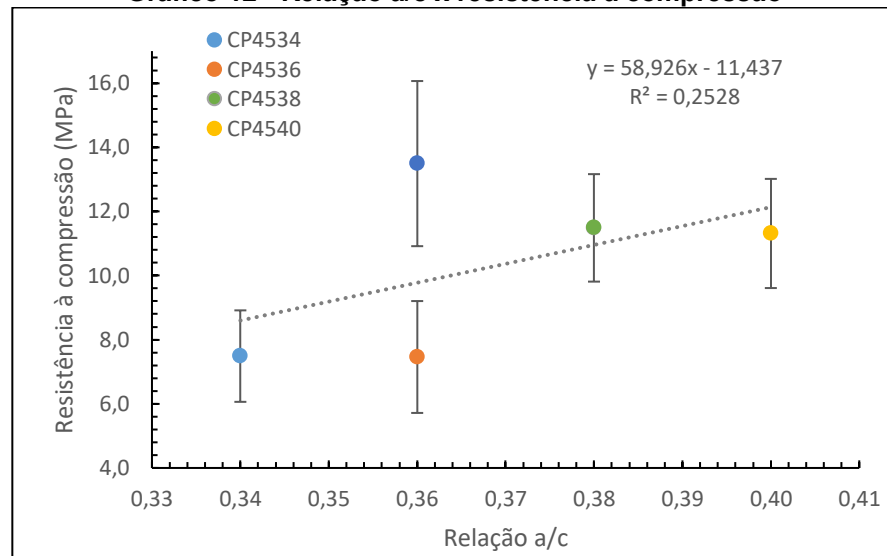
Fonte: Autoria própria (2023).

Como abordaram Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022), o parâmetro d/\sqrt{k} é considerado uma assinatura de cada meio poroso, pois unifica de modo valioso as duas características mais significativas para descrever o comportamento hidráulico no meio poroso. Enquanto a \sqrt{k} reflete, resumidamente, a área permeável na base do CP, ou seja, sua seção de drenagem, o parâmetro d é relacionado a geometria dos poros, sua tortuosidade e os caminhos disponíveis ao escoamento.

Nota-se uma boa correlação entre porosidade total e d/\sqrt{k} ($R^2=0,6346$) e que o aumento da porosidade resulta na redução da resistência do meio poroso sobre o fluido, representado por d/\sqrt{k} . Isso ocorre pois, quanto maior a porosidade, mais caminhos estão disponíveis, ou os caminhos existentes são mais curtos, nesse caso, mais "retos", permitindo maior escoamento.

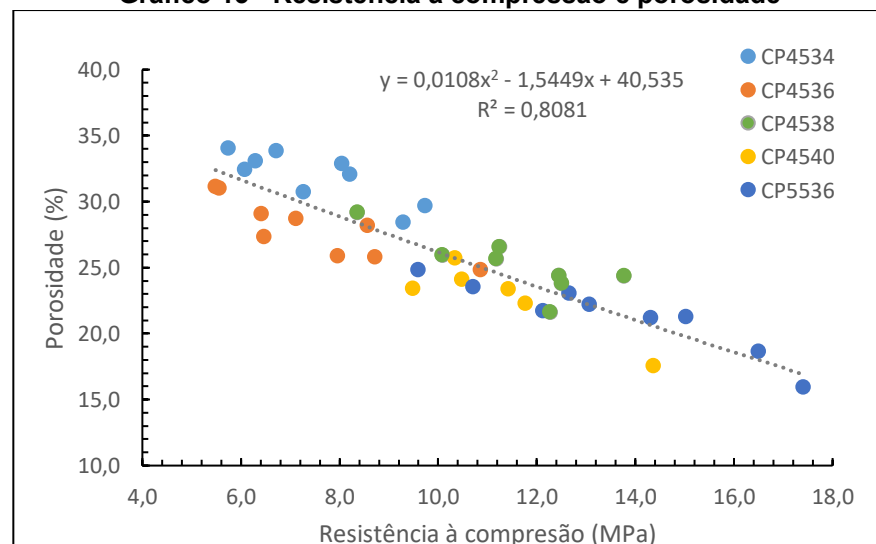
Resistência à compressão

A resistência à compressão é um dos principais fatores que limita a aplicação do concreto permeável, dessa forma a análise dessa propriedade busca entender os que fatores influenciam e como melhorar a resistência sem impactar as outras propriedades. Os Gráficos 12 e 13 representam a relação entre a resistência à compressão, o fator a/c e a porosidade, respectivamente.

