

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL FILTRADA EM UM PAVIMENTO PERMEÁVEL

Lucas Niehuns Antunes⁽¹⁾

Possui graduação (2018) e mestrado (2020) em Engenharia Civil pela UFSC. Atualmente é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC.

Enedir Ghisi⁽²⁾

Possui graduação (1995) e mestrado (1997) em Engenharia Civil pela UFSC e doutorado em Engenharia Civil - University of Leeds (2002). Atualmente é professor associado III da Universidade Federal de Santa Catarina.

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima - Trindade - Florianópolis - Santa Catarina - CEP: 88040-900 - Brasil - Tel: +55 (48) 3721-2115 - Fax: +55 (48) 3721-5191 - e-mail: lucas_niehuns@hotmail.com.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar e comparar ambientalmente, por meio da avaliação do ciclo de vida, dois sistemas de drenagem para um estacionamento. O primeiro sistema é composto por um pavimento permeável que filtra água pluvial para ser utilizada em usos não potáveis na edificação. O segundo sistema é composto por um pavimento flexível (impermeável), sem o aproveitamento da água pluvial escoada e com abastecimento convencional de água na edificação. No inventário foram quantificados os dados de entrada e saída relacionados às fases do ciclo de vida dos sistemas. Na avaliação de impacto, os dados foram transformados em potenciais impactos ambientais. Verificou-se que os danos mais significativos estavam relacionados às fases de implantação e final de vida. O cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial obteve menor potencial de impacto ambiental na maioria das categorias avaliadas. Obteve-se 69,6% de economia de água potável, 8,9% de economia de energia elétrica na fase de operação e redução de 48,2% nas emissões de CO₂ equivalente. Os resultados desta pesquisa servem como base para guiar o planejamento e tomada de decisões a fim de melhorar o manejo das infraestruturas hídricas por meio do aproveitamento de água pluvial nos centros urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos permeáveis, Água pluvial, Ciclo de vida

1. INTRODUÇÃO

O aumento na frequência de inundações em centros urbanos relacionado ao aumento das superfícies impermeáveis mostra a inadequação de sistemas urbanos de drenagem tradicionais. Espera-se que a frequência de eventos de chuva de grande intensidade e curta duração aumente nas próximas décadas, como consequência das mudanças climáticas (Wasko; Sharma, 2015). Esse aumento no número de inundações mostra que é necessária a utilização de novos sistemas de drenagem urbana, capazes de restaurar o ciclo hidrológico natural e que permitam um aumento na capacidade de evapotranspiração e infiltração. Os pavimentos permeáveis são exemplos de sistemas que cumprem essa função (Pagotto et al., 2000).

Pavimentos permeáveis são considerados sistemas de drenagem sustentáveis, pois são pavimentos que atendem simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e ao mesmo tempo permitem a percolação e o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial (ABNT, 2015). Vários estudos mostram os benefícios do uso de pavimentos permeáveis. Eles podem diminuir a quantidade de escoamento de águas pluviais e melhorar a qualidade da água em relação ao total de sólidos suspensos, fósforo, nitrogênio e metais (Antunes et al., 2016; Brattebo; Booth, 2003; Pagotto et al., 2000). Além disso, os problemas de ruído do tráfego e do efeito da ilha de calor podem ser atenuados (Yong et al., 2013).

Segundo Wang et al. (2018), existe a necessidade de se dispor de metodologia capaz de fornecer uma estimativa precisa da sustentabilidade dos sistemas de drenagem. De fato, essa avaliação não pode estar vinculada apenas a benefícios ambientais relacionados à vida útil, mas são necessárias avaliações nas etapas que as precedem e seguem. Um método válido para a verificação da sustentabilidade ambiental de um produto ou sistema é a Avaliação do Ciclo

de Vida (ACV). A ACV apresenta uma oportunidade para analisar e comparar projetos e escolher os sistemas de drenagem mais apropriados, quantificando uma variedade de impactos e benefícios ambientais. A ACV tem sido efetivamente aplicada para avaliar o desempenho ambiental da infraestrutura hídrica, incluindo os impactos ambientais associados à construção, manutenção e descarte de várias tecnologias de infraestrutura verde, tais como os pavimentos permeáveis (Wang et al., 2013).

Sousa et al. (2012) avaliaram o desempenho ambiental de infraestruturas verdes (pavimentos permeáveis e bacias de biorretenção) comparando-o a cenários de retenção e tratamento de água utilizando sistemas de drenagem tradicionais (infraestrutura cinza). Os resultados mostraram que as infraestruturas verdes emitiram de 75 a 95% menos gases de efeito estufa devido, principalmente, ao menor uso de energia elétrica durante o ciclo de vida. Wang et al. (2018) mostraram, por meio de um estudo de caso na China, que 73,5% do consumo de energia, 46,7% das emissões de gases de efeito estufa, 98,3% das emissões de chumbo e 99,7% das emissões de zinco poderiam ser evitadas utilizando pavimento permeável no lugar do pavimento convencional.

Os estudos de ACV são importantes para guiar o planejamento de sistemas de drenagem urbana. Tais estudos auxiliam na tomada de decisões quando se consideram múltiplos objetivos, como o aumento de recursos hídricos e a redução de desastres naturais e impactos ambientais (Antunes et al., 2018). Dessa forma, este trabalho pretende avaliar o ciclo de vida de um sistema de pavimento permeável, com posterior aproveitamento da água pluvial infiltrada, comparando o desempenho ambiental deste com um sistema de drenagem tradicional. O estudo visa fornecer instruções científicas para a escolha de sistemas de drenagem mais sustentáveis e, assim, melhorar o manejo sustentável das águas pluviais nos centros urbanos.

2. MÉTODO

No primeiro cenário, considera-se a instalação de um pavimento permeável no estacionamento de uma edificação; a água pluvial filtrada pelo pavimento é usada para fins não potáveis na edificação (Figura 1). No segundo cenário, para a mesma edificação e estacionamento, é considerado um sistema de drenagem tradicional, ou seja, pavimento convencional no estacionamento, sem uso de água pluvial, e todos os usos de água da edificação fornecidos pela concessionária de água (Figura 2). Assim, foram comparados os efeitos ambientais de cada categoria de impacto acumulada ao longo do ciclo de vida dos cenários mencionados. A Figura 3 mostra o fluxograma do método proposto no estudo.

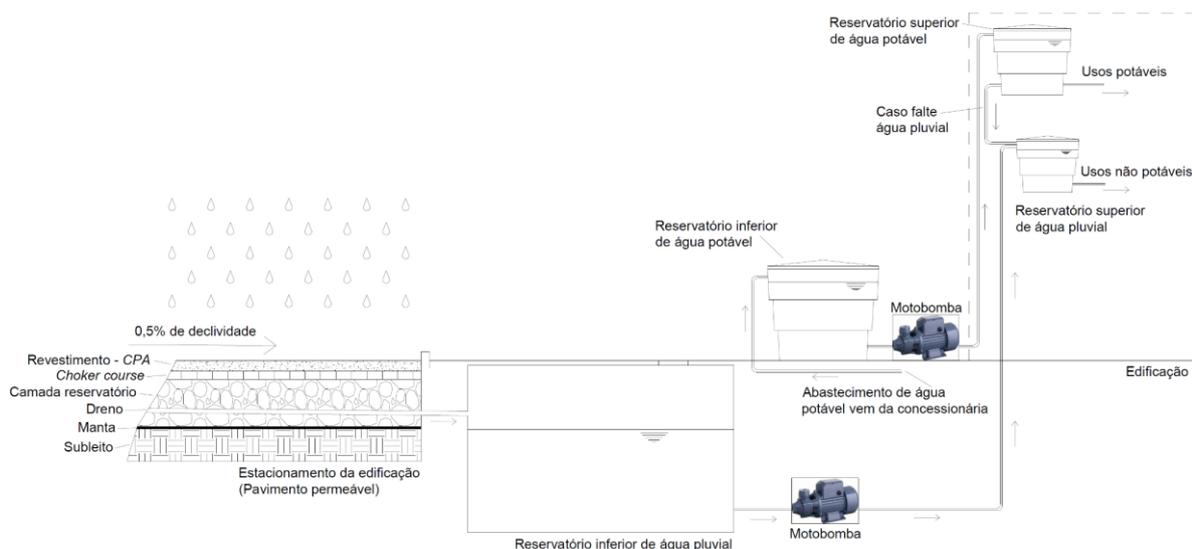


Figura 1. Esquema de funcionamento do Cenário 1 - Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial.

