

## **PLANEJAMENTO DE VIDA ÚTIL PARA CONCRETO PERMEÁVEL: PROPOSTA DE PARÂMETROS NORTEADORES PARA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS FATORES DA ISO 15.686**

*Service Life planning for pervious concrete pavement: proposal of guiding parameters for the factor method of ISO 15.686*

**Mônica Regina Garcez<sup>1</sup>, Leonardo Lunkes Wagner<sup>2</sup> e Larissa Guerra<sup>3</sup>**

### **Resumo**

O pavimento permeável é uma tecnologia inovadora e potencialmente sustentável, capaz de auxiliar na drenagem urbana por meio do amortecimento dos picos de escoamento, mitigando assim os alagamentos em cidades com infraestrutura deficiente. Este trabalho se baseia em um estudo de caso sobre a viabilidade da utilização concreto permeável produzido com agregado reciclado para a adaptação do revestimento de uma área de estacionamento que apresenta alagamentos recorrentes em dias de chuva. Propõe-se o desenvolvimento de parâmetros norteadores para aplicação do método dos fatores da ISO 15.686, que oferece uma abordagem sistemática para estimar a vida útil de ativos da construção. Foram definidos condicionantes críticos — fatores técnicos, ambientais e operacionais com potencial de influenciar a vida útil dos concretos permeáveis aplicáveis em pavimentos de estacionamentos. O entendimento de como cada fator influencia a vida útil é um caminho para fomentar estudos futuros sobre o uso dos pavimentos de concreto permeável, considerando a necessidade urgente de utilização de sistemas drenagem urbana sustentáveis. A construção dos condicionantes demonstrou a necessidade de desenvolvimento de modelos de desempenho e estabelecimento de bases de dados confiáveis para a determinação da vida útil de referência, bem como uma faixa apropriada de valores para os diferentes fatores.

### **Abstract**

Permeable pavement is an innovative and potentially sustainable technology capable of aiding urban drainage by damping peak runoff, thus mitigating flooding in cities with deficient infrastructure. This work is based on a case study on the feasibility of using pervious concrete made with recycled aggregate to adapt the surface of a parking lot that experiences recurring flooding on rainy days. The study proposes the development of guiding parameters for applying the ISO 15686 factor method, which offers a systematic approach to estimating the service life of construction assets. Critical constraints were defined—technical, environmental, and operational factors with the potential to influence the service life of pervious concrete used in parking lot pavements. Understanding how each factor influences the service life is a path to fostering future studies on the use of pervious concrete pavements, considering the urgent need for sustainable urban drainage systems. The construction of the constraints demonstrated the need to develop performance models and establish reliable databases for determining the reference service life, as well as an appropriate range of values for the different factors.

### **Palavras Chaves:**

vida útil, concreto permeável, método dos fatores.

### **Keywords:**

service life, pervious concrete, factor method.

<sup>1</sup>Dr., Professora Associada, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, monica.garcez@ufrgs.br

<sup>2</sup>MSc. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, leonardo.lunkes@ufrgs.br

<sup>3</sup>MSc. Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, larissa.guerra@ufrgs.br

## 1. INTRODUÇÃO

Alagamentos, enchentes e inundações têm ocorrido com frequência crescente no Brasil, especialmente no Rio Grande do Sul, gerando transtornos significativos para populações urbanas e rurais. Historicamente, o crescimento desordenado das cidades, a ausência de infraestrutura adequada de drenagem e a falta de manutenção têm sido fatores agravantes desses eventos (Minervino & Duarte, 2016). A expansão das áreas urbanas modifica o ciclo hidrológico natural, pois, com a impermeabilização do solo, parte da água que antes infiltrava no solo, evaporava ou era retida pela vegetação passa a escoar superficialmente (Tucci, 2020). A combinação entre o aumento da velocidade de escoamento e a redução do tempo de concentração contribui diretamente para a ocorrência de alagamentos. Portanto, o crescimento dos centros urbanos demanda uma reorganização dos sistemas de drenagem existentes, considerando às modificações das taxas de infiltração do solo e aumento do volume e da taxa de escoamento de águas superficiais oriundas de efeitos pluviométricos. A própria Política Nacional de Saneamento Básico, Lei 11.445 (Brasil, 2007) define a Drenagem e Manejo de Águas Pluviais (DMAP) como uma das quatro vertentes do saneamento.

A pavimentação de vias urbanas e áreas adjacentes agrega um potencial ainda maior dos efeitos de alagamentos, pois elimina áreas de infiltração e aumenta a velocidade de escoamento das águas superficiais. As soluções tradicionais para mitigar alagamentos urbanos geralmente envolvem obras hidráulicas estruturais, como construção de redes de drenagem, canalizações e retificações de corpos d'água, construção de galerias e dutos hidráulicos, avaliadas a partir de análises econômicas dos benefícios e dos custos de cada medida.

Em contrapartida, também pode ser considerada a utilização de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (Sustainable Urban Drainage System - SuDS), que consistem em um conjunto de medidas compensatórias para os efeitos negativos da urbanização acelerada, focando nos processos hidrológicos, visando a redução dos volumes de vazões. Estes sistemas favorecem o escoamento da água da chuva, dão suporte aos sistemas de gerenciamento e controle de risco de alagamentos e contribuem na manutenção e proteção do ciclo natural da água e controle de poluição (Woods Ballard *et al.*, 2015). Zhu *et al.* (Zhu *et al.*, 2021) salientam alguns pontos relevantes sobre a implantação de SuDS, como a melhora na resiliência urbana para previsões climáticas extremas em sinergia com o melhor gerenciamento dos riscos de inundação, melhor planejamento urbano e a evolução de novas tecnologias robustas e capazes de superar eventos climáticos intensos.

Os pavimentos permeáveis integram os SuDS por sua capacidade de reduzir o volume de escoamento superficial e a carga poluente, desde que projetados, executados e operados de maneira a garantir sua permeabilidade ao longo da vida útil (Marchioni, 2014; Koohmishi, 2019; Liu *et al.*, 2020). Um dos principais benefícios é a atenuação dos picos de vazão, aliviando a pressão sobre os sistemas convencionais de drenagem (Oliveira, 2018; Frohlich, 2019). Além disso, pavimentos permeáveis também se enquadram como sistemas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) sobre o ciclo hidrológico, por mimetizarem o comportamento hidrológico natural da área por meio da infiltração, filtragem, armazenamento e evaporação do escoamento junto à sua origem (Turco *et al.*, 2017).

A NBR 16.416 (ABNT, 2015) indica que três tipos básicos de sistemas de infiltração podem ser utilizados, dependendo das características do solo ou condicionantes de projeto: infiltração total, parcial, ou sem infiltração. Nos pavimentos com infiltração total as camadas superficiais de base são permeáveis, sendo a água da chuva armazenada brevemente. Já na infiltração parcial apenas a camada superficial é permeável e a água da chuva é descarregada lateralmente. Nos pavimentos sem infiltração a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito sendo posteriormente drenada. (Ge *et al.*, 2022). O coeficiente de permeabilidade do subleito, a saturação do solo, o nível do lençol freático e as áreas de contribuição são condicionantes para determi-

nação do sistema de infiltração e determinarão se a água captada será infiltrada no próprio subleito ou necessitará ser drenada por um dreno, armazenada e/ou realizado uma outra destinação (Pezzaniti et al., 2009; Hong, 2021).

Naturalmente, existe uma preocupação quanto à vida útil dos pavimentos permeáveis pela perda da capacidade de infiltração (Bean et al., 2004; Marchioni, 2014), o que evidencia a importância da manutenção periódica e monitoramento para avaliação da taxa de infiltração ao longo na vida útil. Entretanto, poucas são as discussões a respeito da previsão de vida útil de pavimentos permeáveis, especialmente quando utilizados materiais não convencionais, como agregado reciclado oriundo de resíduos de construção civil. No Brasil, não existe normativa para utilização destes resíduos resíduos como agregado para concreto permeável, mas esta solução tem se tornado cada vez mais interessante pelo aspecto ambiental sob o ponto de vista de diminuir a deposição de resíduos em aterros.

Neste contexto, este trabalho se baseia em um estudo de caso sobre a viabilidade da utilização concreto permeável, produzido com agregado reciclado, para a adaptação do revestimento de uma área de estacionamento na UFRGS que apresenta alagamentos recorrentes em dias de chuva. A partir desse estudo, são propostos parâmetros norteadores para a aplicação do planejamento da vida útil através do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008), por meio da identificação de condicionantes críticos — fatores técnicos, ambientais e operacionais. com potencial de influenciar diretamente a vida útil de pavimentos de concreto permeável aplicados em áreas de estacionamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Modelos de previsão de vida útil são comumente divididos em modelos determinísticos, probabilísticos e de engenharia. Enquanto os modelos determinísticos fornecem um valor absoluto e único para a vida útil, os probabilísticos permitem incluir variações de fenômenos reais por meio de algoritmos probabilísticos, e os de engenharia expressam a durabilidade por meio de funções de desempenho ao longo do tempo, combinando as duas metodologias anteriores (Maia et al., 2020). Estes modelos pressupõe que seja conhecido o desempenho do sistema sob determinadas condições de exposição, além do regime de construção e manutenção. Na prática, porém, estas informações são de difícil obtenção, de modo que as estimativas acabam se apoiando, com frequência, em julgamentos baseados em experiência prévia ou em resultados de ensaios de laboratório e de campo (Davies & Wyatt, 2005).

A ISO 15.686-1 (ISO, 2011) apresenta os princípios para planejamento da vida útil de edifícios e ativos de construção, e sugere o método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) como uma ferramenta para estimativa simplificada de vida útil quando não são disponíveis dados mais específicos. Neste método, a vida útil estimada de um componente de construção é obtida multiplicando-se uma vida útil de referência por um conjunto de fatores determinísticos relacionados às diferenças entre as condições de referência e as condições de cada caso específico. O método foi originalmente proposto em 1993 pelo Instituto de Arquitetura do Japão (Silva & Pietro, 2021) e vem sendo amplamente utilizado para diferentes sistemas construtivos como revestimentos em madeira (Silva & Pietro, 2021), pedra natural (Emídio et al., 2014) e concreto (Jardim et al., 2019), bem como sistemas de aberturas (Maia et al., 2020), entre outros.