Gráfico 12 - Relação a/c x resistência à compressão

Fonte: Autoria própria (2023).

Pode ser observada uma tendência crescente no Gráfico 12, o aumento da relação a/c colabora para facilidade de adensamento e melhor cobertura dos agregados, como citado na análise visual, e consequentemente fortalece a união dos agregados aumentando a resistência do CP como um todo.

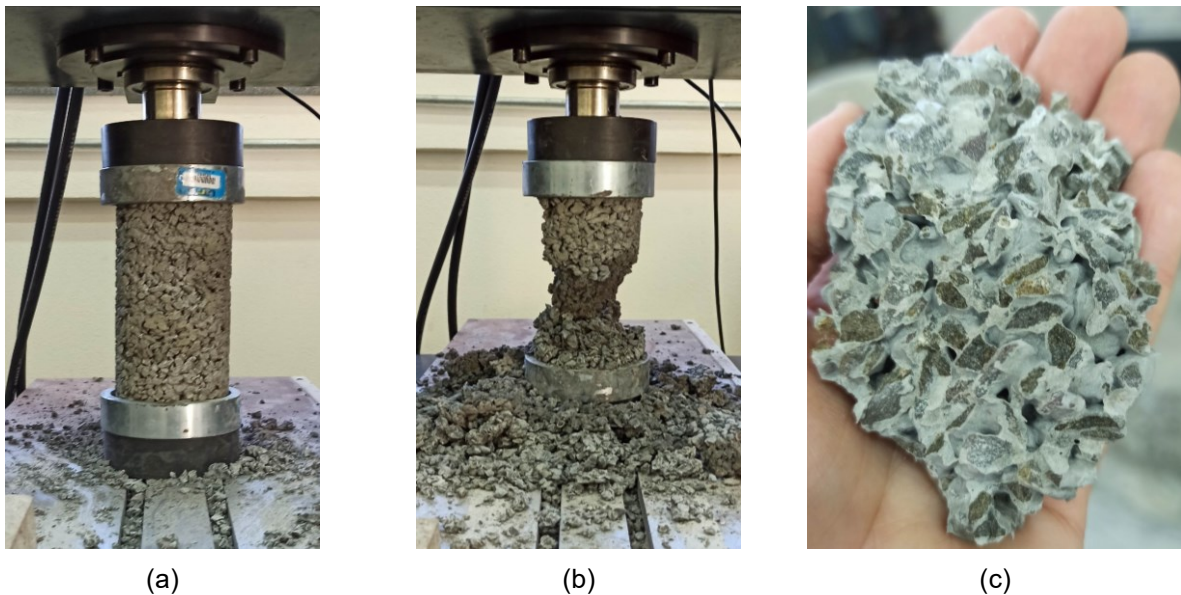
Gráfico 13 - Resistência à compressão e porosidade

Fonte: Autoria própria (2023).

Já o Gráfico 13 mostra que resistência cresce com a redução da porosidade, esse comportamento pode ser explicado pela distribuição das forças no CP. O aumento da porosidade reflete o aumento da quantidade de vazios, e consequentemente, a redução de caminhos possíveis para a distribuição da força, causando uma sobrecarga por onde passam.

A Fotografia 11 apresenta o ensaio de resistência à compressão feito na prensa, antes e depois do rompimento. Além disso, a Fotografia 11c mostra um fragmento de corpo de prova após rompimento para avaliar melhor a ruptura. As três fotografias acima foram tiradas do traço CP4540, o qual obteve uma das maiores resistências.