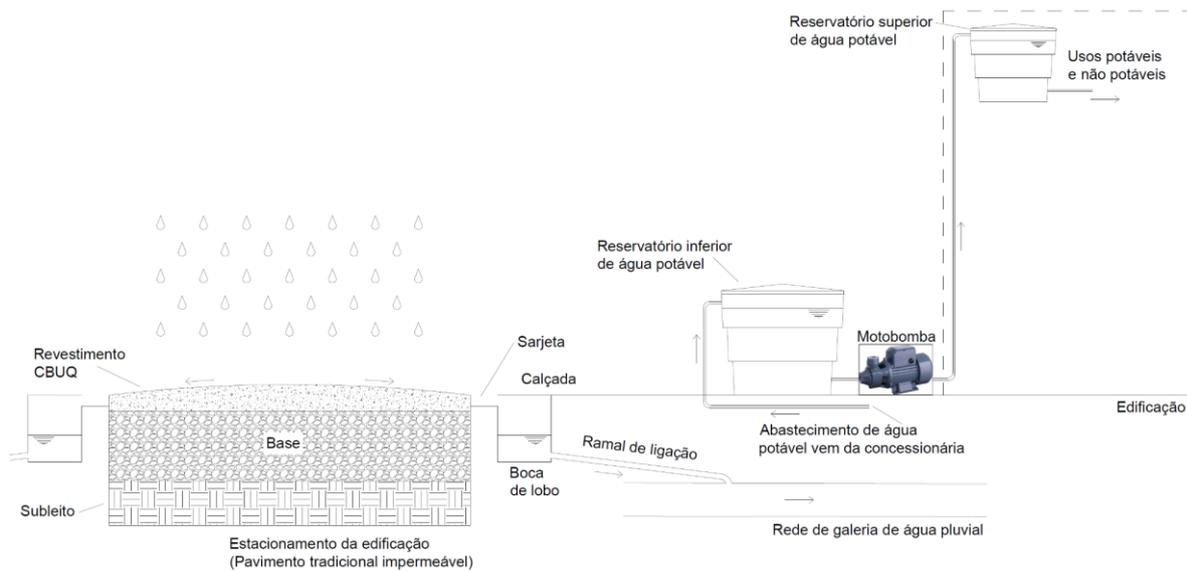


Figura 2. Esquema de funcionamento do Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento de água convencionais.

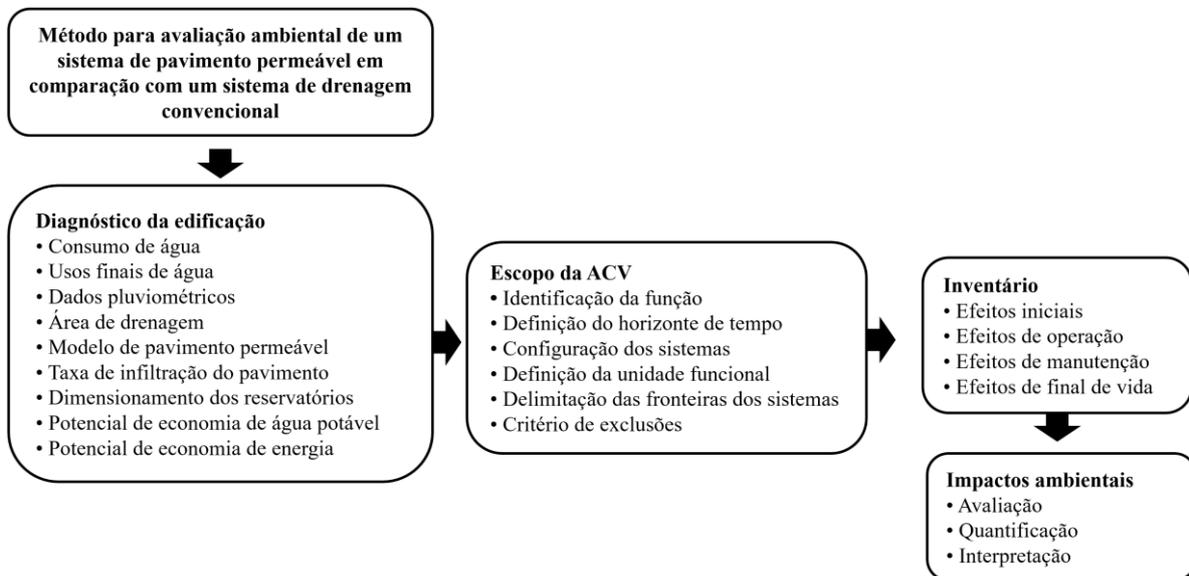


Figura 3. Fluxograma do método proposto.

2.1. Área de estudo

Uma edificação pública (Epagri) e seu estacionamento (Figura 4), localizados na cidade de Florianópolis, foram considerados para a análise. A edificação é composta por dois blocos de dois andares, com uma área total de 8.025 m² e uma população de 271 pessoas.



Figura 4. Foto aérea da edificação e do estacionamento da Epagri.

2.2. Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial

2.2.1. Modelo de pavimento permeável

O modelo de pavimento permeável adotado no estudo foi o proposto por Hammes et al. (2018). O modelo em questão é do tipo sem infiltração no subleito, constituído por uma camada de revestimento de concreto asfáltico drenante (CPA), uma camada denominada *choker course* e uma camada reservatório, além da membrana impermeável, que tem como função impedir que a água passe da estrutura do pavimento para o subleito. A Figura 5 ilustra o modelo de pavimento permeável adotado.

A camada de revestimento (CPA) tem espessura de 5 cm e é composta por agregados de 4,8 a 9,5 mm (brita zero) e pó de pedra. A mistura contém 5% de ligante modificado por borracha moída de pneus. O percentual de infiltração do pavimento é de 80%, conforme mostrou o resultado do estudo de Hammes et al. (2018). Dessa forma, a taxa de aproveitamento utilizada nas simulações do potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial foi igual a 0,8.

A camada *choker course* tem espessura de 3 cm e é composta por agregados graníticos de 19 mm (brita 3/4"). A camada reservatório, por sua vez, é composta por brita nº 3 (37,5 mm) e sua espessura deve ser dimensionada de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015). A porosidade da camada reservatório não foi testada empiricamente no estudo de Hammes et al. (2018), sendo o valor citado no estudo uma estimativa de acordo com a revisão bibliográfica do assunto, que indica a possibilidade de valores entre 25% e 40%.

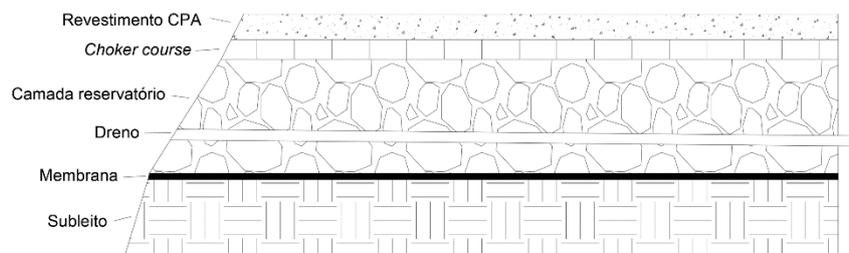


Figura 5. Modelo de pavimento permeável adotado.

2.2.2. Potencial de economia de água potável

Para determinar o potencial de economia de água potável na edificação por meio do aproveitamento de água pluvial captada do pavimento permeável, considerou-se que a água pluvial seria usada para usos não potáveis, como descarga de vasos sanitários e mictórios, limpeza de áreas externas e rega de jardins. O programa

computacional Netuno, versão 4, foi utilizado para avaliar o potencial de economia de água potável para diferentes capacidades de reservatórios (Ghisi; Cordova, 2014). O programa foi validado por Rocha (2009).

Os dados de entrada para as simulações são a precipitação em base diária, a área da superfície do pavimento permeável, a demanda média diária de água potável na edificação, a demanda de água pluvial (como uma porcentagem da demanda total de água) e a taxa de infiltração do pavimento. Foram feitas simulações para diferentes capacidades de reservatório. A capacidade máxima do reservatório avaliada foi de 100.000 litros e o intervalo entre cada capacidade foi de 5.000 litros. Decidiu-se indicar a capacidade ideal do reservatório por meio da diferença entre potenciais de economia de água potável. Tal escolha fica a critério do projetista. A diferença escolhida foi de 0,5%/m³.

Os dados de precipitação de Florianópolis foram obtidos no site HidroWeb, da Agência Nacional de Águas. Assim, a precipitação diária durante um período de 16 anos (1 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2017) foi usada nas simulações. A taxa de infiltração é igual a 80%, resultado encontrado no modelo de pavimento permeável testado por Hammes et al. (2018). Os dados sobre os usos finais da água foram obtidos de um estudo realizado na mesma edificação por Kammers e Ghisi (2005). Como nosso estudo não tem como objetivo realizar estudos adicionais relacionados aos usos finais de água, assumiu-se que a pesquisa realizada por Kammers e Ghisi (2005) ainda é representativa dos usos finais, uma vez que não foram feitas modificações consideráveis na edificação. A demanda por água pluvial é igual a 82,0% da demanda total de água.

Os dados de saída utilizados no trabalho são o potencial de economia de água potável para diferentes capacidades de reservatório, consumo de água pluvial e volume de água pluvial extravasada.

2.2.3. Potencial de economia de energia

Foi estimado o potencial de economia de energia que poderia ser gerado através do sistema implantado. Esta economia seria gerada através da redução de energia utilizada no tratamento e abastecimento de água potável, que seria substituída por água pluvial em usos não potáveis. Tal economia traria benefícios financeiros à concessionária do município, além de ser estratégia para reduzir a demanda imposta ao sistema energético regional. O potencial de economia de energia foi calculado por meio da equação (1). A quantidade de energia consumida pelo sistema de tratamento e distribuição de água do município foi estimada através de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2018).

$$EE = CA_p \times E_c \quad \text{equação (1)}$$

Onde: EE é o potencial de economia de energia elétrica (kWh/dia); CA_p é o consumo diário de água pluvial na edificação (m³/dia); E_c é a energia consumida pelo sistema de tratamento de água do município (kWh/m³).