A ISO 15.686-8 (ISO, 2008) aborda a vida útil através de três perspectivas: i) vida útil do projeto: vida útil pretendida, esperada ou especificada pelo projetista; ii) vida útil de referência (RSL): vida útil de um ativo a partir determinadas condições de uso; e iii) vida útil estimada (ESL): vida útil ajustada considerando condições de uso de referência em termos de materiais, projeto, ambiente, uso e manutenção. O método permite uma avaliação sistemática de como diferentes condicionantes podem afetar a vida útil de um determinado ativo. A abordagem pode ser feita em três níveis: checklist (sem interdependência), multiplicação (com fatores independentes) e função (com fatores interdependentes).

A nível de multiplicação, a vida útil estimada (ESL) pode ser determinada a partir da vida útil de referência (RSL) combinada com uma série de fatores independentes entre si (Equação 1) que refletem a dependência relativa da vida útil com relação à diferença entre as condições de uso e as utilizadas na determinação da de referência (RSL). Enquanto os fatores A, B e C são considerados características de qualidade inerentes, D e E remetem ao ambiente de exposição, e F e G às condições de operação.

$$T_{ESL} = T_{RSL} * \phi A * \phi B * \phi C * \phi D * \phi E * \phi F * \phi G \quad (1)$$

Na Equação 1, originalmente desenvolvida para aplicação em construções, tESL e tRSL representam a vida útil estimada e de referência,  $\phi A$  expressa características do material, podendo estar relacionado à qualidade do material em si ou ao tratamento (superfície, impregnação) para protegê-lo contra a exposição climática (externa, interna),  $\phi B$  expressa o nível de detalhamento do projeto,  $\phi C$  expressa a habilidade da mão de obra para execução,  $\phi D$  expressa condições do ambiente interno,  $\phi E$  expressa condições do ambiente externo,  $\phi F$  expressa as condições de uso, e  $\phi G$  expressa condições de manutenção.

A RSL pode ser derivada de modelagem, experiência adquirida, ensaios acelerados, dados obtidos a partir de informações fornecidas pelo fabricante ou de exigências normativas, além de abordagem probabilística. Os fatores A à F refletem parâmetros que podem afetar a ESL, com relação aos padrões considerados para determinação da RSL. A aplicação crescente do método e sua disseminação para diferentes ativos vem demonstrando a necessidade do refinamento de dados de entrada, tanto para a RSL quanto para a seleção dos fatores, cuja combinação determina a ESL. Assim, um aspecto importante para aplicação do método é estimar valores os mais assertivos quanto possível em relação à RSL e aos fatores. Além da simplicidade, uma vantagem da utilização do método é que as análises podem ser continuamente refinadas com base em dados recentes e experiência acumulada.

A construção dos fatores, consiste primeiramente em especificar e descrever qualitativamente aspectos que afetam as condições em uso do ativo, bem como quantificar as faixas de variação, como ilustrado na Tabela 1. O método implica a necessidade de se ter procedimentos simples para seleção dos fatores, com base no conhecimento existente. Os valores podem ser refinados a medida que novos conhecimentos e evidências sejam identificados.

**Tabela 1. Definição dos condicionantes e faixas de variação para o ativo, quando em uso.**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
A	Material	Tipo/qualidade, durabilidade e sistema de proteção	< 1.00	1.00	> 1.00
B	Nível de projeto	Detalhes construtivos			
C	Execução	Mão de obra para execução			
D	Ambiente interno	Condições de exposição			
E	Ambiente externo	Condições de exposição			
F	Uso	Condicionantes de uso			
G	Manutenção	Qualidade e frequência			

As condições e aspectos considerados em cada fator dependem das especificidades de cada ativo. A condição normal equivale à unidade. Os níveis inferiores e superiores podem conter valores intermediários, relacionados a condições específicas e importância de cada fator. Os valores estipulados nas faixas de variação também podem ser diferentes para cada fator (A, B, C, D, E, F, G). Com relação à condição denominada normal, as faixas de variação inferiores tendem a diminuir, enquanto as superiores tendem a aumentar a RSL. Estas faixas de variação devem, preferencialmente, conter valores próximos da unidade, sendo indicados intervalos de 0,8 a 1,2 ou 0,9 a 1,1.

Observa-se que o método possui um nível de incerteza considerável e os fatores são em geral interdependentes. Cada fator contribui parcialmente com a incerteza na medida em que se distancia da unidade, de forma proporcional ao valor absoluto do seu logaritmo. A importância relativa da interdependência entre os fatores aumenta com o aumento do desvio do valor do fator com relação à unidade.

Após a definição dos condicionantes e faixas de variação são especificadas as condições específicas em uso para o ativo em questão e o valor de cada fator ( $\phi$ ), como exemplificado na Tabela 2. Nota-se que a condição de referência quando assumida a RSL pode se referir à condição normal, para todas as categorias, ou pode variar.

**Tabela 2. Condições específicas em uso e determinação dos fatores.**

Fator	Condição em uso	Condição de referência	$\phi$	<i>Condições em uso</i> <i>Condição de referência</i>
A à G	Normal, inferior, superior ou não aplicável	Normal, inferior, superior ou não aplicável		

A ESL pode ser definida como a vida útil de serviço média a algum nível particular de significância. De forma alternativa, pode ser também determinada a partir de um nível de significância de uma distribuição de probabilidade. O nível de significância é a probabilidade de que a de que a ESL não seja atingida. O nível de significância de 50% é a mediana, usualmente igual ou muito próxima da média. Normalmente o nível de significância fica entre 0 e 50%.

Para cada ESL deve também ser estimado um intervalo de confiança, com base na confiabilidade dos dados utilizados na estimativa da ESL e na incerteza inerente ao processo. No nível multiplicação o intervalo de confiança para a ESL é dado pela Equação 2. Em geral, adota-se um nível de confiança de 95% ( $\pm 2$  desvios padrão de uma distribuição normal).

$$\Delta t_{ESL} = t_{ESL} \sqrt{\left(\frac{\Delta t_{RSL}}{\Delta t_{RSL}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \phi A}{\phi A}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta \phi G}{\phi G}\right)^2} \quad (2)$$

Para casos em que um modelo de vida útil teóricos estejam disponíveis, ou quando existem modelos de comportamento desenvolvidos com base em quantidade suficiente de dados experimentais, é possível refinar a análise através da utilização do nível de função (Equação 3), que é uma generalização do nível multiplicação.

$$\Delta t_{ESL} = t_{ESL} * \phi(a,b,c,d,e,f,g) \quad (3)$$

Pelo exposto, fica claro que a ESL não representa um valor exato e, portanto, não fornece uma garantia de uma vida útil, apenas fornece uma estimativa empírica da vida útil sob determinadas condições, como destacam Davies & Wyatt (2005). Para avaliação do resultado do cálculo, é importante estar ciente da descrição do ESL conforme ISO 15.686-1 (ISO, 2011): vida útil de serviço sob determinadas condições a que o ativo é submetido quando em uso, condições estas diferentes das consideradas na definição da vida útil de referência. Para aplicar o método de forma prática e confiável, é necessário buscar fontes de dados que apresentem valores significativos na construção dos condicionantes, sejam eles oriundos de normas, ensaios de campo, fabricantes ou experiência acumulada. Como o método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) pode ser aplicado em uma variedade de situações, não existem fatores universais. A filosofia básica do método remete a uma estimativa de vida útil com base no desempenho de um sistema semelhante sob diferentes condições (Davies & Wyatt, 2005). Torna-se indispensável, portanto, o desenvolvimento de condicionantes específicos, que abordem o máximo possível de aspectos que podem afetar o desempenho do sistema analisado, como se propõe neste artigo.

As principais críticas quanto à utilização do método dos fatores diz respeito às seguintes limitações (Emídio *et al.*, 2014): i) O resultado é um valor absoluto para a vida útil, enquanto o ideal seria saber a partir de quando intervenções substanciais devem ser feitas, antes do fim da vida útil; ii) A incerteza associada à vida útil de referência; iii) A quantificação empírica dos fatores; e iv) O mesmo peso adotado para todos os fatores, não levando em consideração que diferentes variáveis podem afetar a vida útil do elemento de maneiras diferentes e em graus variados. Estas limitações, no entanto, podem ser parcialmente superadas pela caracterização e quantificação cuidadosas dos fatores, de acordo com seu efeito no desempenho dos materiais ou elementos em análise com base em dados experimentais (Maia *et al.*, 2020). A ampla utilização do método decorre da sua clareza, facilidade de aplicação e alta operabilidade, mesmo quando nem todos os dados para estimar a vida útil estão disponíveis, uma vez que os dados podem ser adicionados ou completados em qualquer etapa do processo limitações (Emídio *et al.*, 2014).

Embora muitas vezes visto como um método determinístico, o método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) é um framework geral para previsão da vida útil de um ativo, que equilibra versatilidade, baixo custo e facilidade de aplicação.