Fotografia 11 - Ensaio de resistência à compressão

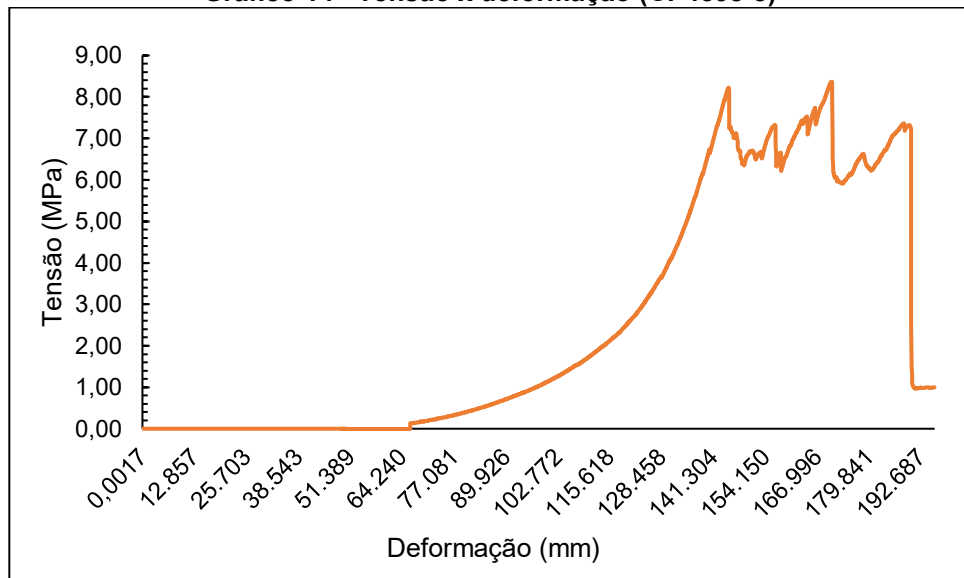


Fonte: Autoria própria (2023).

Durante o rompimento, os corpos de prova fissuraram lentamente e em diversas partes, essa fragmentação e esfarelamento podem ser explicados pela baixa coesão resultante de uma porosidade elevada. Nos casos em que relação a/c e P/Ag eram inferiores (CP4534 e CP4536), o rompimento ocorreu muitas vezes entre a pasta e o agregado. Enquanto traços com relação a/c e P/Ag mais elevados (CP4538 e CP4540), o rompimento ocorre predominantemente no agregado, ilustrado na Fotografia 11c. Essa análise também foi feita por Martins Filho (2021).

A Figura 7 apresenta a curva tensão x deformação da amostra 8 do traço CP4538, gerado pelo *software* da própria prensa.

Gráfico 14 - Tensão x deformação (CP4538-8)



Fonte: Autoria própria (2023).

A partir da curva e conhecendo o comportamento durante o ensaio de compressão, pode-se afirmar que a presença de poros no interior do concreto permite que os fragmentos soltos pelo rompimento se desloquem e preencham os vazios, adiando a ruptura. No caso dessa amostra, a resistência atingiu 3 picos, sendo que as duas rupturas iniciais possibilitaram o rearranjo dos agregados, porém a terceira e última ruptura foi decisiva.

7 CONCLUSÃO

Esse estudo propôs a validação do traço CP4536, apresentado na curva de dosagem elaborada por Martins Filho (2021), e suas variações de fator a/c e P/Ag . Utilizando a metodologia também proposta por Martins Filho (2021), foi possível analisar 5 traços diferentes e compreender a importância e influência na escolha de dosagem, além dos cuidados necessários durante a moldagem dos corpos de prova.

Apesar da metodologia utilizada não ser padronizada ou possuir normatização, pode ser considerada eficaz, uma vez que os resultados obtidos descreveram de maneira satisfatória o comportamento e as propriedades do concreto permeável.

7.1 Conclusões específicas

- A escolha do traço, e a precisão na confecção e nos testes influenciam significativamente nas propriedades finais. Pequenas variações durante a execução podem acarretar grandes alterações na performance do concreto permeável.

- Assim como a relação a/c , o fator P/Ag também influencia as propriedades do concreto permeável. Ao aumentar esses fatores, o concreto se torna mais denso, resistente, porém reduz sua permeabilidade. Além disso, o mesmo volume de água ou de pasta não garante o mesmo desempenho, deve ser observado o consumo de cimento.

