



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Lucas Niehuns Antunes

**Avaliação ambiental do aproveitamento de água pluvial infiltrada em um sistema de pavimento permeável em comparação com um sistema de drenagem convencional por meio da avaliação do ciclo de vida**

FLORIANÓPOLIS

2020

Lucas Niehuns Antunes

**Avaliação ambiental do aproveitamento de água pluvial infiltrada em um sistema de pavimento permeável em comparação com um sistema de drenagem convencional por meio da avaliação do ciclo de vida**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Enedir Ghisi, PhD

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Antunes, Lucas Niehuns

Avaliação ambiental do aproveitamento de água pluvial infiltrada em um sistema de pavimento permeável em comparação com um sistema de drenagem convencional por meio da avaliação do ciclo de vida / Lucas Niehuns Antunes ; orientador, Enedir Ghisi, 2020.

172 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Pavimentos permeáveis. 3. Água pluvial. 4. Avaliação do ciclo de vida. 5. Impacto ambiental. I. Ghisi, Enedir. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Lucas Niehuns Antunes

**Avaliação ambiental do aproveitamento de água pluvial infiltrada em um sistema de pavimento permeável em comparação com um sistema de drenagem convencional por meio da avaliação do ciclo de vida**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Vernon R. Phoenix, PhD.  
University of Strathclyde

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

---

Prof<sup>a</sup> Poliana Dias de Moraes, Dr<sup>a</sup>  
Coordenadora do Programa

---

Prof. Eneid Ghisi, PhD.  
Orientador

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2020.

Este trabalho é dedicado aos meus amados pais, Néia e Vaninho.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Enedir Ghisi, pela orientação, paciência e compreensão durante a realização desta dissertação, além de todo o conhecimento proporcionado desde o período da iniciação científica.

Aos professores Sebastião Roberto Soares, Devis Luis Marinoski e Vernon Phoenix, por aceitarem fazer parte da minha banca e contribuírem com o aprimoramento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à Universidade Federal de Santa Catarina pelo financiamento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus pais, Diovânio e Sidnéia, por todo amor, apoio e ensinamentos passados a mim durante minha vida. A eles expressei todo o meu reconhecimento e gratidão.

A toda minha família, por todo o carinho, acolhimento e incentivo no meu crescimento como pessoa.

Ao colega Roni Matheus Severis, pela ajuda na utilização do *software SimaPro*.

A todos os professores e colegas de curso que contribuíram para a minha formação.

O que acontece à Terra recai sobre os filhos da Terra. Não foi o homem quem teceu a trama da vida. Ele é só um fio dentro dela. Tudo o que ele fizer à teia estará fazendo a si mesmo (Chief Seattle).

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar e comparar ambientalmente, por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV), dois sistemas de drenagem para um estacionamento. O primeiro sistema é composto por um pavimento permeável, com posterior aproveitamento da água pluvial captada 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. Para a realização da ACV, uma edificação pública foi escolhida para estudo de caso. A primeira etapa do método incluiu a definição do objetivo e escopo do estudo, na qual foram determinadas as funções, unidades funcionais, horizonte de tempo e fronteiras dos sistemas. Na etapa de diagnóstico, foram feitos levantamentos de consumo de água e estimados os potenciais de economia de água potável e energia na edificação. No inventário foram compilados e quantificados os dados de entrada e saída relacionados à cada fase do ciclo de vida dos sistemas. Na fase de avaliação de impacto, os dados quantificados no inventário foram transformados em potenciais impactos ambientais por meio do programa computacional *SimaPro*. Verificou-se que no cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial o potencial de economia de água potável atingido foi de 69,6%. O potencial de economia de energia na fase de operação, quando comparado ao cenário convencional, foi de 3,86 MWh (8,9%) no horizonte de tempo de 20 anos. Na avaliação de impactos pelo método *ReCiPe*, gerenciado pelo programa *SimaPro*, foi verificado 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 em quatorze das quinze categorias *midpoint* avaliadas. O método ainda indicou que as categorias que tiveram maior impacto ambiental foram formação de partículas finas, aquecimento global (danos à saúde humana) e depleção de recursos fósseis. Por meio da pontuação única (*endpoint*), ficou evidente que o ciclo de vida do cenário convencional possui impacto potencial global maior que o cenário com pavimento permeável. Os resultados desta pesquisa se mostraram importantes para possibilitar a proposição de melhorias com o intuito de minimizar os impactos ambientais potencialmente gerados. Além disso, servem como base para guiar o planejamento e a 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; potencial de economia de água potável; avaliação do ciclo de vida; impacto ambiental.



## ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate and compare environmentally, through life cycle assessment (LCA), two drainage systems for a parking lot. The first system consists of a permeable pavement from where stormwater is harvested to be used in a building. The second system consists of a flexible pavement (impermeable), with no stormwater harvesting, and with conventional water supply in the building. To perform the LCA, a public building was chosen as a case study. The first step of the method included defining the objective and scope of the study, which determined the functions, functional units, time horizon and boundaries of the systems. Water consumption surveys were made and the potential for potable water and energy savings in the building were estimated. In the inventory, input and output data related to each phase of the life cycle of the systems were gathered and quantified. In the impact assessment phase, data from the inventory were transformed into potential environmental impacts through a specific computer programme for LCA (SimaPro). It was found that in the scenario with permeable pavement and use of stormwater the potential for potable water savings was 69.6%. The potential for energy savings in the operation phase, when compared to the conventional system, was 3.86 MWh (8.9%) over the 20-year time horizon. In the impact assessment by the ReCiPe method, managed by the SimaPro programme, it was found that the most significant damages were related to the implementation and end of life phases. The system with permeable pavement and stormwater utilization had lower potential for environmental impact in fourteen out of the fifteen midpoint categories evaluated. The results also showed that the categories that had the greatest environmental impact were particulate matter formation, global warming (damage to human health) and fossil resource scarcity. Through the endpoint scoring, it was observed that the conventional system had a greater overall potential impact than the permeable pavement system over the life cycle. The results of this research proved to be important for the proposition of improvements to minimize the potentially generated environmental impacts. In addition, the results serve as a basis for guiding planning and decision-making to improve water infrastructure management through stormwater harvesting in urban centres.

Keywords: permeable pavements; rainwater; potential for potable water savings; life cycle assessment; environmental impact.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipologias de revestimento de pavimentos permeáveis. ....	25
Figura 2.2. Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total. ....	26
Figura 2.3. Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração parcial. ....	26
Figura 2.4. Exemplo de sistema de pavimento permeável sem infiltração. ....	27
Figura 2.5. Esquema do pavimento permeável utilizado. ....	28
Figura 2.6. Poluentes contidos no escoamento do pavimento convencional e permeável. ..	32
Figura 2.7. Faixa de filtro gramado no estudo em Aberdeen. ....	36
Figura 2.8. Esquema da vala gramada utilizada em Brisbane. ....	37
Figura 2.9. Sistema de tratamento por filtração em Viena. ....	39
Figura 2.10. Modelos de pavimentos permeáveis utilizados no estudo. ....	42
Figura 2.11. Fases de uma ACV. ....	44
Figura 2.12. Agrupamento e ponderação de categorias de impacto ambiental da ACV. ....	52
Figura 2.13. Intervalos de impacto do potencial de aquecimento global para componentes do ciclo de vida do pavimento. ....	53
Figura 2.14. Estrutura do pavimento permeável utilizado no estudo. ....	58
Figura 2.15. Gases emitidos durante o ciclo de vida do pavimento permeável (PP) e telhado verde (TV). ....	58
Figura 3.1. Esquema de funcionamento do Cenário 1 - Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial. ....	71
Figura 3.2. Esquema de funcionamento do Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento de água convencionais. ....	72
Figura 3.3. Fluxograma do método proposto. ....	73
Figura 3.4. Foto aérea da edificação e do estacionamento da Epagri. ....	74
Figura 3.5. Modelo de pavimento permeável adotado. ....	75
Figura 3.6. Estimativa dos usos finais de água da edificação em estudo. ....	78
Figura 3.7. Parâmetros de projeto para o dimensionamento da camada reservatório. ....	81
Figura 3.8. Fronteiras dos cenários (a) com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial e (b) com pavimento tradicional e drenagem convencional. ....	90
Figura 4.1. Precipitação diária de Florianópolis de 2002 a 2017. ....	105