### 3. ESTUDO DE CASO

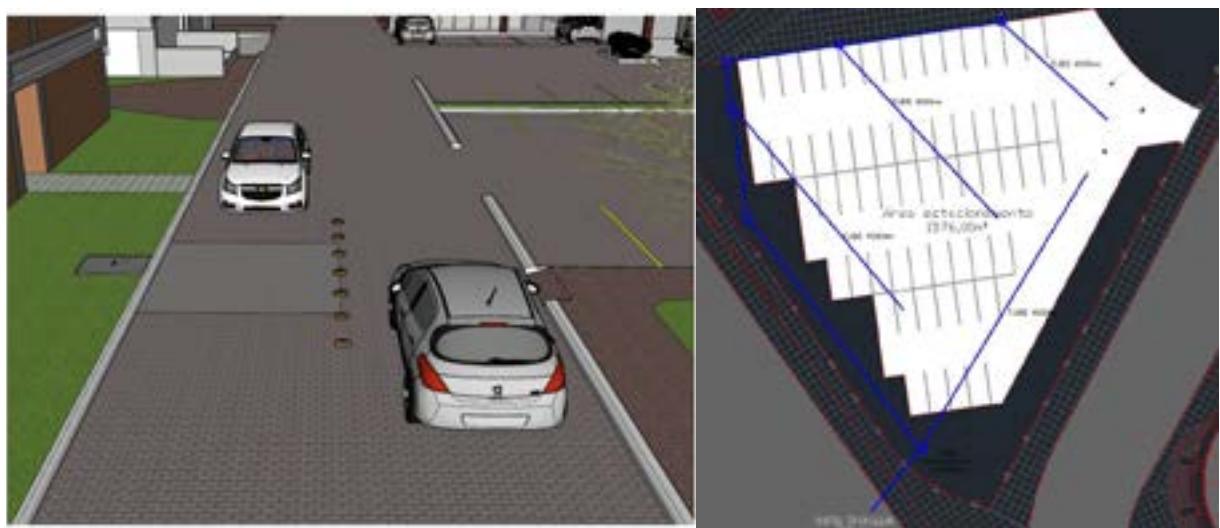
O estudo de caso usado como base para o desenvolvimento deste trabalho aborda a viabilidade da utilização de concreto permeável com agregados reciclados de concreto para revestimento de um pavimento permeável localizado em de uma área de estacionamento do Campus Central da UFRGS. O projeto de revitalização do Campus Central, onde estão sendo consideradas opções para melhoria da infraestrutura existente, foi desenvolvido pelo Setor de Patrimônio Histórico da Superintendência de Infraestrutura (SPH/SUINFRA) da UFRGS. Os 1576 m<sup>2</sup> de área de estacionamento da Escola de Direito da UFRGS (Figura 1(a)) foram considerados neste estudo de caso. O estacionamento recebe tráfego de veículos leves e apresenta alagamentos recorrentes em dias de chuva. O estudo de caso é utilizado para propor parâmetros norteadores para estimativa de vida útil através do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008).

A seção de projeto para implementação do pavimento permeável é similar a estrutura de um pavimento teste implantado no Campus do Vale da UFRGS em um projeto desenvolvido por Strieder (2021). O dimensionamento foi realizado com o software PerviousPave, desenvolvido pela American Concrete Pavement Association (ACPA, 2025), assumindo que a estrutura do pavimento atende, simultaneamente, aos requisitos estruturais e de gerenciamento das águas pluviais. No PerviousPave, a espessura necessária da laje de concreto, determinada pelo algoritmo de projeto estrutural, é usada

como entrada direta para o projeto hidrológico; a espessura da camada de sub-base/reservatório é ajustada, conforme necessário, até que a estrutura do pavimento de concreto permeável seja capaz de atender aos requisitos de gerenciamento de águas pluviais.

Como parâmetros de projeto foram considerados um período de projeto de 10 anos, confiabilidade de 80% e tráfego leve (VDM 400, 5% caminhões, crescimento anual de 1%). A seção do pavimento compreende uma camada de concreto permeável de 0,18 m posicionada acima de uma camada granular de 0,31 m, que serve como reservatório de água, e uma lona impermeabilizante. O pavimento, como idealizado, não considerou a elevação do pavimento, foi projetado para ser executado no mesmo nível que as áreas paisagísticas ao redor (Figura 1(a)), mas possui sistema de meio-fio, para limitar a quantidade de águas pluviais que fluem de áreas paisagísticas do entorno. O quantitativo de materiais para execução do projeto é descrito na Tabela 3.

**Figura 1. (a) Esquema de implantação do pavimento (Strieder, 2021); (b) Localização da área drenagem do pavimento permeável (UFRGS, 2021).**



O traço do concreto permeável corresponde a 1 cimento: 3 agregado reciclado em com relação água/cimento 0,3, dosado conforme as recomendações da ACI 522 (ACI, 2023), com base na teoria do volume absoluto. Os quantitativos utilizados são fundamentados nos resultados de um amplo programa experimental desenvolvido por Strieder (2021) no qual foram testadas misturas com 20% a 100% de agregado reciclado na composição. O traço do concreto permeável, produzido com 100% de agregado reciclado resultou em porosidade real de 20%, densidade real de 1930 kg/m<sup>3</sup>, condutividade hidráulica de 25,91 mm/s, taxa de infiltração de 17.122 mm/h, resistência a tração na flexão aos 28 dias de 2,20 MPa, resistência a compressão aos 28 dias de 15,23 MPa e abrasão superficial 0,28% (valores médios). A porcentagem de vazios interconectados e desgaste pelo método Cântabro (abrasão Los Angeles) da mistura não foram determinadas.

Tabela 3. Quantitativos de materiais.

Descrição	Quantidade	Unidade
Base		
• Agregado graúdo granítico ( $D_{\max}$ 25mm)	488,60	$m^3$
• Lona	1576,00	$m^2$
• Tubo de drenagem	210,00	m
Concreto permeável		
• Cimento	71550,00	kg
• Agregado graúdo (material reciclado - $D_{\max}$ 12mm)	214651,20	kg
• Água	21,40	$m^3$

O agregado graúdo reciclado que compõe o concreto permeável foi obtido de obras de demolição na própria UFRGS e corpos-de-prova descartados pelos laboratórios de engenharia civil. A composição granulométrica do material resultou em uma curva granulométrica uniforme, com  $D_{\max}$  de 12,5 mm sendo 29% de material retido na peneira 9,6 mm, 51% na 4,8 mm e 20% na 2,4 mm. O agregado reciclado foi classificado como ARC (teor de fragmentos a base de cimento e rochas superior a 90%). A absorção referente à fração de agregados reciclados foi compensada através da adição de água além da considerada na relação a/c da mistura.

A NBR 16.416 (ABNT, 2015) estabelece que a intensidade da chuva de projeto deve seguir a metodologia de dimensionamento de sistemas de micro drenagem, a partir da obtenção de curvas IDF (Intensidade/Duração/Freqüência). A cidade de Porto Alegre possui um modelo consolidado para a determinação da IDF, apresentado na Equação 4, onde  $Tr$  é o período de retorno (anos) e  $t$  é a duração da precipitação (min). O período de retorno da precipitação deve ser no mínimo de dez anos, considerando-se a duração mínima de 1 hora, o que resulta em uma intensidade de 47,42 mm/h.

$$i = \frac{4247,9 * Tr^{0,2097}}{(t+25,2)^{1,1199}} \quad (4)$$

O tempo máximo de retenção adotado foi de 48 horas. A porosidade do concreto permeável assumida foi de 20% e a do reservatório 35% (Strieder, 2021).

Como o sistema de pavimento permeável adotado no estudo de caso é um sistema sem infiltração, toda a água que entra no pavimento deve ser coletada e escoada para um sistema de drenagem. Sendo assim, foram previstos drenos para coleta da água, considerando a intensidade da chuva e o período de projeto. Para o dimensionamento dos drenos considerou-se o método racional, calculando a vazão pela Equação 5, onde  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ ),  $C$  é o coeficiente de escoamento (adimensional),  $i$  é a intensidade média da chuva ( $m/s$ ) e  $A$  é a área de contribuição ( $m^2$ ). A área de drenagem do pavimento corresponde ao total do estacionamento da Escola de Direito da UFRGS (1576  $m^2$ ). O coeficiente de escoamento para a área de contribuição permeável adotado é 1,0 (toda a água que incide sobre o reservatório é escoada). Assim, a vazão do projeto é de 74,74  $m^3/h$  para a área permeável que corresponde também à área de contribuição. A altura efetiva da água da chuva sobre o pavimento permeável é de 0,047 m, resultante da divisão da vazão do projeto pela área de contribuição permeável.

$$Q = C * i * A \quad (5)$$

Para o dimensionamento do diâmetro dos tubos de drenagem foi utilizada a Equação 6, onde  $D$  é o diâmetro em m,  $Q$  é a vazão em  $m^3/s$ ,  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning e  $I$  é a declividade em m/m. Considerou-se que cada tubo conduz a metade da vazão calculada, um coeficiente de rugosidade de 0,025 para cada tubo corrugado e uma inclinação de 2% (Strieder, 2021). Assim o diâmetro necessário para os tubos é de 189,00 mm para a seção plena. Considerando a segurança do projeto e a geometria da área, estabelece-se a utilização de 4 tubos de 100mm, distribuídos pelo pavimento de modo a captar a água e conduzir até o sistema de drenagem urbana. O croqui aprese-

tado na Figura 1 (b) representa a disposição dos tubos.

$$D = \left( \frac{Q * n}{0,312 * \sqrt{I}} \right)^{\frac{3}{8}} \quad (6)$$

Seguindo o projeto de referência, considera-se que a solução proposta é tecnicamente viável apresentando desempenho mecânico compatível com as solicitações esperadas e elevada capacidade de infiltração.

#### **4. CONSIDERAÇÕES SOBRE MANUTENÇÃO E VIDA ÚTIL**

O processo de colmatação dos vazios interconectados do concreto permeável é a principal causa da perda progressiva de capacidade de infiltração na superfície ou na estrutura como um todo, sendo, portanto, um aspecto essencial no processo de gestão e manutenção deste tipo de pavimento. A ação de carreamento de folhagens, solos, detritos e lama pelas águas escoadas superficialmente pode causar entupimento imediato mesmo da base permeável sob o revestimento. Mesmo quando acontece de forma lenta, este processo é inexorável.