- O ensaio de ultrassom é uma alternativa válida para avaliar as propriedades do concreto permeável, auxiliando no caso de pavimentos já executados, pois é um método não destrutivo e que fornece dados consistentes relacionados a densidade, porosidade e resistência. Esses resultados são mais precisos para amostras com porosidade inferior a 30%, como apontado por Martins Filho (2021).

- O comportamento hidráulico foi avaliado a partir do parâmetro d/\sqrt{k} , encontrado utilizando a lei Forchheimer. A relação d/\sqrt{k} indica o quanto o meio poroso resiste à passagem do fluido, e quando analisado junto com a porosidade, é capaz de representar o comportamento hidráulico de maneira satisfatória. Dessa forma, é um parâmetro que auxilia na caracterização hidráulica do meio poroso como indicado por Martins Filho, Pieralisi e Lofrano (2022).

- Durante o rompimento, o concreto permeável apresentou mais de um pico de resistência, indicando o rearranjo dos fragmentos e agregados. Apesar da possibilidade de suportar aplicação de carga, de baixa intensidade, após a primeira ruptura, é importante ressaltar que esse rearranjo pode reduzir a permeabilidade, e a resistência pode ser muito inferior em comparação com a resistência anterior a ruptura, ou seja, seu desempenho e propriedades ficam comprometidas.
- Alguns resultados do mesmo traço apresentaram divergência, que podem ser consequência de erros e imprecisão durante os ensaios, e pelo fato de que cada corpo de prova possui uma característica (tortuosidade) única. Dessa forma, é necessário avaliar todos os CPs e seus resultados de modo isolado, ainda que pertencentes ao mesmo traço.
- A curva de dosagem elaborada por Martins Filho (2021), que foi utilizada para definição do traço referência, demonstrou ser promissora, uma vez que os resultados obtidos correspondem com as propriedades previstas. Dessa forma, contribui como direcionamento para desenvolver e aprimorar outros traços.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 522. **ACI 522R-10**: Report on Pervious Concrete. Estados Unidos, 2010. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51663557>. Acesso em: 23 mar. 2022.

AHMED, N.; SUNADA, D. K. Nonlinear flow in porous media. **Journal of the Hydraulics Division**, Estados Unidos, v. 95, p. 1847-1858, nov. 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002193>. Acesso em: 23 mar. 2022.

ALEMU, A. S. *et al.* Practical considerations of porosity, strength, and acoustic absorption of structural pervious concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 15, p. e00764, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00764>. Acesso em: 05 set. 2022.

ALSHAREEDA, O.; NASSIRI, S. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 288, p. 125095, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095>. Acesso em: 13 mar. 2022.

ALVES, E. D. A.; SOUZA, G. D. S.; MARRA, R. Êxodo e sua contribuição à urbanização de 1950 a 2010. **Revista de Política Agrícola**, [s. l.], v. 20, n. 2, abr. 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/910778/1/Exodoesuacontribuicao.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Concrete Terminology**. Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/pervious%20concrete?search=pervious%20concrete>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto: Procedimentos e Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BARNHOUSE, P. W.; SRUBAR III, W. V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Estados Unidos, v. 110, p. 89-97, mai. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.014>. Acesso em: 02 jun. 2022.

BOGAS, J. A.; GOMES, M. G.; GOMES, A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method.

Ultrasonics, Portugal, v. 53, p. 962-972, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>. Acesso em: 15 jun. 2022.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; RODRIGUES, J. M. de A. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. v. 1. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARLSON, M. A. *et al.* Impacts of urbanization on groundwater quality and recharge in a semi-arid alluvial basin. **Journal of Hydrology**, Estados Unidos, v. 409, p. 196-211. out. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.020>. Acesso em: 24 mar. 2022.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 123, p. 627-637, out. 2016b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035>. Acesso em: 05 mai. 2022.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 49, p. 5255-5271, mar. 2016a. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0858-9>. Acesso em: 05 mai. 2022.