Figura 4.2. Precipitação mensal média de Florianópolis de 2002 a 2017, com valores máximos e mínimos para cada mês. ....	105
Figura 4.3. Imagem de satélite da área de coleta de água pluvial. ....	106
Figura 4.4. Consumo de água na edificação entre janeiro de 2014 e dezembro de 2018...	107
Figura 4.5. Consumo anual de água na Epagri (2014 a 2018).....	108
Figura 4.6. Consumo máximo, médio e mínimo mensal na Epagri (2014 a 2018).....	108
Figura 4.7. Potencial de economia de água potável. ....	110
Figura 4.8. Potencial de economia de água potável para diferentes áreas de captação.....	111
Figura 4.9. Consumo total de energia elétrica nos sistemas de água do município de Florianópolis entre 2004 e 2017.....	113
Figura 4.10. Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água no município de Florianópolis entre 2004 e 2017.....	114
Figura 4.11. Espessuras das camadas do pavimento permeável.....	115
Figura 4.12. Esquema dos drenos de fundo e drenos ramificados utilizados no pavimento. ....	116
Figura 4.13. Efeitos ambientais normalizados das fases do ciclo de vida do Cenário 1 – Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial – pelo método <i>ReCiPe midpoint</i>	128
Figura 4.14. Efeitos ambientais normalizados das fases do ciclo de vida do Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional – pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> .....	128
Figura 4.15. Comparação dos impactos ambientais (caracterização) dos cenários pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> .....	131
Figura 4.16. Comparação dos cenários pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> (dados normalizados). ....	135
Figura 4.17. Comparação dos cenários pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> (dados agregados). ....	136
Figura 4.18. Comparação dos cenários pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> (pontuação única). ....	137
Figura 4.19. Rede de processos elementares para o Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial – pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> .....	138

Figura 4.20. Rede de processos elementares para o Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicionais, abastecimento convencional – pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> . .....	140
Figura 4.21. Contribuição de cada subsistema do Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial – nas categorias <i>endpoint</i> . .....	141
Figura 4.22. Contribuição de cada subsistema do Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicionais, abastecimento convencional – nas categorias <i>endpoint</i> . .....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Poluentes dos pavimentos permeável e tradicional. ....	30
Tabela 2.2. Redução de poluentes com o uso de pavimento permeável. ....	33
Tabela 2.3. Propriedades dos diferentes pavimentos estudados. ....	60
Tabela 3.1. Parâmetros mínimos de qualidade para usos não potáveis. ....	85
Tabela 4.1. Dados de entrada no programa Netuno. ....	109
Tabela 4.2. Vazões atendidas por condutos circulares com declividade igual a 0,005 m/m. .....	116
Tabela 4.3. Resumo dos componentes e especificações utilizados em cada um dos cenários. .....	119
Tabela 4.4. Vida útil dos componentes dos sistemas e relação vida útil sistema/componente. .....	121
Tabela 4.5. Consumo de energia para a operação dos sistemas. ....	122
Tabela 4.6. Distância de transporte entre o local de fabricação e a edificação em estudo. ....	123
Tabela 4.7. Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida para o Cenário 1 – Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial – pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> . .....	125
Tabela 4.8. Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida para o Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional – pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> . ....	126
Tabela 4.9. Comparação entre os cenários em relação às categorias de impacto <i>midpoint</i> com sua contribuição nas categorias <i>endpoint</i> . ....	134

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 3.1. Dados para a elaboração do inventário do ciclo de vida. ....	92
Quadro 3.2. Serviços de manutenção recomendados para pavimentos permeáveis. ....	93
Quadro 3.3. Categorias de impactos ambientais intermediárias selecionadas no estudo. ..	101