Em situações de implantação urbana, onde sejam recorrentes os alagamentos em épocas de maior volume pluviométrico, deverá sempre ser analisada a necessidade de micro drenagem local, pois o pavimento permeável estaria fadado ao insucesso em breve período, perdendo sua função primordial em virtude do entupimento abrupto pela secagem de lama entre seus vazios (Balbo, 2020).

Em estudo de aplicação em calçada experimental, construída na Universidade de São Paulo, em área densamente arborizada, com área de contribuição em seu entorno totalmente gramada, a taxa de infiltração de 0,56 cm/s medida após a construção reduziu para 0,21cm/s em quatro meses, mantendo-se relativamente estável nos 400 dias posteriores (Balbo, 2020). Segundo Hunt & Collins (2020) mesmo com colmatação com areia fina, a capacidade de infiltração de concretos permeáveis pode se manter elevada, sendo o entupimento restrito à parte superficial (cerca de 20 mm) do revestimento.

Neste sentido, a utilização de revestimento em concreto permeável pressupõe inspeções e operações de manutenção frequentes, o que pode gerar custos extras, com relação a um revestimento convencional (Coutinho, 2011). Rotinas de inspeção devem considerar basicamente o monitoramento da perda de permeabilidade em função das condições locais, que definem maior ou menor penetração de matérias orgânicas ou minerais e o monitoramento da ocorrência de defeitos estruturais que podem acarretar perda de desempenho do revestimento em concreto permeável. Como variações nas condições de tráfego, carregamento dos veículos e condições climáticas extremas podem influenciar as condições do pavimento durante a fase de uso, a verificação destes fatores também é fundamental.

Como manutenção de rotina, é realizada limpeza com a utilização de vassouras manuais e/ou mecânicas ou mesmo equipamentos de aspiração. A varrição ou a aspiração de detritos deve ser realizada antes de sua decomposição (Bean, 2006).

No que se refere a manutenção preventiva são utilizados varredores mecanizados que, no caso de colmatação por areia, removam forçadamente, com seus giros, o material depositado superficialmente. Segundo Diez (Diez, 2007), esta operação melhora a permeabilidade em mais de 50%.

Quanto à manutenção corretiva para a remoção dos detritos pode ser considerada a utilização de jato d'água sob pressão para remover total ou parcialmente detritos e partículas que estejam colmatando os poros, ou mesmo o emprego de equipamento de varrição e succção para atingir camadas mais profundas do pavimento. Este, segundo o ACI 522 (ACI, 2023) é o esquema de manutenção corretiva mais eficaz.

A *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2015) apresenta recomendações mínimas de ordem prática sobre operações de manutenção em pavimentos permeáveis, compiladas na Tabela 4.

**Tabela 4. Operações de manutenção em pavimentos permeáveis.**

Atividade	Periodicidade
Inspeção visual para identificação da presença de detritos e sedimentos	Mensal ou semanal, quando da ocorrência de precipitação intensa ou quando o pavimento estiver em áreas cobertas por vegetação
Inspeção para identificação de defeitos estruturais	Anual
Inspeção para verificação do excesso de fluxo de águas não pluviais com realização de desvio do fluxo	Eventual
Realização de ensaio de taxa de infiltração	Trimestral
Realização de jateamento de água sob pressão para limpeza profunda	Quando a taxa de infiltração for reduzida para 25% da inicial
Realização de limpeza superficial com aspiração potente	Semestral ou trimestral em função do volume de folhagens e detritos
Limpeza superficial com vassoura ou aspiração	Rotineira
Manutenção de áreas gramadas lindeiras	Quando necessário
Semeadura de áreas adjacentes desmatadas	Quando necessário

Em cada caso, é interessante estabelecer limiares que envolvam fundamentalmente a consideração da taxa de infiltração pré-existente e a realização de testes. Os equipamentos de aspiração e de jateamento de água, por exemplo, podem ser testados quanto à eficiência de utilização individual e conjunta, de acordo com a medida de recuperação da taxa de infiltração. Pode ser considerado também a utilização de equipamentos de maior porte como veículos com equipamentos de varrição e sucção acoplados, considerando disponibilidade, custo, produtividade e especificidades do local de implantação do pavimento.

A NBR 16.416 (ABNT, 2015) somente menciona que o pavimento permeável deve sofrer intervenções de manutenção sempre que existirem condições que comprometam o desempenho mecânico ou hidráulico do pavimento. Quando o coeficiente de permeabilidade atingir  $10^{-5}$  m/s, deve-se proceder a remoção de sujeiras e detritos por meio de varrição mecânica ou manual, aplicação de jato de água sob pressão ou aplicação de equipamento de succão para recompor a capacidade de permeabilidade do pavimento. Não existe um limite universal que de perda de permeabilidade que indique e necessidade de substituição do pavimento, mas, deve-se ter em mente que a redução da taxa de infiltração compromete diretamente o desempenho do pavimento permeável e, consequentemente a eficiência do sistema na atenuação de picos de vazão.

Visando embasar inspeções para identificação de defeitos estruturais (fissuras, deterioração da superfície e perda de capacidade de suporte do subleito), Carls (Carls, 2022) desenvolveu um protocolo de avaliação de manifestações patológicas para pavimentos permeáveis, adaptado de normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) desenvolvidas originalmente para pavimentos de concreto rígido. O protocolo segue a terminologia da norma DNIT 061 (DNIT, 2004) e a especificação dos graus de severidade dos defeitos para avaliação do Índice de Condição do Pavimento (ICP), conforme norma DNIT 060 (DNIT, 2004). O ICP fornece um indicativo da condição estrutural do pavimento, ao classificar os defeitos de acordo com suas dimensões, severidades, condições ou influências no conforto, segurança e escoamento do tráfego.

Se realizadas operações de manutenção previstas, em especial as que tratam da camada superficial e da permeabilidade, a função do pavimento permeável pode ser mantida sem grandes necessidades de obras de reabilitação. Embora o desgaste da estrutura do pavimento varie de acordo com seu uso efetivo e operações manutenção realizadas, uma vida útil de até 20 anos pode ser estimada, antes da necessidade de se reconstruir o pavimento (Singh *et al.*, 2023). Hunt & Collins (2008) estimam que, com manutenção adequada, os pavimentos permeáveis possam cumprir suas funções durante longos períodos de serviço, como duas décadas. Segundo o ACI 522 (ACI, 2023) pavimentos de concreto permeáveis com mais de 30 anos ainda estão em serviço nos Estados Unidos. Um estudo mais antigo, de Pratt *et al.* (1995) reporta entre 20 e 25 anos para necessidade de obras de substituição. Estudos reportados por Carls (Carls, 2022) indicam que com a utilização de técnicas adequadas de projeto, fabricação, execução e manutenção os pavimentos permeáveis poderão ser usados em ruas secundárias e residenciais por período de 20 a 30 anos. Embora as atividades de manutenção sejam primordiais para garantir que os pavimentos permeáveis atinjam a vida útil de projeto sem perder funcionalidade, o ACI 522 (ACI, 2023) pondera que os critérios mais importantes para o desempenho satisfatório contínuo dos pavimentos em concreto permeável são o projeto e a instalação adequados.

## **5. CONSTRUÇÃO DOS CONDICIONANTES PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS FATORES DA ISO 15.686-8 À PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL**

Os condicionantes para as diferentes categorias que compõe o método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) propostos neste trabalho (Tabelas 5 a 10) se aplicam para concreto permeável moldado *in loco* considerando um sistema sem infiltração (a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito, sendo depois removida pelo dreno). As faixas de variação sugeridas para cada condicionante (0,9 inferior, 1,00 normal e 1,10 superior) não possuem subdivisões, estão próximas à unidade, conforme indicação da metodologia adotada. Os valores estão embasadas em referências, não exaustivas, sobre pavimentos em concreto permeável e, quando disponível, com utilização de agregado reciclado. Assim, a condição superior tende a aumentar em 10% a vida útil (fator 1,10) enquanto a inferior tende a diminuir em 10% (fator 0,90). Importante destacar que a falta de modelos de vida útil para pavimentos de concreto permeável, e as incertezas que podem advir da discricionariedade na adoção da faixa de variação, fazem com que a principal contribuição deste trabalho seja a construção dos condicionantes para as diferentes categorias. Neste contexto, valores diferenciados e subdivisões podem ser constantemente alterados para refinar a análise. Na construção dos condicionantes, não foram incluídos os requisitos cujo atendimento é obrigatório pela NBR 14646 (ABNT, 2015) uma vez que estes devem ser cumpridos de forma compulsória.

Na Tabela 5 são apresentados os condicionantes construídos para a categoria A (material).

**Tabela 5. Condicionantes para a categoria A (material).**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
A	Material	A1. Dosagem do concreto permeável	0,90 dosagem baseada em experiência prévia	1,00 utiliza método estabelecido de dosagem	-
		A2. Relação água/cimento da mistura	0,90 a/c fora do intervalo típico	1,00 0,26 < a/c < 0,40	-
		A3. Porosidade da mistura	0,90 inferior a 15%	1,00 15% a 25%	1,10 superior a 25%
		A4. Percentagem de vazios interconectados da mistura	0,90 Inferior a 20%	1,00 20% a 25%	1,10 superior a 25%
		A5. Resistência ao desgaste da mistura	0,9 abrasão Los Angeles > 50%	1,00 abrasão Los Angeles < 50%	-
		A6. Resistência à compressão da mistura	0,90 fck superior a do intervalo típico	1,00 2,8 MPa < f <sub>ck</sub> < 28,00 MPa	-
		A7. Agregado reciclado - Granulometria	0,90 gradação fora das faixas típicas para concreto permeável	1,00 dentro das faixas típicas para concreto permeável	-
		A8. Agregado reciclado - Compensação da absorção	0,90 sem compensação	1,00 realizada a compensação	-
		A9. Agregado reciclado - Composição	0,90 ARM teor de fragmentos à base de cimento e rochas < 90%	1,00 ARC teor de fragmentos à base de cimento e rochas > 90%	-
		A10. Utilização de fibras sintéticas	-	1.00 Dosagem sem utilização de fibras sintéticas	1.10 Dosagem com utilização de fibras sintéticas

#### **Dosagem do concreto permeável**

Existem, na literatura, métodos de dosagem para concreto permeável baseados na porosidade (Yania & Kabagire, 2014), espessura do revestimento de pasta cimentícia (Nguyen *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020) e otimização da pasta de cimento e do esqueleto granular (Claudino *et al.*, 2022).