CHENG, A. *et al.* Experimental study on properties of pervious concrete made with recycled aggregate. **International journal of pavement research and technology**, China, v. 4, n. 2, p. 104-110, mar. 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2011.4\(2\).104](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2011.4(2).104). Acesso em: 17 mar. 2022.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. **Construction and Building Materials**, India, v. 213, p. 643-651, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.099>. Acesso em: 04 ago. 2022.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, Estados Unidos, v. 25, p. 4181-4189, nov. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055>. Acesso em: 16 abr. 2022.

DUARTE, R. M. R.; BUENO, M. S. G. Fundamentos ecológicos aplicados à RAD para matas ciliares do interior paulista. **Manual para Recuperação de Áreas Degradadas do Estado de São Paulo: Matas Ciliares do Interior Paulista**, São Paulo: Instituto de Botânica, p. 30-41, 2006. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/municpioverdeazul/2011/11/ManualRecupAreas%20Degradadas.pdf#page=31>. Acesso em: 12 abr. 2022.

FOSTER, S.; MORRIS, B. L.; CHILTON, P. J. Groundwater in urban development—A review of linkages and concerns. **Hydrological Sciences Journal**, Londres, v. 259, p. 3-12, ago. 1999. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280565596_Groundwater_in_urban_development_a_review_of_linkages_and_concerns. Acesso em: 05 abr. 2022.

GHAFFORI, N.; DUTTA, S. Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 7, ago. 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:3\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:3(183)). Acesso em: 28 jun. 2022.

GODINHO, J. P. *et al.* Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 13, p. 222-247, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000200004>. Acesso em: 13 mai. 2022.

HASELBACH, L. *et al.* Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. **Transportation Research Record**, Washington, v. 2240, p. 107-115, dez. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2240-14>. Acesso em: 27 mai. 2022.

HONG, S. *et al.* Evaluation of condition of concrete structures using ultrasonic pulse velocity method. **Applied Sciences**, Coreia, v. 10, p. 706, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10020706>. Acesso em: 04 ago. 2022.

HUANG, B. *et al.* Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 818-823, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>. Acesso em: 10 out. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População rural e urbana**. 2015. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 10 mar. 2022

IPBES – INTRAGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES. **Media Release**: Nature's Dangerous Decline 'Unprecedented'; Species Extinction Rates 'Accelerating'. França, mai. 2019. Disponível em: <https://www.ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment>. Acesso em: 05 mar. 2022

JANG, J. G. *et al.* A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: Heavy metal leaching characteristics and compressive strength. **Construction and Building Materials**, Coreia do Sul, v. 79, p. 173-181, mar. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.058>. Acesso em: 08 abr. 2022.

KARDEC, A. (1864). **O evangelho segundo o espiritismo**. 131. ed. Brasília: FEB, 2013. Cap. 5. Item 18. Pág. 90.

KEVERN, J. T. *et al.* Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability. **Journal of ASTM International**, Iowa, v. 5, n. 2, p. 1-12, fev. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/John-Kevern/publication/249956948_Pervious_Concrete_Mixture_Proportions_for_Improved_Freeze-Thaw_Durability/links/5682a5d908ae19758391a798/Pervious-Concrete-

[Mixture-Proportions-for-Improved-Freeze-Thaw-Durability.pdf](#). Acesso em: 20 mai. 2022.

KEVERN, J. T. et.al. Mixture Proportion Development and Performance Evaluation of Pervious Concrete for Overlay Applications. **ACI Materials Journal**, v. 108, p. 439-448, jul. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/John-Kevern/publication/237429553_Pervious_Concrete_Mix_Design_for_Wearing_Course_Applications/links/59ee092c0f7e9b369575904a/Pervious-Concrete-Mix-Design-for-Wearing-Course-Applications.pdf. Acesso em: 04 jul. 2022.

KEVERN, J. T.; HASELBACH, L.; SCHAEFER, V. R. Hot weather comparative heat balances in pervious concrete and impervious concrete pavement systems. **Journal of Heat Island Institute International**, Estados Unidos, v. 7-2, p. 231-237, 2012. Disponível em: https://www.heat-island.jp/web_journal/HI2009Conf/pdf/33.pdf. Acesso em: 17 mai. 2022.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 193, p. 221-233, mai. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>. Acesso em: 22 mar. 2022.