2.2.4. Dimensionamento hidráulico do pavimento

A espessura da camada reservatório, que serve como reservatório temporário da água pluvial que infiltra no pavimento permeável, foi calculada por meio da equação (2).

$$H_{\text{máx}} = (\Delta Q_c R + P - f T_e) / V_r \quad \text{equação (2)}$$

Onde: H_{máx} é a espessura total da camada reservatório (m); ΔQ_c é a precipitação excedente da área de contribuição para uma dada chuva de projeto (m); R é a relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável (A_c/A_p); A_c é a área de contribuição (m²); A_p é a área de pavimento permeável (m²); P é a precipitação de projeto (m); f é a taxa de infiltração no solo (m/h); T_e é o tempo efetivo de enchimento da camada reservatório, geralmente igual a 2 horas (h); V_r é o índice de vazios da camada (adimensional).

O volume de vazios (V_r) adotado para a camada reservatório foi de 40% (Hammes et al., 2018). Visto que o pavimento permeável utilizado no estudo é do tipo sem infiltração, a taxa de infiltração no solo (f) é considerada igual a zero. Entretanto, deve ser considerada a vazão de esvaziamento da camada reservatório do pavimento para o reservatório propriamente dito. A equação (3) apresenta um método de dimensionamento simplificado para essa vazão de esvaziamento, proposto por Baptista et al. (2011), que supõe que a estrutura de drenagem apresente vazão de saída constante, que pode ser expressa sob a forma de vazão específica. A vazão

de saída constante resulta do volume de água pluvial incidente na área de drenagem dividido por 24 horas de descarga, valor recomendado por Tomaz (2009). A área de drenagem efetiva corresponde à área coberta pelo pavimento permeável.

$$q_s = Q_s/A_a \quad \text{equação (3)}$$

Onde: q_s é a vazão de saída específica (m/h); Q_s é a vazão de saída constante (m³/h); A_a é a área de drenagem efetiva (m²).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) recomenda que o período de retorno da precipitação deve ser no mínimo de dez anos, considerando-se a duração mínima de 60 minutos. Para este estudo foi utilizada a equação de intensidade-duração-frequência (IDF) realizada por Back (2013) proposta para Florianópolis, a partir da série de dados pluviométricos de 1969 a 2009. A equação (4) mostra a equação IDF utilizada. A partir dos cálculos e grandezas expostos nesta seção é possível se obter a espessura mínima da camada reservatório para atender à chuva de projeto.

$$i = (1168,46 \times T^{0,237}) / ((t + 9,12)^{0,703}) \quad \text{equação (4)}$$

Onde: i é a intensidade da chuva (mm/h); T é o período de retorno (anos); t é a duração da chuva (min), sendo que para essa equação $5 \leq t \leq 120$ min.

2.2.5. Tratamento adicional e qualidade da água infiltrada

Atualmente ainda não existem normas reguladoras relacionadas aos parâmetros de qualidade da água pluvial captada por pavimentos permeáveis. A norma NBR 15527 (ABNT, 2019) determina que a qualidade da água pluvial proveniente de coberturas de edificações em áreas urbanas deve atender aos parâmetros contidos na Tabela 1. Esta mesma norma foi utilizada neste estudo, visto que a água pluvial captada pelo pavimento permeável é destinada a usos não potáveis (descarga do vaso sanitário, mictório, limpeza de áreas externas e rega de jardim).

Para este estudo foi considerada a desinfecção por dosagem de cloração, por ser uma das formas de tratamento mais econômicas e com grande facilidade de manutenção. A NBR 15527 indica a possibilidade de instalação de dosador automático de derivado clorado como medida de desinfecção da água pluvial. A norma também recomenda que haja tempo de contato de no mínimo 30 minutos no reservatório superior para tornar o método de tratamento efetivo (ABNT, 2019).

Como a água pluvial é captada por meio do pavimento permeável, não se fará uso de dispositivo de descarte de detritos ou dispositivo de descarte do escoamento inicial, visto que o pavimento permeável tem como característica a remoção de poluentes desde a primeira descarga pluvial (Pagotto et al., 2000; Brattebo; Booth, 2003).

Tabela 1. Parâmetros mínimos de qualidade para usos não potáveis (ABNT, 2019).

Parâmetro	Valor
<i>Escherichia Coli</i>	< 200 / 100 ml
Turbidez	< 5,0 uT
pH	6,0 a 9,0

2.3. Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento convencionais

No segundo cenário, o modelo de pavimento tradicional utilizado no estacionamento em estudo foi do tipo flexível, com utilização de ligante betuminoso na construção do revestimento. Em resumo, o pavimento é constituído por duas camadas: a base (sub-base, reforço) e o revestimento. Dessa forma, os serviços que envolvem a construção do pavimento dito tradicional neste estudo são: terraplenagem, regularização do subleito, compactação da sub-base, base e capa asfáltica (CBUQ). A drenagem da água pluvial nesse cenário é feita por meio gravitacional, através de sarjetas, bocas de lobo e tubulações que encaminham a água escoada pelo pavimento até a rede pluvial do município. O abastecimento de água da edificação para este cenário é do tipo convencional, por meio da concessionária de água do município.

2.4. Comparação dos sistemas por meio da avaliação do ciclo de vida

O processo de comparação dos dois cenários é baseado nos princípios da ACV, seguindo a metodologia proposta pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). As etapas a seguir são contempladas neste trabalho: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto do ciclo de vida; e interpretação.

2.4.1. Objetivo e escopo

O método aplica-se à avaliação do impacto ambiental da implantação de um sistema de pavimento permeável em um estacionamento com aproveitamento da água pluvial infiltrada e captada pelo pavimento em usos não potáveis na edificação em estudo. O método pode ser aplicado em outros tipos de edificações, sendo estas em etapa de projeto ou já construídas, em diferentes cenários e configurações.

2.4.1.1. Identificação da função

A função foi considerada dupla. A primeira função escolhida para a comparação dos dois cenários foi o abastecimento de água na edificação. A segunda função é a drenagem/infiltração de água pluvial que incide no estacionamento. No primeiro cenário (com pavimento permeável), a água usada para usos não potáveis é a água pluvial coletada no pavimento. No segundo cenário (estacionamento com pavimento tradicional e drenagem convencional), todos os usos de água na edificação são provenientes da concessionária, enquanto a água pluvial que incide no estacionamento é drenada para a rede pluvial do município.

2.4.1.2. Horizonte de tempo

Para a avaliação realizada neste estudo, considerou-se um período de 20 anos como horizonte de tempo, como observado em outras pesquisas sobre sistemas hidráulicos (Ribeiro, 2015; Chiu et al., 2009). A substituição de equipamentos e componentes com vida útil menor do que esse horizonte de tempo foi contabilizada na avaliação.

2.4.1.3. Unidade funcional

A unidade funcional escolhida para a comparação entre o pavimento permeável e o pavimento tradicional foi a drenagem da área de estacionamento (em m²) e o suprimento de água (em m³) para a edificação no horizonte de 20 anos.

2.4.1.4. Fronteiras do sistema

Este é um estudo do berço ao túmulo. Assim, a fronteira do sistema compreende a produção de materiais e componentes para os sistemas, incluindo extração de matérias-primas, processamento e transporte; substituição de componentes ao longo da vida útil dos sistemas; uso de energia para operação do sistema; e descarte final dos componentes ao final da vida útil do sistema.

A Figura 6 mostra as fronteiras do sistema com pavimento permeável e as fronteiras do sistema com pavimento tradicional. Em cada fronteira, existem duas funções. A função 1 é relacionada ao suprimento de água na edificação e a função 2 é associada ao tipo de pavimento usado no estacionamento e à drenagem ou infiltração de água pluvial que incide no pavimento. Percebe-se que no cenário com pavimento permeável, há uma conexão entre as duas funções, uma vez que a água pluvial infiltrada no estacionamento é utilizada na edificação. No cenário tradicional, por sua vez, não existe essa conexão, pois a água pluvial é drenada diretamente para a rede pluvial do município.

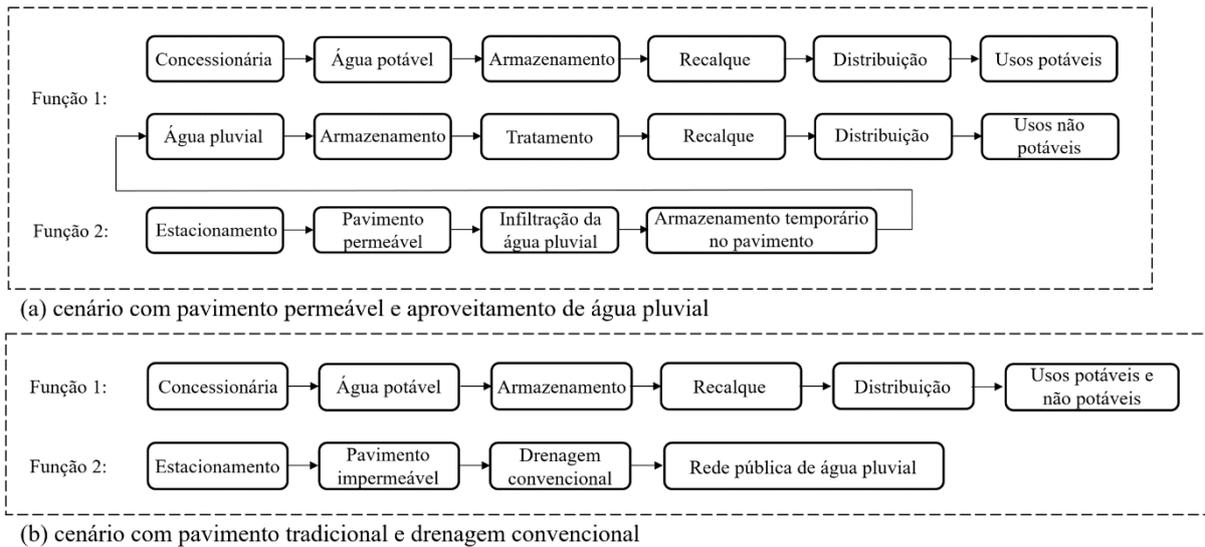


Figura 6. Fronteiras dos cenários.