#### **Relação água/cimento da mistura**

A relação água cimento para concretos permeáveis varia, tipicamente, entre 0,26 e 0,40, para garantir uma adequada cobertura do agregado graúdo e estabilidade da pasta de cimento. Enquanto o excesso de água no concreto permeável pode ocasionar o fluxo da pasta de cimento para o sistema de poros, causando entupimento, relações água cimento baixas podem dificultar a mistura e moldagem, prejudicando a distribuição adequada da pasta de cimento (ACI, 2010).

#### **Porosidade da mistura**

O ACI 522 (ACI, 2023) recomenda que seja adotada uma porcentagem de vazios de no mínimo 15%, para garantir a interconectividade dos vazios e permitir uma rápida percolação de água. Em geral são adotados valores entre 15% e 25% (Tennis *et al.*, 2004).

#### **Percentagem de vazios interconectados da mistura**

O ACI 522 (ACI, 2023) sugere que um concreto permeável deve conter 20% a 35% de vazios interconectados, que podem ser determinados através da norma francesa NF P98-254-2 (AFNOR, 1993).

### **Resistência ao desgaste da mistura**

Procedimentos da ASTM C944/C944M-19 (ASTM, 2019) que mede a resistência à abrasão da mistura pela máquina de corte rotativo e o método Cantabro, que mede a perda de massa de amostras cilíndricas submetidas a 500 rotações no equipamento de abrasão Los Angeles, são geralmente usados para medir a resistência à degradação do concreto permeável. Segundo Strieder (STRIEDER, 2021) o procedimento da ASTM C944/C944M-19 (ASTM, 2019), que mede a abrasão superficial, é mais adequado para simular a maioria das ações abrasivas relacionadas ao tráfego de veículos leve. Documentos como o ACI 522 (ACI, 2023) e a NBR 16.416 (ABNT, 2004) não especificam requisitos relacionados à resistência à abrasão para camadas de revestimento executadas em concreto permeável. Um estudo abrangente desenvolvido por Xavier *et al.* (2023) destacou dois aspectos importantes com relação à abrasão em concreto permeáveis: i) misturas produzidas com maior tamanho de agregado tendem a apresentar melhor resistência à abrasão, especialmente em misturas com granulometrias uniforme e descontínua; ii) a resistência à degradação é maior em concretos permeáveis com maior resistência à compressão, entretanto, há que se considerar que concretos permeáveis com maior resistência à compressão tendem a apresentar menor porcentagem de vazios interconectados.

Wang *et al.* (2020) classificam concreto permeáveis com perda de massa de até 50% (método Cantabro) como material de excelente resistência ao desgaste.

### **Resistência à compressão do concreto para tráfego de veículos leves**

Tipicamente, segundo o ACI 522 (2023), concretos permeáveis atendem à faixa de resistência à compressão de 2,80 a 28,00 MPa. É importante considerar que concretos permeáveis com maior resistência à compressão tendem a apresentar maior resistência à degradação, mas, em contrapartida, menor porcentagem de vazios interconectados (Guo *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2023). A NBR 16.416 (ABNT, 2015) apenas especifica que concretos permeáveis moldados *in loco* devem apresentar  $f_{ct} > 2$  MPa, não mencionando para este caso especificação mínima quanto à resistência à compressão. A norma, no entanto, menciona que peças de concreto permeável devem atender a uma resistência à compressão superior a 35 MPa.

### **Agregado reciclado - Granulometria**

O tamanho e a graduação do agregado influenciam fortemente a porosidade, o tamanho dos poros e a conectividade de misturas de concreto permeáveis (Xavier *et al.*, 2023). Agregados com  $D_{\max}$  entre 9,50 e 19 mm são os mais utilizados em concreto permeável, segundo o ACI 522 (ACI, 2023). A NBR 15.116 (ABNT, 2021) apresenta como requisitos para agregado reciclado Classe A (resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações e pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem) uma granulometria não uniforme e bem graduada com coeficiente de uniformidade  $C_u > 10$ , além de dimensão máxima característica inferior a 63mm. A composição granulométrica também influencia significativamente o percentual de vazios interconectados (Carmo *et al.*, 2022).

### **Agregado reciclado - Compensação da absorção**

A influência da absorção dos agregados naturais nas misturas de concreto permeável é, em geral, desconsiderada. No entanto, a elevada taxa de absorção dos agregados reciclados pode ser em parte compensada através da adição de água para além daquela considerada na relação a/c da mistura (LEITE, 2001). Esta compensação tende a evitar a perda de desempenho mecânico que pode ocorrer quando a água da mistura é absorvida por agregados com alta taxa de absorção resultando na diminuição da quantidade de pasta de cimento que envolve os agregados.

### **Aggregado reciclado - Composição**

De acordo com o teor de fragmentos à base de cimento e rochas, determinado segundo as prescrições da NBR 15.116 (ABNT, 2021) os agregados reciclados podem ser classificados como agregado reciclado de concreto (ARC, teor  $\geq 90\%$ ) ou agregado reciclado misto (ARM, teor  $<90\%$ ). A composição do agregado reciclado influencia as propriedades do concreto permeável, principalmente no que se refere à quantidade de material cerâmico, cuja presença pode reduzir a permeabilidade e a resistência mecânica (Mikami *et al.*, 2018), prejudicando sua durabilidade.

### **Utilização de fibras sintéticas**

Fibras sintéticas podem ser empregadas no concreto permeável para aumentar a resistência à flexão e tenacidade, definida como a absorção de energia do material após a fissuração (ACI, 2010).

Nas Tabelas 6 e 7 estão indicados os condicionantes construídos para as categorias B (nível de Projeto) e C (execução).

**Tabela 6. Condicionantes para as categorias B (nível de projeto).**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
B	Nível de projeto	B1. Especificações de projeto	-	1,00 projeto atende 100% as especificações mínimas requeridas	1,10 especificações mínimas superadas em mais de 50%
		B2. Período de retorno da precipitação e duração mínima	-	1,00 período de retorno de 10 anos, e duração mínima de 1 h	1,10 período de retorno e duração mínima superiores a 10 anos e 1h
		B3. Elevação do pavimento	0,90 pavimento em nível inferior ao de áreas paisagísticas ao redor, sem proteção adicional	1,00 pavimento no mesmo nível que as áreas paisagísticas ao redor	1,10 pavimento mais elevado que áreas paisagísticas ou com meio-fio para isolar áreas paisagísticas que estejam em elevações mais altas do que o pavimento
		B4. Sistema de drenagem	-	1,00 projeto com sistema de drenagem convencional	1,10 projeto inclui sistema de detenção de superfície ou subterrâneos
		B5. Águas pluviais de pavimentos convencionais adjacentes	0,90 águas pluviais de pavimentos adjacentes fluem livremente para o pavimento permeável.	1,00 pavimento com área suficiente para capturar eventuais detritos que possam obstruir os poros entre os períodos de manutenção	1,10 projeto limita águas pluviais que fluem para o concreto permeável.

### **Especificações de projeto**

Considerando que atingir 100% as especificações mínimas requeridas na NBR 16.416 (ABNT, 2015) seja um pressuposto, um nível superior poderia ser atingido se, por exemplo, estas especificações mínimas fossem superadas. Por exemplo, o ACI 522 (ACI, 2023) sugere que o projetista pode adicionar um fator de segurança ao projeto para levar em conta um certo nível de entupimento devido a eventuais falhas de manutenção.

### **Período de retorno da precipitação e duração mínima**

A determinação da chuva de projeto, segundo a NBR 16.416 (ABNT, 2015), deve seguir a metodologia adotada para o dimensionamento do sistema de micro drenagem, com utilização de curvas IDF, quando disponíveis, considerando o período de retorno da precipitação de no mínimo de dez anos e duração mínima de 1 h.

### **Elevação do pavimento**

O potencial de entupimento é reduzido quando áreas paisagísticas existentes no entorno estão em elevações mais baixas do que o pavimento de concreto permeável. O ACI 522 (ACI, 2023) recomenda que quando uma elevação superior às das áreas paisagísticas do entorno não for exequível, a inclinação das áreas adjacentes pode ser reduzida ao mínimo e meio-fios podem ser instalados para isolar estas áreas, de forma a minimizar o carregamento de partículas em direção ao pavimento de concreto permeável.

### **Sistema de drenagem**

A capacidade de drenagem do pavimento permeável pode ser aumentada por meio da inclusão de sistemas de detenção de superfície ou subterrâneos, como construção de valas adjacentes, lagoas de detenção e sistemas de armazenamento para posterior aproveitamento da água pluvial, como sugere o ACI 522.1 (ACI, 2020). Estes sistemas funcionam desde que haja integração hidráulica com a mesma área de contribuição, seja de forma direta (adjacente) ou indireta (conectada).

### **Águas pluviais de pavimentos convencionais adjacentes**

Limitar a quantidade de águas pluviais que fluem de áreas paisagísticas do entorno e pavimentos não permeáveis adjacentes, segundo o ACI 522 (ACI, 2023), pode reduzir o potencial de entupimento, a menos que a água advinda do pavimento não permeável esteja livre de sedimentos e haja área de superfície de concreto permeável suficiente para capturar eventuais detritos que possam obstruir os poros entre os períodos de manutenção.