KIM, G. M. *et al.* Heavy metal leaching, CO₂ uptake and mechanical characteristics of carbonated porous concrete with alkali-activated slag and bottom ash. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, [s. l.], v. 9, p. 283-294, set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0111-x>. Acesso em: 28 mai. 2022.

KIM, G. M. *et al.* Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. **Construction and Building Materials**, República da Coreia, v. 136, p. 1-8, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.020>. Acesso em: 28 mai. 2022.

KIM, Y. J.; GADDAFI, A.; YOSHITAKE, I. Permeable concrete mixed with various admixtures. **Materials & design**, [s. l.], v. 100, p. 110-119, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.109>. Acesso em: 05 ago. 2022.

LEDERLE, R.; SHEPARD, T.; MEZA, V. D. L. V. Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Estados Unidos, v. 244, p. 118339, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118339>. Acesso em: 14 set. 2022.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete—an experimental investigation. **Construction and Building Materials**, Australia, v. 24, p. 2664-2671, dez. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>. Acesso em: 30 abr. 2022.

LIU, R. *et al.* Investigation of the porosity distribution, permeability, and mechanical performance of pervious concretes. **Processes**, China, v. 6, n. 78, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr6070078>. Acesso em: 07 jun. 2022.

LIU, T. *et al.* Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. **Cement and Concrete Research**, China, v. 122, p. 72-82, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.004>. Acesso em: 21 mai. 2022.

LORENZI, A. *et al.* Application of ultrasonic pulse velocity to detect concrete flaws. **E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics**, Brasil, v. 11, n. 18430, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Alexandre-Lorenzi/publication/283352274_Application_of_ultrasonic_pulse_velocity_to_detect_concrete_flaws/links/5636a81508aebc004000a1f2/Application-of-ultrasonic-pulse-velocity-to-detect-concrete-flaws.pdf. Acesso em: 04 set. 2022.

MARTINS FILHO, S. T. *et al.* Caracterização do concreto permeável com foco em ensaios não destrutivos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, Brasil, v. 13, p. 483-500, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000300003>. Acesso em: 20 mar. 2022.

MARTINS FILHO, S. T. **Metodologia de caracterização do escoamento não linear no concreto permeável**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) , UFPR, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, Paraná, ago, 2021. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/72412/R%20-%20T%20-%20SERGIO%20TUNIS%20MARTINS%20FILHO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 mar. 2022.

MARTINS FILHO, S. T.; PIERALISI, R.; LOFRANO, F. C. Framework to characterize nonlinear flow through pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, Brasil, v. 151, n. 106633, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106633>. Acesso em: 09 abr. 2022.

MEININGER, R. C. No-Fines Pervious Concrete for Paving. **Concrete International**, v. 10, p. 20-27, ago. 1988. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/1801>. Acesso em: 30 jul. 2022.

MULLIGAN, A. M. **Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems**. 2005. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering), University of Central Florida, College of Engineering and Computer Science, Florida, ago. 2005. Disponível em: <http://purl.fcla.edu/fcla/etd/CFE0000634>. Acesso em: 27 set. 2022.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials characterization**, Estados Unidos, v. 61, p. 802-813, ago. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.004>. Acesso em: 04 mai. 2022.

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. **Cement and Concrete Research**, Estados Unidos, v. 36, p. 2074-2085, nov. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.001>. Acesso em: 10 mai. 2022.

NGUYEN, D. H. *et al.* A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, França, v. 73, p. 271-282, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>. Acesso em: 18 jun. 2022.

NUTTING, P. G. Physical analysis of oil sands. **AAPG Bulletin**, Washington, v. 14, p. 1337-1349, out. 1930. Disponível em: https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-pdf/14/10/1337/4351370/aapg_1930_0014_0010_1337.pdf?casa_token=Qs42P6MQJLUAAAAA:vcHa62yPxro5ZduwuxcfeY9Ddd_psVY7bntKYx-EQov-feViDpy68NRuvBacqbNYrvSGEdITl. Acesso em: 28 jun. 2022.