2.4.1.5. Omissões no estágio do ciclo de vida

Como se trata de uma comparação, todos os processos elementares idênticos nos dois cenários foram omitidos na avaliação do ciclo de vida.

2.4.1.6. Critério de exclusão

Para este trabalho, o critério de exclusão inicial foi de 1% em massa, desde que observada sua relevância ambiental. No entanto, os critérios de corte foram reduzidos para os insumos que não contribuem com mais de 1% da massa, mas produzem impacto ambiental significativo.

2.4.2. Inventário do ciclo de vida

Nesta etapa, todos os dados de entrada e saída dos sistemas estudados nas etapas do ciclo de vida foram compilados e quantificados. A quantificação dos insumos foi realizada com o auxílio do *software SimaPro (PRé Consultants)*, versão 9.0, e do banco de dados *Ecoinvent 3.5*. O *Ecoinvent* possui um inventário de materiais e processos, juntamente com ferramentas de cálculo de impacto ambiental. Dois cenários foram modelados no *software SimaPro*, o "cenário de pavimento permeável" e o "cenário do sistema convencional". A entrada de matérias-primas e energia obtida do banco de dados foi inserida no programa e, como resultado, o programa apresentou *outputs* na forma de emissões no solo, na água e no ar.

Os efeitos ambientais são divididos em efeitos incorporados iniciais, efeitos de operação, efeitos de manutenção e efeitos de final de vida. Os efeitos incorporados iniciais envolvem os materiais utilizados nos sistemas; incluindo fabricação e transporte de componentes. Os efeitos da operação incluem a energia consumida para a operação dos sistemas no horizonte de tempo. Os efeitos de manutenção, por sua vez, envolvem os materiais utilizados na manutenção de sistemas; incluindo a fabricação e transporte de componentes. Os efeitos de final de vida incluem descarte final dos materiais, incluindo o transporte.

2.4.2.1. Vida útil dos componentes do sistema

A vida útil de motobombas, tubulações, conexões e reservatórios de água de PEAD (polietileno de alta densidade) é de 12, 50, 65 anos, respectivamente (Roebuck et al., 2011). A vida útil dos componentes e dispositivos utilizados para melhorar a qualidade da água pluvial variou de 3 a 50 anos, de acordo com as informações fornecidas pelos fabricantes (3P Technik, 2019). O reservatório inferior de água pluvial, feito de concreto armado, bem como a estrutura do sistema de drenagem, tiveram sua vida útil estimada considerando a durabilidade do concreto (BS 7543, 2003). A vida útil dos pavimentos tradicional e permeável foi considerada igual a 20 anos (Mello et al., 2016; Yong et al., 2013).

2.4.2.2. Transporte de materiais e componentes do sistema

As distâncias de transporte entre o local de fabricação dos materiais e componentes do sistema e a edificação em estudo foram determinadas considerando os fabricantes localizados mais próximos à edificação. Os resíduos gerados ao longo do ciclo de vida dos sistemas foram considerados enviados para um aterro ambiental licenciado, exclusivamente para resíduos de construção, localizado a aproximadamente 32 km da edificação.

2.4.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida

Na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida, todas as cargas ambientais do inventário foram associadas e caracterizadas em termos de impactos ambientais para cada categoria de impacto. As categorias de impacto selecionadas para este estudo foram escolhidas por serem as mais utilizadas em pesquisas de ACV na área de pavimentação e sistemas hidráulicos (Wang et al., 2018; Ribeiro, 2015; Sousa et al., 2012). No total, foram selecionadas quinze categorias: aquecimento global, depleção de ozônio na estratosfera, formação de ozônio (saúde humana), formação de partículas finas, formação de ozônio (ecossistemas terrestres), acidificação dos solos, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água potável, ecotoxicidade marinha, toxicidade humana cancerígena, toxicidade humana não cancerígena, uso do solo, depleção de recursos fósseis, depleção de recursos minerais e consumo de água.

Para a relação dos fluxos elementares das categorias selecionadas, foi utilizado o método *ReCiPe*, com perspectiva hierárquica e dados médios de referência global (Huijbregts et al., 2016). Esse método compreende dezoito categorias de impacto *midpoint* e três categorias de impacto *endpoint*. A Tabela 2 mostra as categorias de impacto ambiental do método adotado neste estudo e as unidades correspondentes definidas no programa *SimaPro*, método *ReCiPe* 2016.

Após o estágio de normalização, o método *ReCiPe* agrupa as categorias *midpoint* em três categorias *endpoint*: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos. A categoria saúde humana é expressa como o número de anos perdidos e o número de anos vividos com deficiência. Estes são combinados em uma única unidade: deficiência ajustada de anos de vida (*DALY*), um índice que também é usado pelo Banco Mundial e pela Organização Mundial da Saúde (OMS). A unidade é contabilizada em anos.

A categoria danos aos ecossistemas é expressa como a perda de espécies em uma determinada área, durante um certo período de tempo. A unidade é dada pelo potencial de desaparecimento de espécies pela área (*species.yr*). A categoria danos à disponibilidade de recursos é expressa como custos excedentes da produção futura de recursos em um período infinito (assumindo produção anual constante), considerando uma taxa de desconto de 3% ao ano. A unidade é *USD2013* (dólares americanos, ano de referência 2013). Ressalta-se que a escassez de recursos fósseis não possui um fator constante do ponto médio ao ponto final, mas fatores individuais para cada substância (Huijbregts et al., 2016).

Tabela 2. Categorias de impactos ambientais *midpoint* selecionadas no estudo.

Categorias	Unidade
Aquecimento global / <i>Global warming</i>	kg CO ₂ eq
Depleção de ozônio na estratosfera / <i>Stratospheric ozone depletion</i>	kg CFC-11 eq
Formação de ozônio, Saúde humana / <i>Ozone formation, Human health</i>	kg NO _x eq
Formação de partículas finas / <i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM _{2,5} eq
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres / <i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NO _x eq
Acidificação dos solos / <i>Terrestrial acidification</i>	kg SO ₂ eq
Ecotoxicidade dos solos / <i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade das águas potáveis / <i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade das águas marinhas / <i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana cancerígena / <i>Human carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana não cancerígena / <i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB
Uso do solo / <i>Land use</i>	m ² a eq
Depleção de recursos minerais / <i>Mineral resource scarcity</i>	kg Cu eq
Depleção de recursos fósseis / <i>Fossil resource scarcity</i>	kg oil eq
Consumo de água / <i>Water depletion</i>	m ³

3. RESULTADOS

3.1. Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial

3.1.1. Dados pluviométricos

A Figura 7 apresenta a precipitação mensal média de Florianópolis para o período de 2002 a 2017, com valores máximos e mínimos para cada mês. Percebe-se que há precipitação maior nos meses de verão, sendo a maior média no mês de janeiro (228 mm), enquanto nos meses de inverno a precipitação diminui, tendo a menor média no mês de junho (84 mm). A média de precipitação anual neste período foi igual a 1764 mm.

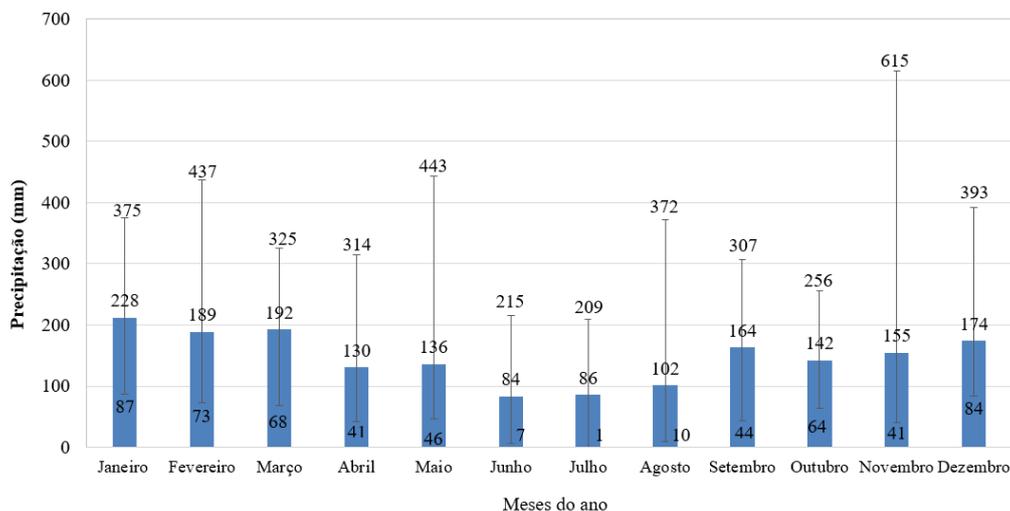


Figura 7. Precipitação mensal média de Florianópolis de 2002 a 2017, com valores máximos e mínimos para cada mês.

3.1.2. Área de captação

A área aproximada estimada para a coleta da água pluvial é de 5.800 m², envolvendo as áreas de calçadas (aproximadamente 350 m² de área de contribuição) e área do estacionamento propriamente dito (aproximadamente 5.450 m²). As calçadas entre as vagas, embora não sejam permeáveis, também contribuem para o escoamento superficial gerado, escoando para o pavimento permeável.