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>18</b>
1.1. Considerações iniciais.....	18
1.2. Justificativa .....	20
1.3. Objetivos .....	22
1.3.1. <i>Objetivo geral</i> .....	22
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	22
1.4. Estrutura do trabalho.....	22
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>24</b>
2.1. Pavimentos permeáveis.....	24
2.1.1. <i>Caracterização</i> .....	24
2.1.2. <i>Permeabilidade, infiltração e qualidade da água infiltrada</i> .....	27
2.1.3. <i>Tratamentos adicionais</i> .....	34
2.1.4. <i>Aproveitamento da água pluvial captada de pavimentos permeáveis para usos não potáveis em edificações</i> .....	41
2.2. Avaliação do ciclo de vida.....	43
2.2.1. <i>Considerações iniciais</i> .....	43
2.2.2. <i>Fases da avaliação do ciclo de vida</i> .....	43
2.2.2.1. <i>Definição de objetivo e escopo</i> .....	44
2.2.2.2. <i>Análise de inventário de ciclo de vida</i> .....	45
2.2.2.3. <i>Avaliação de impacto do ciclo de vida</i> .....	47
2.2.2.4. <i>Interpretação do ciclo de vida</i> .....	49
2.2.3. <i>Uso de programas computacionais</i> .....	49
2.2.4. <i>ACV em estudos de pavimentação</i> .....	50
2.2.5. <i>ACV em pavimentos permeáveis</i> .....	54
2.2.6. <i>Análise do custo de ciclo de vida em pavimentos permeáveis</i> .....	61
2.2.7. <i>ACV em estudos de sistemas hidráulicos prediais</i> .....	64
2.2.8. <i>Limitações da ACV</i> .....	66
2.3. Considerações finais .....	67
<b>3. Método .....</b>	<b>70</b>
3.1. Objetos de estudo.....	74

3.2. Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial .....	74
3.2.1. Modelo de pavimento permeável.....	75
3.2.2. Potencial de economia de água potável.....	76
3.2.2.1. Dados pluviométricos .....	76
3.2.2.2. Área de captação.....	77
3.2.2.3. Consumo de água.....	77
3.2.2.4. Usos finais de água .....	77
3.2.2.5. Porcentagem de água infiltrada pelo pavimento.....	78
3.2.2.6. Volume dos reservatórios de água pluvial.....	78
3.2.3. Potencial de economia de energia para tratamento e abastecimento de água potável.....	79
3.2.4. Dimensionamento hidráulico do pavimento .....	80
3.2.5. Dimensionamento dos drenos .....	82
3.2.6. Dimensionamento do sistema hidráulico .....	83
3.2.7. Tratamento adicional e qualidade da água infiltrada .....	84
3.3. Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento de água convencionais .....	85
3.4. Comparação dos sistemas por meio da avaliação do ciclo de vida.....	86
3.4.1. Considerações iniciais .....	86
3.4.2. Definição de objetivo e escopo.....	88
3.4.2.1. Identificação da função.....	88
3.4.2.2. Horizonte de tempo .....	88
3.4.2.3. Unidade funcional.....	89
3.4.2.4. Fronteiras do sistema .....	89
3.4.2.5. Omissões de estágios do ciclo de vida.....	90
3.4.2.6. Critérios de exclusão de aspectos ambientais.....	90
3.4.3. Inventário de ciclo de vida .....	91
3.4.3.1. Pressupostos adotados .....	92
3.4.3.2. Quantificação das entradas .....	93
3.4.3.3. Quantificação das saídas.....	99
3.4.4. Avaliação de impacto do ciclo de vida.....	99
3.4.5. Interpretação do ciclo de vida .....	101
3.5. Resumo do método proposto .....	102