**Tabela 7. Condicionantes para as categorias C (execução).**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
C	Execução	C1. Serviço de execução	0,90 Equipe não especializada	1,00 Equipe especializada em pavimentos permeáveis	1,10 Equipe especializada em pavimentos permeáveis
		C2. Medição do coeficiente de permeabilidade do pavimento recém-construído	-	1,00 superior a $10^{-3}$ m/s	1,10 $1,5 \times 10^{-3}$ m/s (50% superior ao mínimo)
		C3. Realização de ensaios adicionais para aceitação após instalação do pavimento	-	1,00 não realização de ensaios adicionais para aceitação no pavimento	1,10 Foram realizados ensaios adicionais para aceitação do pavimento

### **Serviço de execução**

O serviço de execução, se realizado por equipe especializada em pavimentos permeáveis pode contribuir para que este apresente desempenho superior à condição de referência.

### **Medição do coeficiente de permeabilidade do pavimento recém-construído**

O conteúdo de vazios de ar por si só não permite uma avaliação adequada da condutividade hidráulica. A qualidade dos vazios de ar, as dimensões dos capilares e os vazios de ar interconectados, também precisam ser considerados em pavimentos de asfalto poroso (Poulikakos *et al.*, 2006). Assim, o coeficiente de permeabilidade mínimo para concreto permeável deve ser  $10^{-3}$  m/s, medido em campo conforme o Anexo A da NBR 16.416 (ABNT, 2015) ou em laboratório, seguindo as diretrizes da NBR 13.292 (ABNT, 2021).

Um coeficiente de permeabilidade de  $10^{-5}$  m/s durante a fase de utilização do pavimento, segundo a NBR 16.416 (ABNT, 2015), já requer manutenção para recomposição da capacidade de permeabilidade do pavimento.

#### **Realização de ensaios adicionais para aceitação após instalação do pavimento**

A aceitação do concreto permeável moldado *in loco*, segundo a NBR 16.416 (ABNT, 2015) pressupõe a realização de ensaios para verificação do coeficiente de permeabilidade do pavimento recém-construído, resistência mecânica (NBR 12.142 (ABNT, 2010), e massa específica no estado fresco NBR 9.833 (ABNT, 2009). A realização de ensaios adicionais para aceitação do pavimento de concreto permeável inclui, por exemplo, a medição da massa específica no estado endurecido (NBR 9.778 (ABNT, 2009)), muitas vezes utilizada para comprovar os valores da massa específica no estado fresco, a verificação da espessura do pavimento construído e a análise de deflexões superficiais com Light Weight Deflectometer (LWD), como sugerido por Strieder (Strieder, 2021). Em geral, a verificação após execução é recomendada para aplicações em que o pavimento pode receber carga de tráfego pesado. Os corpos-de-prova extraídos para medição da densidade do concreto permeável no estado endurecido também podem ser utilizados para verificação da espessura do pavimento executado. A espessura também pode ser inspecionada durante a execução do pavimento, para dispensar a extração de corpos-de-prova.

Na Tabela 8 estão indicados os condicionantes construídos para as categorias D (ambiente interno) e E (ambiente externo).

**Tabela 8. Condicionantes para as categorias D (ambiente interno) e E (ambiente externo).**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
D	Ambiente interno	Não aplicável	-	-	-
E	Ambiente externo	E1. Ciclos de congelamento descongelamento	0,90 existe o risco, mas não são utilizadas medidas para mitigação	1,00 ambiente externo não sujeito à ciclos de congelamento e degelo ou com medidas para mitigação	-
		E2. Condições do solo no entorno do projeto	0,90 cobertura vegetal escassa com poucos arbustos no solo ao redor	1,00 cobertura vegetal e presença de arbustos no solo ao redor	1,10 cobertura vegetal e presença de arbustos no solo ao redor, e uso de medidas adicionais para contenção de carreamento de partículas

#### **Ciclos de congelamento descongelamento**

Como ciclos de congelamento e degelo podem ocasionar fissuração e danificar a estrutura do concreto permeável, através da diminuição de sua resistência, podem ser tomadas medidas para minimizar danos em ambientes susceptíveis a esta condição. A utilização de aditivos incorporadores de ar no concreto permeável, bem como a especificação de misturas com porosidade entre 15 e 25% podem diminuir os riscos de danos causados por ciclos de congelamento e degelo pavimentos de concreto permeável segundo o ACI 522.1 (ACI, 2020).

### **Condições do solo no entorno do projeto**

As condições do solo no entorno do projeto podem reduzir o potencial de entupimento do pavimento permeável. Uma forma de contornar esta condição é evitar a presença de solo descoberto das áreas adjacentes ao pavimento com uso de vegetação permanente e arbustos, por exemplo, para minimizar possíveis efeitos negativos decorrentes da erosão do solo. Neste sentido, é conveniente evitar que veículos circulem de áreas não pavimentadas para o pavimento de concreto permeável, como recomendado pelo ACI 522.1 (ACI, 2020).

Na Tabela 9 estão indicados os condicionantes construídos para a categoria F (uso).

**Tabela 9. Condicionantes para a categoria F (uso).**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
F	Uso	F1. Série histórica, chuva de projeto, período de retorno	0,9 chuvas durante a fase de uso podem superar a curva intensidade-duração-freqüência (IDF) do local de projeto	1,00 chuvas durante a fase de uso tendem a seguir curva do local de projeto	-
		F2. Tipo e quantidade de veículos	0,90 presença recorrente ( $VDM > 20$ ) de veículos fora das especificações de tráfego leve	1,00 tráfego de veículos leves ( $VDM$ até 400) e eventualmente ônibus e caminhões ( $VDM$ até 20)	-

#### **Série histórica, chuva de projeto, período de retorno**

Se os dados de projeto com relação à série histórica, chuva de projeto, período de retorno passem, durante a fase de utilização, a não representar de forma adequada as condições de uso, haverá necessidade de intervenção para adequação do pavimento permeável. Nestas condições, pode haver uma diminuição da vida útil de referência do pavimento permeável.

#### **Tipo e quantidade de veículos**

De acordo com a NBR 16.416 (ABNT, 2015), pavimentos em concreto permeável moldado *in loco* com no mínimo 100mm de espessura podem ser submetidos a tráfego de veículos leves. O tráfego preferencial de veículos leves pressupõe a passagem de ciclomotor, motoneta, motocicleta, triciclo, quadriciclo, automóvel, utilitário, caminhonete e camioneta, com volume diário médio ( $VDM$ ) de até 400, podendo existir ocasionalmente o tráfego de ônibus e caminhões em número não superior a um  $VDM$  de 20.

Obviamente todas as etapas do ciclo de vida do pavimento influenciam na sua vida útil, mas a manutenção tem importância fundamental, visto que a obstrução dos poros, que inevitavelmente ocorre durante a utilização do pavimento, causa a perda de funcionalidade do pavimento permeável. Na Tabela 10 constam os condicionantes desenvolvidos para a categoria G (manutenção), com base nas considerações discutidas especialmente no item referente a manutenção e vida útil que consta na sessão 4 deste artigo.

**Tabela 10. Condicionantes para a categoria G (manutenção).**

Fator	Categoria	Condicionantes	Faixas de Variação		
			Inferior	Normal	Superior
G	Manutenção	G1. Inspeção para verificação do coeficiente de permeabilidade	0,90 realizada em períodos superiores a 3 meses	1,00 realizada trimestralmente	1,10 realizada com frequência inferior a 3 meses
		G2. Inspeção para verificação do excesso de águas não pluviais e realização de desvio de fluxo	0,90 realizada em períodos superiores a 3 meses	1,00 realizada trimestralmente	1,10 realizada com frequência inferior a 3 meses
		G3. Inspeção para verificação de defeitos estruturais (fissuras, deterioração da superfície e perda de capacidade de suporte do subleito)	0,90 realizada com frequência superior a 12 meses	1,00 realizada anualmente	1,10 realizada com frequência inferior a 12 meses
		G4. Manutenção de rotina com varrição manual e aspiração)	0,90 verificação em períodos superiores a 3 meses	1,00 verificação das condições mensalmente	1,10 verificação em períodos inferiores a 1 mês
		G5. Manutenção preventiva - Limpeza superficial com varredores mecanizados	0,90 verificação das condições a cada 12 meses	1,00 verificação das condições a cada 6 meses ou menos, se constatada redução de 25% na taxa de infiltração (visando restaurar condições Iniciais de permeabilidade inicial)	1,10 verificação das condições a cada 3 meses
		G6. Manutenção corretiva - Limpeza profunda com jato d'água sob pressão e/ou equipamento de sucção.	0,90 anualmente ou quando o coeficiente de permeabilidade medido estiver inferior a $10^{-5}$ m/s, (com possibilidade de recuperação inferior a 80% da permeabilidade inicial)	1,00 anualmente ou quando o coeficiente de permeabilidade medido estiver inferior a $10^{-5}$ m/s, (visando recuperar no mínimo 80% da permeabilidade inicial)	1,10 anualmente ou quando o coeficiente de permeabilidade medido estiver inferior a $10^{-5}$ m/s, (visando recuperar no mínimo 100% da permeabilidade inicial)

Como o sistema de seleção de valores para as faixas de variação é simplificado, a vida útil estimada será mais precisa quanto maior for a disponibilidade de fontes de dados confiáveis que fornecam valores específicos sobre a durabilidade do material e vida útil do sistema sob determinadas condições. Nas tabelas 5 a 10, faixas de variação de 10% foram estabelecidas para as condições inferior (0,90), normal (1,00) e superior (1,10), visto que o principal objetivo era a construção dos condicionantes que podem influenciar a vida útil dos concretos permeáveis moldados *in loco* aplicáveis em pavimentos de estacionamento com tráfego leve e sistema de drenagem sem infiltração no solo, em que toda a água que infiltra no pavimento é coletada e escoada para um sistema de drenagem. Uma vez definidos os condicionantes, as faixas de variação sugeridas podem ser continuamente refinadas, a partir de novos dados gerados em pesquisas e experiência acumulada para as diferentes regiões geográficas e condições climáticas, o que é uma das principais vantagens do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008).