3.1.3. Consumo de água na edificação

Entre 2014 e 2018 foram verificados consumos anuais semelhantes, variando de 2416 a 3002 m³, conforme mostra a Figura 8. A média mensal para o mesmo período foi de 226,68 m³. O mês de janeiro é o que possui a menor média (173 m³), devido principalmente ao período de recesso dos funcionários em parte desse mês.

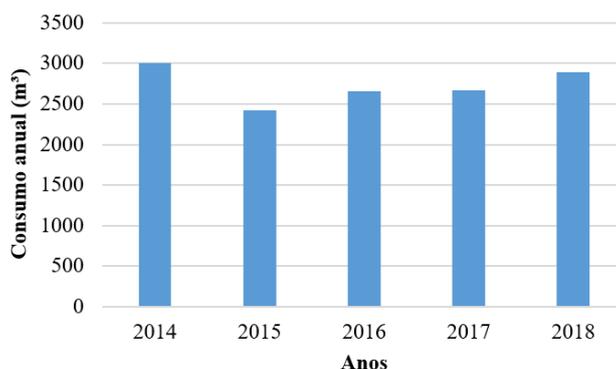


Figura 8. Consumo anual de água na Epagri (2014 a 2018).

3.1.4. Potencial de economia de água potável

A Figura 9 mostra o potencial de economia de água potável conforme a variação do volume do reservatório inferior. Utilizando a diferença entre potenciais de economia de água potável igual a $0,5\%/m^3$, com o auxílio do programa Netuno, foi adotado um volume de reservatório de 50.000 litros. O potencial de economia de água potável alcançado foi de 69,6%, o que representa um consumo médio de água pluvial igual a 5.260 litros/dia. Em relação ao suprimento de água pluvial na edificação, o volume de reservatório adotado atende completamente à demanda de água para fins não potáveis em 83,3% dos dias do ano, parcialmente em 3,2% e não atende em 13,5% dos dias. O volume de água pluvial extravasado diariamente é de 16.864 litros.

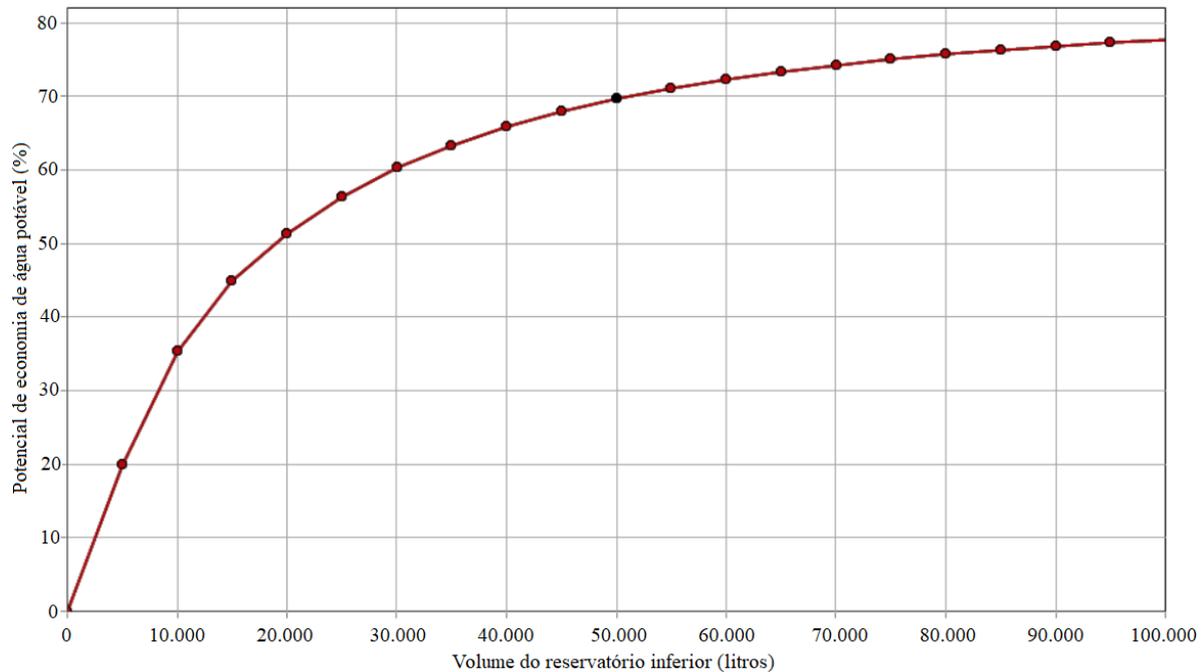


Figura 9. Potencial de economia de água potável na edificação.

Para diminuir a quantidade de água pluvial extravasada, seria possível usar um pavimento permeável com infiltração parcial no solo. Nesse caso, o tipo de solo do subleito e sua permeabilidade devem ser avaliados (Hammes et al., 2018). Outra possibilidade seria o uso de água pluvial em edificações próximas, otimizando o sistema de captação e aproveitamento de água pluvial.

3.1.5. Potencial de economia de energia

A Figura 10 apresenta o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água de Florianópolis no período de 2004 a 2017. O consumo médio foi de $0,39 \text{ kWh}/m^3$. Por meio da equação (1), o potencial de economia de energia do sistema foi estimado em 2,05 kWh/dia. Portanto, a redução do consumo de energia pela concessionária de água seria de 14,77 MWh em 20 anos (vida útil do sistema). No entanto, o sistema de captação de água pluvial requer um consumo de energia devido à motobomba extra usada para recalcar a água pluvial, conforme explicado na seção 3.3.2.

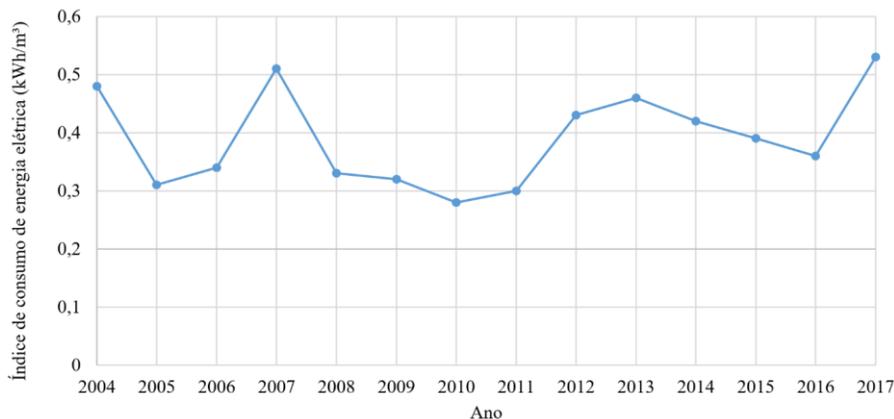


Figura 10. Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água no município de Florianópolis entre 2004 e 2017 (SNIS, 2018).

3.1.6. Dimensionamento hidráulico do pavimento

A espessura da camada reservatório, que serve como reservatório temporário para a infiltração de água no pavimento permeável, foi calculada usando a equação (2). A intensidade média da precipitação de projeto foi calculada usando a equação (4), considerando os valores mínimos recomendados pela NBR 16416 (ABNT, 2015), ou seja, período de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos. Como resultado, foi obtida uma intensidade de precipitação igual a 102,7 mm/h.

O fluxo de saída constante (Q_s) é de 24,81 m³/h, o que corresponde à descarga de 595,39 m³ de água pluvial em 24 h. O volume de água pluvial foi calculado multiplicando a intensidade da precipitação (102,7 mm/h) pela área de drenagem (5.800 m²). A área efetiva de drenagem (A_a) é de 5.450 m², conforme visto na seção 3.1.2. Assim, por meio da equação (3), o fluxo de saída específico (q_s) é de 4,55 mm/h. R, a relação entre a área de contribuição (5.800 m²) e a área permeável do pavimento (5.450 m²), é igual a 1,06. Como mencionado anteriormente, o volume de vazios (V_v) é de 40% (Hammes et al., 2018). Por meio da equação (2), a espessura da camada reservatório calculada foi de 26,2 cm. A Figura 11 ilustra o dimensionamento final obtido para o pavimento permeável deste estudo.

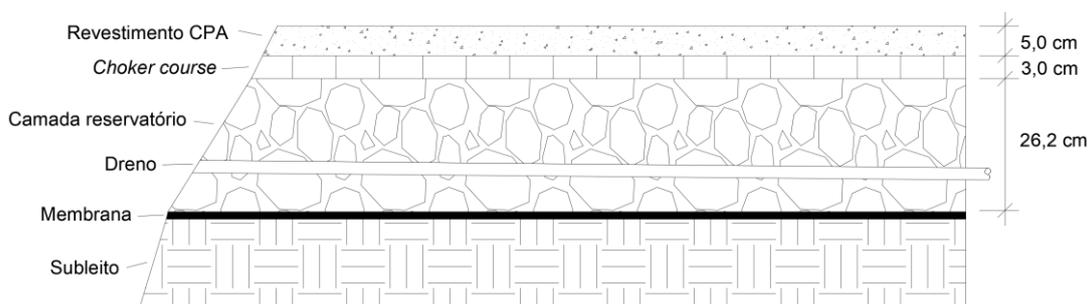


Figura 11. Espessuras das camadas do pavimento permeável.