RANGELOV, M. *et al.* Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Estados Unidos, v. 126, p. 875-885, nov. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035>. Acesso em: 24 out. 2022.

RIDENGAOQIER, E.; HATANAKA, S. Prediction of porosity of pervious concrete based on its dynamic elastic modulus. **Results in Materials**, Japão, v. 10, n. 100192, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100192>. Acesso em: 18 out. 2022.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande-PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 943-952, set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016146661>. Acesso em: 30 mai. 2022.

SCHAEFER, V. R. *et al.* Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. **National Concrete Pavement Technology Center**, Iowa, 83p, fev. 2006. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/44819045/KevernPervious.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2022.

SRIRAVINDRARAJAH, R.; WANG, N. D. H.; ERVIN, L. J. W. Mix design for pervious recycled aggregate concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, [s. l.], v. 6, p. 239-246, nov. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0024-x>. Acesso em: 16 jun. 2022.

TAFAZZOLI, M. Enhancing the Functionality of Pervious Concrete Pavements through Design and Maintenance. **In International Low Impact Development Conference 2018: Getting In Tune with Green Infrastructure**, Washington, p. 184-192, ago. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mohammadsoroush-Tafazzoli/publication/326921584_Enhancing_the_Functionality_of_Pervious_Concrete_Pavements_through_Design_and_Maintenance/links/5b7855b5a6fdcc5f8b538a0b/Enhancing-the-Functionality-of-Pervious-Concrete-Pavements-through-Design-and-Maintenance.pdf. Acesso em: 27 ago. 2022.

TEYMOURI, E.; PAUZI, N. N. M.; WONG, K. S. Developing Lignite Pervious Concrete for Application in Pedestrian Walkways and Urban Runoff Treatment. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, [s. l.], p. 1-19, mai. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01113-x>. Acesso em: 22 set. 2022.

THOMLE, Jonathan Nicolas. **The declining pH of waters exposed to pervious concrete**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Ambiental), Washington State University, Pullman, 2010. Disponível em: http://www.dissertations.wsu.edu/Thesis/Summer2010/j_thomle_071910.pdf. Acesso em: 17 mai. 2022.

TIE, T. S. *et al.* Sound absorption performance of modified concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, Malásia, China, v. 30, n. 101219, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101219>. Acesso em: 14 mai. 2022.

TOMAZ, Plínio. **Poluição difusa**. 1. ed. São Paulo: Navegar Editora, 2006.

YANG, Z. Freezing-and-Thawing Durability of Pervious Concrete under Simulated Field Conditions. **Materials Journal**, v. 108, p. 187-195, mar. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/51682312>. Acesso em: 03 jun. 2022.

YAP, S. P. *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, Malásia v. 181, p. 155-165, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.205>. Acesso em: 20 jun. 2022.

YU, F. *et al.* Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images. **Construction and Building Materials**, China, v. 200, p. 687-702, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.135>. Acesso em: 29 jun. 2022.

ZHANG, J. *et al.* Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. **Construction and Building Materials**, China, v. 161, p. 468-478, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.149>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C. S. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, Hong Kong, v. 183, p. 544-553, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>. Acesso em: 14 abr. 2022.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Estados Unidos, v. 109, p. 177-187, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>. Acesso em: 09 out. 2022.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Estados Unidos, v. 98, p.

51-60, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>. Acesso em: 15 out. 2022.

ZHUGE, Y. Comparing the performance of recycled and quarry aggregate and their effect on the strength of permeable concrete. **Futures in Mechanics of Structures and Materials Toowoomba**, Australia, v. p. 343-349, dez. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Yan-Zhuge/publication/290554277_Comparing_the_performance_of_recycled_and_quarry_aggregate_and_their_effect_on_the_strength_of_permeable_concrete/links/5cc57ac04585156cd7b6b817/Comparing-the-performance-of-recycled-and-quarry-aggregate-and-their-effect-on-the-strength-of-permeable-concrete.pdf. Acesso em: 17 jun. 2022.