## 6 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL PELO MÉTODO DOS FATORES DA ISO 15.686-8

Estando definidos os condicionantes e faixas de variação, o próximo passo para aplicação do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) se refere à especificação das condições de uso e referência do pavimento em questão, utilizadas para o cálculo dos fatores ( $\phi$ ) referentes a cada categoria (A à G), como exemplificado anteriormente, na Tabela 2. A Tabela 11 mostra as condições específicas de uso e referência adotadas para o estudo de caso em questão, com base nos dados de dimensionamento, condições de uso, e programação de serviços de manutenção ao longo da vida útil do pavimento permeável. Os valores de referência correspondem à condição considerada na definição da RSL, podendo dentro da faixa de variação, ser especificado como normal (N), inferior (I) ou superior (S). Neste estudo de caso a RSL foi definida considerando a condição de referência normal para todos os condicionantes. A condição de uso é aquela em que o estudo de caso se enquadra e, da mesma forma, pode ser especificada como normal (N), inferior (I) ou superior (S). Para a categoria manutenção, a condição de uso foi considerada sempre como inferior (I).

**Tabela 11. Condições específicas em uso e determinação dos fatores.**

Fator	Categoria	Condicionantes			$\Phi$ <small>CONDICÃO EM USO CONDICÃO DE REFERÊNCIA</small>
			uso	referência	
A	Material	A1. Dosagem do concreto permeável	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		A2. Relação água/cimento da mistura	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		A3. Porosidade da mistura	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		A4. Percentagem de vazios interconectados da mistura*	I	N	0,90//1,00 = 0,90
		A5. Resistência ao desgaste da mistura*	I	N	0,90//1,00 = 0,90
		A6. Resistência à compressão da mistura	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		A7. Agregado reciclado - Granulometria	I	N	0,90//1,00 = 0,90
		A8. Agregado reciclado - Compensação da absorção	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		A9. Agregado reciclado - Composição	N	N	0,90//1,00 = 0,90
		A10. Utilização de fibras sintéticas	I	N	0,90//1,00 = 0,90
B	Nível de projeto	B1. Especificações de projeto	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		B2. Período de retorno da precipitação e duração mínima	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		B3. Elevação do pavimento	I	N	0,90//1,00 = 0,90
		B4. Sistema de drenagem	S	N	1,10//1,00 = 1,10
		B5. Águas pluviais de pavimentos convencionais adjacentes	S	N	1,10//1,00 = 1,10
C	Execução	C1. Serviço de execução	I	N	0,90//1,00 = 0,90
		C2. Medição do coeficiente de permeabilidade do pavimento recém-construído	S	N	1,10//1,00 = 1,10
		C3. Realização de ensaios adicionais para aceitação após instalação do pavimento	N	N	1,0//1,00 = 1,00
D	Ambiente interno	Não aplicável	-	-	-
E	Ambiente externo	E1. Ciclos de congelamento descongelamento	N	N	1,00//1,00 = 1,00
		E2. Condições do solo no entorno do projeto	S	N	1,10//1,00 = 1,10
F	Uso	F1. Série histórica, chuva de projeto, período de retorno	I	N	0,90//1,00 = 0,90
		F2. Tipo e quantidade de veículos	N	N	1,00//1,00 = 1,00

**Tabela 11. Condições específicas em uso e determinação dos fatores.(continuação)...**

G	Manutenção	IG1. Inspeção para verificação do coeficiente de permeabilidade	I	N	0,90/1,00 = 0,90
		G2. Inspeção para verificação do excesso de águas não pluviais e realização de desvio de fluxo	I	N	0,90/1,00 = 0,90
		G3. Inspeção para verificação de defeitos estruturais (fissuras, deterioração da superfície e perda de capacidade de suporte do subleito)	I	N	0,90/1,00 = 0,90
		G4. Manutenção de rotina com varrição manual e aspiração)	I	N	0,90/1,00 = 0,90
		G5. Manutenção preventiva - Limpeza superficial com varredores mecanizados	I	N	0,90/1,00 = 0,90
		G6. Manutenção corretiva - Limpeza profunda com jato d'água sob pressão e/ou equipamento de sucção.	I	N	0,90/1,00 = 0,90

\* condição de uso definida como inferior uma vez que não foi verificado

Construídos os condicionantes e faixas de variação, passa-se para a definição da RSL. Para este estudo de caso, uma RSL de  $25 \pm 5$  anos foi assumida, com base nos resultados (entre 20 e 30 anos) dos estudos apresentados na sessão 4 deste artigo. A RSL também pode ser derivada de modelagem, ensaios acelerados, dados obtidos a partir de informações fornecidas pelo fabricante ou de exigências normativas, além de abordagem probabilística. Outra possibilidade seria utilizar os procedimentos descritos na ISO 15.686-2 (ISO, 2012) para facilitar a determinação da RSL com base no desempenho técnico e funcional.

Os condicionantes apresentados nas Tabelas 5 a 10 funcionam como subfatores que modificam a ESL estimada pela Equação 1. Os fatores de multiplicação ( $\phi$ ) mostrados na Tabela 11 ponderam a influência de cada subfator na perda de desempenho do pavimento de concreto permeável. Assim, os termos  $\phi_A$  a  $\phi_G$  da Equação 1 podem ser determinados como mostrado na Equação 6 para o  $\phi_A$ , em que  $x$  e  $y$  representam, respectivamente, o número ocorrencia dos fatores de multiplicação 1,10 e 0,90, dentro de cada categoria.

Assim, levando em conta a vida útil de referência assumida como  $25 \pm 5$  anos e os dados da Tabela 11 podemos estimar a ESL pela Equação 1 (Tabela 12). Para cada ESL estimada deve também ser estimado um intervalo de confiança. O intervalo de confiança para cada fator ( $\Phi$  da Tabela 11) pode ser assumido, por exemplo, como  $\pm 10\%$  do respectivo valor. Outra possibilidade seria assumir o intervalo de confiança como  $\pm 50\%$  do desvio da unidade. Neste caso, fatores 1,10 e 0,90 teriam intervalo de confiança  $\pm 0,05$ , enquanto o fator 1,00 tem intervalo de confiança nulo. Estas duas possibilidades (não exaustivas) são apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12. Estimativa da ESL.**

Estimativa da ESL							
$t_{RSL}$	$\Phi A$	$\Phi B$	$\Phi C$	$\Phi D$	$\Phi E$	$\Phi F$	$\Phi G$
25	$1,10^0 * 0,90^5$	$1,10^2 * 0,90^1$	$1,10^1 * 0,90^1$	$1,10^0 * 0,90^0$	$1,10^1 * 0,90^0$	$1,10^0 * 0,90^1$	$1,10^0 * 0,90^6$
$t_{ESL} = 8 \text{ anos}^*$							
$\left( \frac{\Delta t_{RSL}}{t_{RSL}} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset A}{\emptyset A} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset B}{\emptyset B} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset C}{\emptyset C} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset D}{\emptyset D} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset E}{\emptyset E} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset F}{\emptyset F} \right)^2$	$\left( \frac{\Delta \emptyset G}{\emptyset G} \right)^2$
$\left( \frac{5}{25} \right)^2$	$(0,10)^2$	$(0,10)^2$	$(0,10)^2$	$(0,10)^2$	$(0,10)^2$	$(0,10)^2$	$(0,10)^2$
$\left( \frac{5}{25} \right)^2$	$\left( \frac{0,205}{0,59} \right)^2$	$\left( \frac{0,045}{1,09} \right)^2$	$\left( \frac{0,045}{0,99} \right)^2$	0	$\left( \frac{0,050}{1,10} \right)^2$	$\left( \frac{0,050}{0,90} \right)^2$	$\left( \frac{0,235}{0,53} \right)^2$
$\Delta t_{ESL} = 3 \text{ anos}^{**}$							
$\Delta t_{ESL} = 1 \text{ anos}^{***}$							
$ESL = 8 \pm 3 \text{ anos}^{**}$							
$ESL = 8 \pm 1 \text{ anos}^{***}$							

\* Equação 1; \*\* Equação 2 com Df  $\pm 10\%$  do respectivo valor; \*\*\* Equação 2 com Df  $\pm 50\%$  do desvio da unidade.

Nota-se, na simulação apresentada na Tabela 12, que as condições de uso e referência deste estudo de caso resultam em uma diminuição considerável na vida útil do pavimento permeável. Fica evidente a relevância das categorias relacionadas aos materiais (A) e serviços de manutenção (G) na vida útil dos concretos permeáveis aplicados a pavimentos de estacionamentos, dado o número de condicionantes. Para este estudo de caso, condições de uso e referência normais para os serviços de manutenção, mantendo as demais inalteradas, resultariam em uma ESL de 15 anos. O mapeamento da vida útil dos concretos permeáveis aplicados a pavimentos de estacionamentos, realizado através da identificação dos condicionantes críticos para as condições de uso e referência, ajuda o projetista e o gestor traçarem estratégias de gerenciamento do ciclo de vida do pavimento.

Obviamente que julgamento técnico e criticidade devem ser exercidos na previsão da vida útil pelo método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008), com atenção especial às condições de uso e referência e aos valores adotados para as faixas de variação, que devem ser continuamente aprimoradas de acordo com a disponibilidade de modelos preditivos, experiência adquirida, ensaios acelerados, e exigências normativas. Na medida em que mais especificidades forem consideradas, mais precisos serão os resultados, mas também mais informações sobre materiais ou componentes serão necessárias. Entretanto, estudos prévios mostram que é necessário ter procedimentos simples para seleção de valores para os fatores (Hovde, 2005). Finalmente, como frisado ao longo do texto, o método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) não tem a pretensão de fornecer uma garantia de vida útil, mas sim de estimar uma provável vida útil a partir de informações disponíveis.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresenta o desenvolvimento de parâmetros norteadores para aplicação do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) através da proposição de condicionantes críticos com potencial de influenciar a vida útil dos concretos permeáveis aplicáveis em pavimentos de estacionamentos.