3.2. Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento convencionais

O segundo cenário considera um modelo tradicional de pavimento, com drenagem convencional e, portanto, sem uso de água pluvial na edificação. O tráfego esperado para o estacionamento é leve. Portanto, foram adotados base de 15 cm e revestimento de 3 cm. O valor mínimo adotado para o CBR (Índice de Suporte Califórnia) do subleito foi de 8%. Quanto às obras de terraplenagem, os serviços preservam uma inclinação mínima de 0,5% longitudinalmente e 1% a 3% transversalmente. Para a preparação do pavimento, a taxa de asfalto diluído utilizada é de 1,2 litros/m². O ligante asfáltico indicado é o asfalto diluído CM-30. Com relação à drenagem da água pluvial, são utilizadas tubulações com 150 mm de diâmetro que, por meio gravitacional e através de sarjetas e bocas de lobo, recebem a água escoada pelo pavimento e a encaminham até a rede de coleta pluvial do município.

3.3. Comparação dos sistemas por meio da avaliação do ciclo de vida

3.3.1. Unidade funcional

Com os resultados obtidos nas seções 3.1.2 e 3.1.3, foi calculada a unidade funcional – drenagem da área do estacionamento (em m²) e fornecimento de água (em m³) para a edificação durante o horizonte de tempo de 20 anos – que totalizou 5.800 m² de área drenada e 54.404 m³ de água fornecida.

3.3.2. Consumo de energia para operação

A Tabela 3 mostra o consumo de energia para a operação dos sistemas nos dois cenários analisados. Considerando que o Cenário 1 requer a operação de duas motobombas (para recalcar água potável e água pluvial), há um maior consumo de energia para recalque nesse cenário. No entanto, considerando a economia de água potável obtida pelo sistema e considerando a economia de energia no tratamento e fornecimento de água potável, pode-se observar que o Cenário 1 consome menos eletricidade que o Cenário 2. Essa diferença é igual a 0,54 kWh/dia e 3.859 kWh no horizonte de 20 anos, representando economia de energia de 8,9% na fase de operação.

Tabela 3. Consumo de energia para a operação dos sistemas.

Cenário	Tipo de fornecimento	Consumo de energia elétrica (kWh/dia)			Consumo de energia elétrica no horizonte de tempo, 20 anos (kWh)
		Recalque de água	Tratamento e abastecimento de água	Energia total para operação	
1	Pluvial	2,99	-	2,99	21.767
	Potável	1,51	0,90	2,41	17.544
	Total	4,50	0,90	5,39	39.311
2	Potável	2,99	2,95	5,93	43.170
Diferença entre os cenários				0,54	3.859

3.3.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida

A Figura 12 apresenta os resultados dos impactos ambientais normalizados de acordo com os efeitos ambientais verificados nas fases do ciclo de vida de cada cenário em estudo. Os resultados demonstram que, na maioria das categorias avaliadas, os efeitos incorporados iniciais, relativos às etapas de extração das matérias-primas, fabricação e implantação dos componentes dos sistemas, respondem pela maior parcela dos impactos do ciclo de vida. O elevado impacto observado para a fase inicial na maioria das categorias se deve principalmente à elevada quantidade de materiais e equipamentos necessários à implantação dos sistemas (pavimentação e sistema hidráulico). Com isso, gera-se grande quantidade de extrações, impactando nas categorias relacionadas à depleção de recursos, uso do solo, toxicidade, entre outras.

A segunda fase com maior parcela nos impactos, na maioria das categorias avaliadas, é a etapa de final de vida. Foi considerado no escopo o simples descarte dos materiais em aterro sanitário como destino final dos componentes dos sistemas, ocasionando emissão de gases sem captura e tratamento, tornando a etapa de disposição final a segunda mais impactante. A fase de operação foi responsável por considerável parcela dos impactos. Tal fase considera a energia consumida no tratamento e distribuição de água potável pela concessionária e a energia consumida pelas motobombas na edificação. Essa parcela é maior nas categorias consumo de água, ecotoxicidade de águas potáveis e marinha e depleção de ozônio na estratosfera, devido principalmente ao fato de a hidroeletricidade ser a maior fonte energética do país. A fase de manutenção apresentou os menores impactos verificados, pois possui um número menor de atividades se comparada às demais fases.

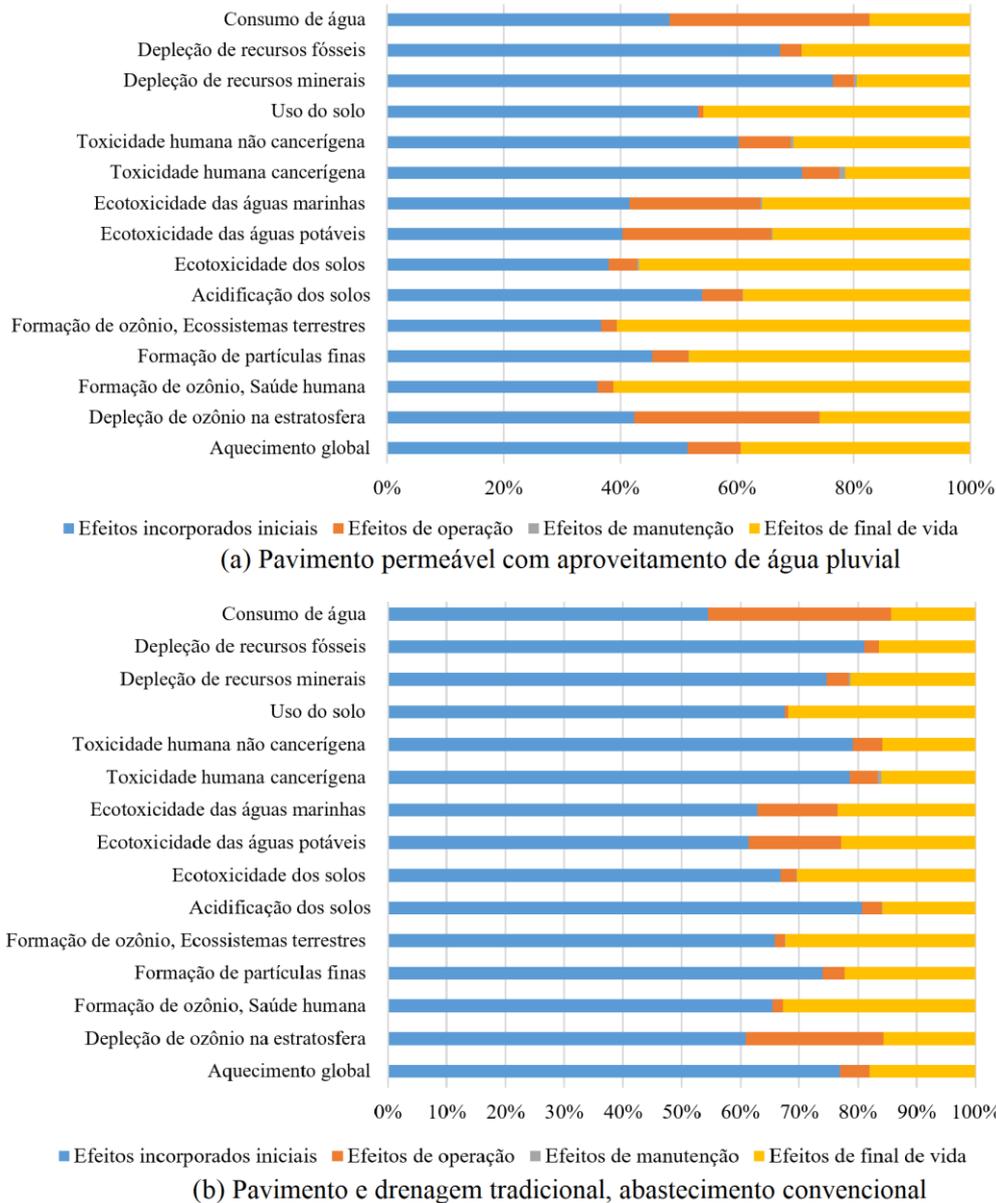


Figura 12. Efeitos ambientais normalizados das fases do ciclo de vida dos cenários avaliados.

A Figura 13 apresenta uma comparação dos impactos ambientais totais caracterizados por categoria de impacto para cada cenário avaliado, pelo método *ReCiPe midpoint*. Com exceção da categoria depleção de recursos minerais, todas as demais categorias tiveram impacto maior no cenário convencional. Na categoria depleção de recursos minerais, obteve-se impacto 13,8% maior para o Cenário 1. O processo de extração de ferro obteve o maior impacto em ambos os cenários, sendo 197 kg Cu equivalente no Cenário 1 (42,5%) e 154 kg Cu equivalente no Cenário 2 (38,6%). Esse resultado pode ser explicado pelo fato de o cenário com aproveitamento de água pluvial possuir duas motobombas, uma para recalque de água pluvial e outra para recalque de água potável, enquanto o cenário convencional possui apenas uma, utilizada para recalque de água potável. É importante ressaltar que, devido à pequena massa das motobombas em relação ao restante do sistema, a categoria *midpoint* depleção de recursos minerais teve pouco impacto em relação às categorias finais (*endpoint*).

Com relação à categoria aquecimento global, o cenário com pavimento permeável e aproveitamento da água pluvial apresentou redução de 48,2% nas emissões de CO₂ equivalente em comparação ao cenário convencional. O processamento de diesel foi o processo que obteve maior contribuição do Cenário 1 para essa categoria, com emissão de 1,74E+04 kg CO₂ eq., respondendo por 13,8% do total de emissões. O elevado

consumo de diesel acontece devido ao transporte das matérias-primas à fábrica, transporte dos materiais da fábrica à edificação, e transporte da edificação até a disposição final (aterro sanitário). O Cenário 2, por sua vez, teve o processo de produção de calor como o mais impactante para a categoria aquecimento global, com 6,52E+04 kg CO₂ eq. (26,8% das emissões). O elevado valor encontrado para esse processo se deve principalmente à produção de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), utilizado como revestimento do pavimento convencional.

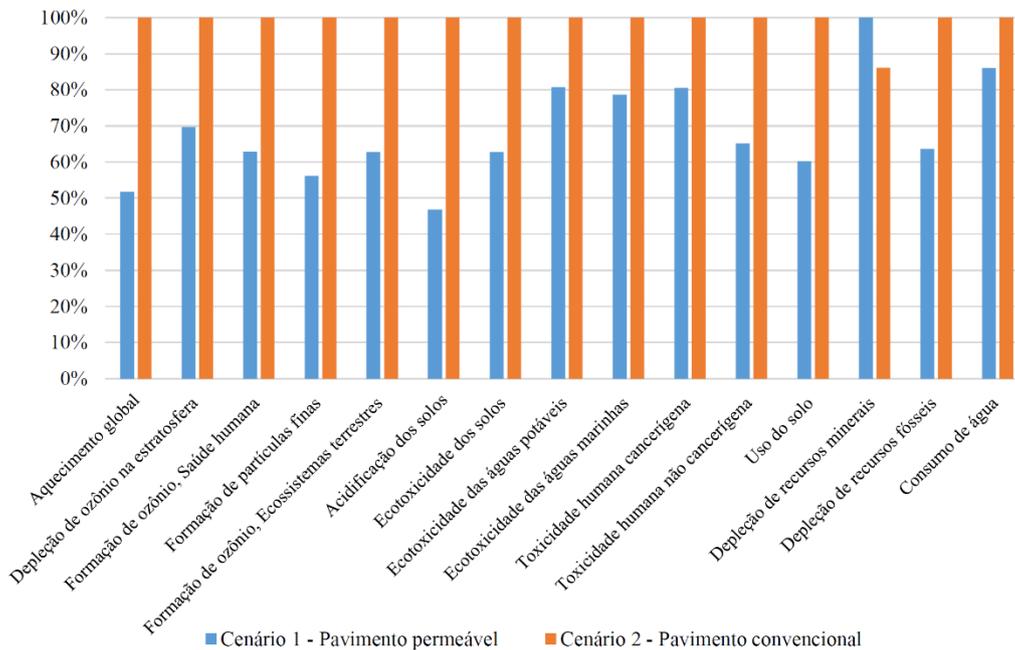


Figura 13. Comparação dos impactos ambientais (caracterização) dos cenários pelo método *ReCiPe midpoint*.

Na categoria formação de partículas finas, o cenário com pavimento permeável apresentou redução de 43,8% em relação ao cenário convencional. No Cenário 1, o processamento de diesel foi novamente o processo que mais contribuiu para os impactos nessa categoria, com 50,6 kg de PM_{2,5} equivalente (17,4%). No Cenário 2, o processo de produção de calor novamente causou o maior impacto, com 132 kg de PM_{2,5} equivalente (25,4%). A categoria formação de partículas finas está relacionada à poluição do ar, possuindo impacto negativo substancial na saúde humana, variando de sintomas respiratórios a internações e óbitos, representada pela unidade PM_{2,5} equivalente, ou seja, partículas finas (particulate matter) com diâmetro inferior a 2,5 µm.

Na categoria depleção de recursos fósseis, o cenário com pavimento permeável apresentou redução de impacto igual a 36,4%. A produção de petróleo (extração, transporte, refino e distribuição) foi o processo mais impactante (com mais de 75% do impacto em ambos os cenários). O petróleo é largamente utilizado nos dois cenários, como produto base para diversos materiais como ligante asfáltico, manta asfáltica, asfalto diluído e cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Na categoria depleção de ozônio na estratosfera, o processo de produção e distribuição de eletricidade foi o responsável pelos maiores impactos em ambos os cenários. Na categoria formação de ozônio, os maiores impactos foram causados pelo consumo de diesel no transporte de matérias-primas, componentes e disposição final. Elevadas concentrações de ozônio levam a um aumento do desconforto respiratório em humanos, como asma e doenças pulmonares obstrutivas crônicas. O ozônio também tem um impacto negativo na vegetação, incluindo redução do crescimento e produção de sementes.

O consumo de diesel também foi o processo com maior impacto na categoria acidificação dos solos em ambos os cenários. O consumo ocorre principalmente nas fases de implantação e de final de vida, devido ao transporte de materiais. O cenário com pavimento permeável obteve redução de 53,2% nas emissões de SO₂ equivalente para essa categoria, em comparação com o cenário convencional. Na categoria ecotoxicidade terrestre, o processo de transporte nas fases de implantação e final de vida, obteve o maior impacto em ambos

os cenários. Nas categorias ecotoxicidade de águas potáveis e marinha, o componente mais impactante foi o resíduo sulfídrico, relacionado aos resíduos da disposição final depositados no aterro sanitário.

Com relação à categoria toxicidade humana cancerígena, o processo de disposição final de escórias dos sistemas no aterro sanitário apresentou o maior impacto em ambos os cenários. Na categoria toxicidade humana não-cancerígena, o resíduo sulfídrico foi novamente o componente mais impactante nos dois cenários. Na categoria uso do solo, o processo de construção do estacionamento (fase de implantação) e do aterro sanitário (fase de final de vida), obteve o maior impacto nos dois cenários. Na categoria consumo de água, o cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial obteve redução de 14% em comparação ao cenário convencional. Para ambos os cenários, a produção de eletricidade foi o processo com maior impacto, devido à matriz energética brasileira ser em sua maioria de fonte hidroelétrica.

A Figura 14 ilustra o agrupamento realizado pelo método *ReCiPe* para os dois cenários em estudo. Percebe-se que a categoria de danos à saúde humana é a mais impactante, e que, nas três categorias avaliadas, o Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional – possui os maiores impactos potenciais.

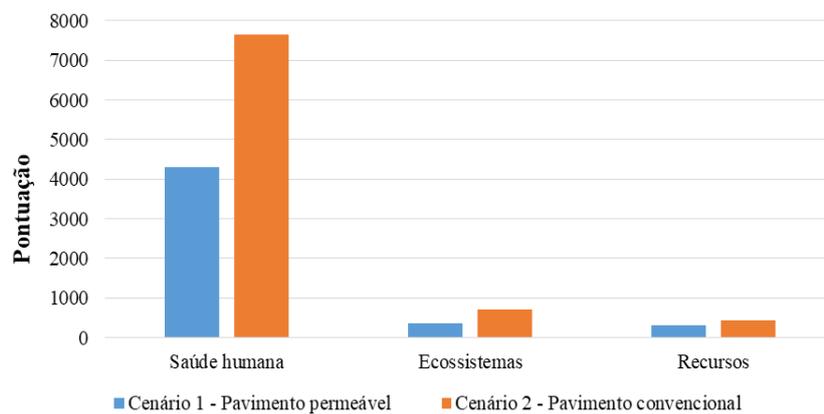


Figura 14. Comparação dos cenários pelo método *ReCiPe endpoint* (dados agregados).

A Figura 15 apresenta a comparação dos dois cenários pelo método *ReCiPe endpoint*, em pontuação única. O resultado é a soma dos dados ponderados das categorias de impacto, cujo objetivo é definir qual cenário possui o ciclo de vida com maior potencial de impacto ambiental. Percebe-se que o ciclo de vida do cenário com pavimento tradicional e drenagem convencional possui impacto global maior que o ciclo de vida do cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial. Os impactos que mais se destacaram nesse estudo estão relacionados à formação de partículas finas e ao aquecimento global.

Os resultados obtidos neste estudo são semelhantes a outros resultados encontrados na literatura. Bhatt et al. (2019) avaliaram o ciclo de vida de infraestruturas verdes (bacias de biorretenção e pavimentos permeáveis) e concluíram que a fabricação de matérias-primas tem o maior impacto (aproximadamente 50%) na depleção de ozônio, aquecimento global, potencial de poluição atmosférica, acidificação, emissões cancerígenas, efeitos respiratórios e depleção de combustíveis fósseis. Wang et al. (2018) compararam a utilização de um pavimento permeável em relação à utilização de um pavimento convencional. Com o uso do pavimento permeável, obteve-se a redução de 49 TJ de consumo de energia, 6.700 toneladas de emissões equivalentes de CO₂, 0,1 tonelada de emissão de chumbo e uma tonelada de emissão de zinco. Observou-se que a redução mais significativa nas emissões ocorreu na fase de operação do sistema. Anastasiou et al. (2017) avaliaram o ciclo de vida de um pavimento com blocos permeáveis em comparação com um pavimento convencional de concreto e concluíram que a emissão total de CO₂ do pavimento com blocos permeáveis foi de apenas 17,7% da produção do pavimento convencional. O pavimento convencional de concreto utiliza em sua composição maior quantidade de cimento, água, agregados e plastificante, além de conter fibras de aço, o que explica o maior impacto. Ressalta-se que em todos os estudos citados foi considerado apenas o ciclo de vida dos pavimentos, não levando em consideração o sistema de captação e aproveitamento da água pluvial.