O método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) se mostrou uma ferramenta promissora para estimativa de vida útil, mas ainda demanda esforços no estabelecimento de vida útil de referência e o desenvolvimento de condicionantes específicos que abordem o máximo possível de aspectos que possam afetar o desempenho do sistema analisado.

Embora conceitualmente robusto, a aplicação do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) depende de definições específicas do projeto, o abre certo espaço para incertezas. A construção dos condicionantes demonstrou a necessidade de desenvolvimento de modelos de desempenho e curvas de degradação, além de esforços conjuntos para estabelecer bases de dados para a determinação da vida útil de referência de pavimentos de concreto permeável, bem como uma faixa apropriada de valores para os diferentes fatores. A validação dos condicionantes e faixas de variação é um desafio que demanda investigações futuras.

O entendimento de como cada fator influencia a vida útil dos pavimentos em concreto permeável é um caminho para fomentar estudos futuros sobre o uso dos pavimentos de concreto permeável, considerando a necessidade urgente de utilização de sistemas drenagem urbana sustentáveis.

A utilização do método dos fatores da ISO 15.686-8 (ISO, 2008) pode ser um incentivo para que agências públicas, instituições de ensino, ou mesmo operadores privados, estabeleçam sistemas de gerenciamento do ciclo de vida de pavimentos. Entretanto, recomenda-se que para utilização do método sejam documentadas condições locais de exposição e desempenho do pavimento permeável em utilização, bem como a utilização do método como ferramenta de apoio e planejamento, não como previsão absoluta.

## 8. REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI PRC 522-23:** Pervious Concrete—Report. Farmington Hills: ACI, 2023.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI SPEC-522.1-20:** Specification for Construction of Pervious Concrete Pavement. Farmington Hills: ACI, 2020.
- AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **PerviousPave - Background, Purpose, Assumptions and Equations.** Rosemont: ACPA, 2025.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C944/C944M-19:** Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. Pennsylvania: ASTM, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9.778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9.833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.142:** Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.292:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.116:** Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.416:** Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P98-254-2:** Mesure de pro priétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés Partie 2: Détermination du pourcentage de vides communicants des matériaux liés. Paris: AFNOR, 1993.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de Concreto Permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente.** São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 jan. 2007.

CARLS, B. **Efeito do uso sobre as características físico-mecânicas e térmicas de revestimentos de concreto permeável para pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2022.

CARMO, J. L.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R. Recycling construction and demolition waste as aggregate in porous asphalt pavement for urban stormwater management. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 10, p. 1-13, 2022.

CLAUDINO, G. O.; RODRIGUES, G. G. O.; ROHDEN, A. B.; MESQUITA, E. F. T.; GARCEZ, M. R. Mix design for pervious concrete based on the optimization of cement paste and granular skeleton to balance mechanical strength and permeability. **Construction and Building Materials**, v. 347, p. 128620, 2022.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

DAVIES, H.; WYATT, D. Appropriate use of the ISO 15.686-1 factor method for durability and service life prediction. In: 10DBMC INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 10., 2005, Lyon. **Anais [...]**. Lyon: CSTB. p. 1-10.

DIEZ, M. E. Low Impact Development Practices: a review of current research and recommendations for future directions. **Water Air and Soil Pollution**, v. 186, p. 351-363, 2007.

EMIDIO, F.; BRITO, J.; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Application of the factor method to the estimation of the service life of natural stone cladding. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 484-493, 2014.

FROHLICH, N. S. **Sistema de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) versus o Convencional (SUDC).** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo-Sul Catarinense, Recife, 2019.

GE, N.; LI, H.; YANG, B.; FU, K.; YU, B.; ZHU, Y. Mechanical responses analysis and modulus inverse calculation of permeable asphalt pavement under dynamic load. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 11, n. 2, p. 243-254, 2022.

GUO, L.; GUAN, Z.; GUO, L.; SHEN, W.; XUE, Z.; CHEN, P. Effects of recycled aggregate content on pervious concrete performance. **Journal of Renewable Materials**, n. 8, v.12, p. 1711–27, 2020.

JARDIM, A.; SILVA, A.; BRITO, J. Application of the factor method to the service life prediction of architectural concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, V.46, P. 1054-1062, 2019.

HONG, Y. M. The simplified design method of permeable pavement system for urban catchment. **Environmental Challenges**, v. 2, p. 100014, 2021.

HOVDE, P. J. The Factor Method – a simple tool to service life estimation. In: 10DBMC INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 10., 2005, Lyon. **Anais [...]**. Lyon: CSTB. p. 1-8.

HUNT, W. F.; COLLINS, E. Z. NC State University Permeable Pavement Research and Changes to the State of NC Runoff Credit System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 8., 2006, **Anais [...]**. San Francisco: ICPI. p. 1-8.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15.686-1:** Buildings and constructed assets — Service life planning – Part 1: General principles and framework. London, ISO, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15.686-2:** Buildings and constructed assets — Service life planning - Part 2: Service life prediction procedures. London, ISO, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15.686-8:** Buildings and constructed assets — Service-life planning - Part 8: Reference service life and service-life estimation. London, ISO, 2008.

KOHOHISHI, M. Hydraulic conductivity and water level in the reservoir layer of porous pavement considering gradation of aggregate and compaction level. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 27–44, 2019.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIU, J.; LI, H.; WANG, Y.; ZHANG, H. Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 85, p. 102381, 2020.

MAIA, M.; MORAIS, R.; SILVA, A. Application of the factor method to the service life prediction of window frames. **Engineering Failure Analysis**, v.109, p. 104245, 2020.

MARCHIONI, M.; BECCIU, G. **Permeable pavement used on sustainable drainage systems (SUDs): A synthetic review of recent literature.** Southampton, UK: WIT Transactions on the Built Environment, 2014. 11 p.

MIKAMI, R. J.; KRUGER, P.; PEREIRA, E., KUMMER, A. C. B.; DÖLL, M. M. R. Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável. **Matéria**, n. 23, v. 3, p. e-12163, 2018.

MINERVINNO, A. C.; DUARTE, E. C. Danos materiais causados à Saúde Pública e à sociedade decorrentes de inundações e enxurradas no Brasil, 2010-2014: dados originados dos sistemas de informação global e nacional. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n. 3, p. 685-694, 2016.

NGUYEN, D.H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction Building Materials**. v. 73, p. 271–282, 2014.

NRMCA. **Pervious Concrete Pavement Maintenance and Operations Guide.** Alexandria: National Ready Mixed Concrete Association, 2015. 375 p.

OLIVEIRA, L. **Dimensionamento e análise de desempenho hidráulico de estacionamentos com drenagem convencional e pavimento permeável, apoiado por modelagem computacional.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PEZZANITI, D.; BEECHAM, S.; KANDASAMY, J. Influence of clogging on the effective life of permeable pavements. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management**. v. 162, n. 3, p. 211–220, 2009.

POULIKAKOS, L. D.; PITTEL, M.; ARNAUD, L.; JUNOD, A.; GUBLER, R.; SIMOND, E.; PARTL, M.; DUMONT, A.-G. **Mechanical properties of porous asphalt, recommendations for standardization.** Lausanne, Switzerland: EMPA, EPFL, LAVOC, 2006. 110 p.

PRATT C. J.; MANTLE J. D. G.; SCHOFIELD P. A. UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. NOVATECH 95 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN STORM DRAINAGE, 2., 1995., **Anais [...].** Lyon: GRAIE. p. 337–344

SILVA, A.; PRIETO, A. J. Modelling the service life of timber claddings using the factor method. **Journal of Building Engineering**, v. 37, p. 102137, 2021.

SINGH, A.; SAMPATH, P. V.; BILIGIRI, K. P. Field performance monitoring of pervious concrete pavements. **Road Materials and Pavement Design**. n. 24, v. 12, p. 3013–3028, 2023.

STRIEDER, H. L. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto em concreto permeável para pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

TUCCI, E. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2020.

TURCO, M.; KODEOVÁ, R.; BRUNETTI, G.; NIKODEM, A.; FÉR, M.; PIRO, P. Unsaturated hydraulic behaviour of a permeable pavement: Laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model. **Journal of Hydrology**. v. 554, p. 780–791, 2017.

WANG, S.; ZHANG, G.; WANG, B.; MU, M. Mechanical strengths and durability properties of pervious concretes with blended steel slag and natural aggregate. **Journal of Cleaner production**. n. 272., p. 122590, 2020.

WOODS BALLARD, B.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, H.; ILLMAN, S.; SCOTT, T.; ASHLEY, R.; KELLAGHER, R. **The SuDS Manual (C753F)**. London, UK: Construction Industry Research and Information Association, 2015. 964 p.

XAVIER, L.L.S.; ROHDEN, A.B.; MESQUITA, E.F.T; STRIEDER, H. L.; GARCEZ, M R. The Influence of Granulometric Composition and Superplasticizer on the Pervious Concrete Paste-Thickness-Based Approach. **International Journal of Pavement Research and Technology**, p. 1-13, 2023.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K.D. New approach to proportion pervious concrete, **Construction and Building Materials**. v. 62, p. 38–46, 2014.

YU, F.; SUN, D.; SUN, G.; LING, S.; HU, M.; MA, J. A modified mix design method for pervious concrete based on Mohr-Coulomb failure criterion. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121801, 2021.

ZHANG, Q.; FENG, X.; CHEN, X.; LU, K. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**, v. 259 p. 119776, 2020.

ZHU, D. Z.; YU, T.; LIU, T.; ZHOU, Y. Sustainable urban drainage: Current interests and future needs. **Journal of Hydro environment Research**, v. 38, p.1-3, 2021.