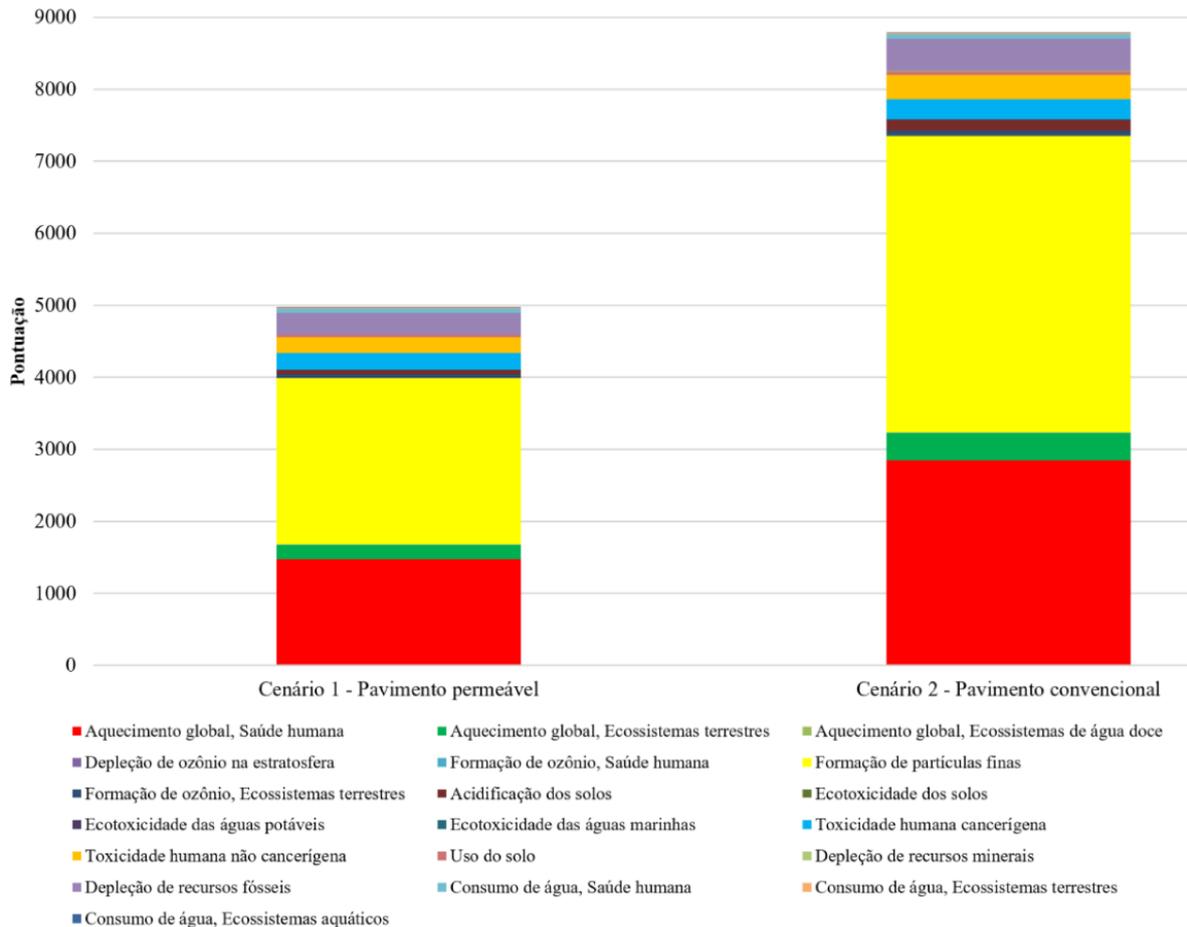


Figura 15. Comparação dos cenários pelo método *ReCiPe endpoint* (pontuação única).

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostram que os efeitos incorporados iniciais foram responsáveis pela maior parcela dos danos ambientais em ambos os cenários. Os elevados impactos observados são explicados principalmente pelos altos consumos de derivados do petróleo (como ligantes asfálticos, mantas asfálticas e cimento asfáltico de petróleo). Além disso, o elevado consumo de agregados, a energia consumida para a extração e processamento dos materiais, além do elevado consumo de diesel utilizado como combustível para o transporte dos materiais fazem com que essa etapa seja de grande impacto. A fase de operação, por sua vez, teve grande contribuição nos impactos ambientais devido ao elevado consumo de energia elétrica necessário para o funcionamento das motobombas e também para o tratamento e distribuição de água potável pela concessionária.

Considera-se como *hotspot*, ou seja, pontos com melhor oportunidade de melhorias ambientais, os seguintes processos: consumo de diesel, produção do concreto betuminoso usinado a quente e produção de petróleo. Estes resultados mostram que os processos relacionados ao consumo de diesel e materiais asfálticos (ambos derivados do petróleo) são os mais prejudiciais no ciclo de vida dos dois cenários. Dessa forma, recomenda-se que o sistema de pavimentação convencional (pavimento flexível) seja substituído por outras formas de pavimentação, como a utilização de *pavers* ou outros tipos de blocos intertravados, que não utilizem asfalto como ligante.

Com relação ao aproveitamento de água pluvial filtrada pelo pavimento permeável, mesmo com a utilização de uma motobomba extra e com a implantação de um reservatório inferior em concreto armado, o cenário obteve menor impacto ambiental em relação ao cenário convencional. Considerando tais resultados, recomenda-se a

utilização do pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial como forma de diminuir os impactos ambientais provenientes da pavimentação e drenagem convencional.

REFERÊNCIAS

1. ABNT NBR 15527. Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não-potáveis - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, Brasil, 2019.
2. ABNT NBR 16416. Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
3. ABNT NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, Brasil, 2009
4. Anastasiou, E.K., Liapis, A., Papachristoforou, M. *Life cycle assessment of concrete products for special applications containing EAF slag. Procedia Environmental Sciences*, v. 38, p. 469-476, 2017.
5. Antunes, L.N., Thives, L.P., Ghisi, E. *Potential for potable water savings in buildings by using stormwater harvested from porous pavements. Water*, v. 8 (4), p. 110, 2016.
6. Antunes, L.N., Ghisi, E., Thives, L.P. *Permeable pavements life cycle assessment: A literature review. Water*, v. 10 (11), p. 1575, 2018.
7. Back, A.J. Chuvas intensas e chuva para dimensionamento de estruturas de drenagem superficial para o Estado de Santa Catarina. Epagri, Florianópolis, SC, Brasil, 2013
8. Baptista, M.B., Nascimento, N.O., Barraud, S. *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. 2 ed. 318 p. Porto Alegre, RS, Brasil, 2011.
9. Bhatt, A., Bradford, A., Abbassi, B.E. *Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario. Journal of Environmental Management*, v. 231, p. 98-109, 2019.
10. Brattebo, B.O.; Booth, D.B. *Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. Water Research*, v. 37, p. 4369-4376, 2003.
11. BS 7543. *Guide to durability of buildings and buildings elements, products and components. British Standards Institution. London, UK*, 2003.
12. Chiu, Y.R., Liaw, C.H., Chen, L.C. *Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. Renewable Energy*, v. 34 (3), p. 492-498, 2009.
13. Ghisi, E., Cordova, M.M. Netuno 4. Programa computacional. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, SC, Brasil, 2014.
14. Hammes, G., Thives, L.P., Ghisi, E. *Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. Journal of Environmental Management*, v. 222, p. 338-347, 2018.
15. Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, A., Zijp, M., Zelm, R. *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. National Institute for Public Health and the Environment. Netherlands*, 2016.
16. Kammers, P.C., Ghisi, E. Usos finais de água em edifícios públicos localizados em Florianópolis, SC. *Ambiente Construído*, v. 6 (1), p. 75-90, 2005.
17. Mello, L.G.R., Farias, M.M., Preussler, E.S., Preussler, R. Análise do impacto do período de projeto de pavimentos no custo global de obras rodoviárias. *Transportes*, v. 24 (4), p. 64-74, 2016.
18. Pagotto, C.; Legret, M.; Le Cloirec, P. *Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. Water Research*, v. 34, p. 4446-4454, 2000.
19. Ribeiro, A.K.M. Método para avaliação do impacto ambiental da implantação de sistemas integrados de aproveitamento de água pluvial e água cinza em residências unifamiliares a partir da análise do ciclo de vida. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2015.
20. Rocha, V.L. Validação do algoritmo do programa Netuno para avaliação do potencial de economia de água potável e dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de água pluvial em edificações. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2009.
21. Roebuck, R., Oltean-Dumbrava, C., Tait, S. *Whole life cost performance of domestic RWH systems in the United Kingdom. Water and Environment Journal*, v. 25, p. 355-365, 2011.
22. SNIS. Série Histórica. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasil, 2018.
23. Sousa, M.R.C., Montalto, F., Spataro, S. *Using life cycle assessment to evaluate green and grey combined sewer overflow control strategies. Journal of Industrial Ecology*, v. 16 (6), p. 901-913, 2012.
24. Tomaz, P. *Poluição Difusa*. São Paulo, SP, Brasil, 2006.



25. Wang, R., Eckelman, M.J., Zimmerman, J.B. *Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems. Environmental Science & Technology*, v. 47, p. 11189-11198, 2013.
26. Wang, Y., Li, H., Ghadimi, B., Abdelhady, A., Harvey, J. *Initial evaluation methodology and case studies for life cycle impact of permeability of permeable pavements. International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 7 (3), p. 169-178, 2018.
27. Wasko, C., Sharma, A. *Steeper temporal distribution of rain intensity at higher temperatures within Australian storms. Nature Geoscience*, v. 8, p. 527-529, 2015.
28. Yong, C.F., McCarthy, D.T., Deletic, A. *Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. Journal of Hydrology*, v. 481, p. 48-55, 2013.
29. 3P Technik. *3P Technik Filtersysteme GmbH. Bad Überkingen, Göppingen, Germany, 2019.*