<b>4. Resultados.....</b>	<b>104</b>
4.1. Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial .....	104
4.1.1. <i>Dados pluviométricos.....</i>	<i>104</i>
4.1.2. <i>Área de captação.....</i>	<i>105</i>
4.1.3. <i>Consumo de água na edificação .....</i>	<i>106</i>
4.1.4. <i>Volume do reservatório superior de água pluvial .....</i>	<i>108</i>
4.1.5. <i>Potencial de economia de água potável.....</i>	<i>109</i>
4.1.6. <i>Potencial de economia de energia para tratamento e abastecimento de água potável.....</i>	<i>112</i>
4.1.7. <i>Dimensionamento hidráulico do pavimento .....</i>	<i>114</i>
4.1.8. <i>Dimensionamento dos drenos .....</i>	<i>115</i>
4.1.9. <i>Dimensionamento do sistema hidráulico .....</i>	<i>116</i>
4.2. Cenário 2 – Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento convencionais .....	117
4.3. Resumo do sistema hidráulico nos dois cenários.....	118
4.4. Comparação dos sistemas por meio da avaliação do ciclo de vida.....	119
4.4.1. <i>Unidade funcional.....</i>	<i>119</i>
4.4.2. <i>Inventário do ciclo de vida.....</i>	<i>119</i>
4.4.2.1. <i>Vida útil dos componentes dos sistemas .....</i>	<i>120</i>
4.4.2.2. <i>Consumo de energia para operação .....</i>	<i>121</i>
4.4.2.3. <i>Transporte de materiais e componentes dos sistemas .....</i>	<i>122</i>
4.4.2.4. <i>Destinação final dos componentes dos sistemas .....</i>	<i>124</i>
4.4.3. <i>Processos adotados na base de dados .....</i>	<i>124</i>
4.4.4. <i>Impactos ambientais.....</i>	<i>124</i>
4.4.4.1. <i>Categorias de impacto em nível midpoint .....</i>	<i>125</i>
4.4.4.2. <i>Categorias de impacto em nível endpoint.....</i>	<i>133</i>
4.4.5. <i>Interpretação dos impactos ambientais e recomendações.....</i>	<i>142</i>
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>144</b>
5.1. Limitações.....	146
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	146
<b>Referências .....</b>	<b>148</b>
<b>Apêndice I.....</b>	<b>160</b>
<b>Apêndice II .....</b>	<b>162</b>
<b>Apêndice III.....</b>	<b>166</b>

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações iniciais

O aumento na frequência de inundações em centros urbanos relacionado ao aumento das superfícies impermeáveis mostra a inadequação de sistemas urbanos de drenagem tradicionais. Segundo Min et al. (2011), 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 e Sharma (2015) identificaram forte correlação entre a intensidade dos picos de precipitação e as altas temperaturas, e concluíram que o aquecimento global pode levar ao aumento de inundações de curtas durações. 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 nos centros urbanos e que permitam um aumento na capacidade de evapotranspiração e infiltração. Os pavimentos permeáveis são exemplos de sistemas que cumprem essa função (BRUNETTI et al., 2016).

Segundo Scholz e Grabowiecki (2007), a gestão do escoamento da chuva em áreas urbanas tem sido vista de uma maneira mais ecológica devido ao surgimento dos sistemas de drenagem sustentável, que coletam, armazenam, tratam e redistribuem ou reciclam a água. Em comparação com o sistema de drenagem tradicional, a retenção e infiltração de água pluvial é um processo sustentável e viável economicamente, o que é adequado para áreas urbanas. Além disso, estes sistemas têm benefícios como a redução do escoamento, recarga de água subterrânea, economia de água através da reciclagem e prevenção da poluição.

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, sem causar danos às suas estruturas. Diversos estudos comprovam as vantagens do uso desse tipo de pavimento. Em comparação com asfaltos convencionais, pavimentos permeáveis proporcionam reduções de escoamento em até 42% (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007). Segundo Pagotto et al. (2000), a qualidade da água pluvial é melhorada com o uso de pavimentos permeáveis, obtendo-se redução na quantidade de

alguns poluentes. Os metais pesados chegam a ter redução de até 74%, sólidos são retidos a uma taxa de 87% e os hidrocarbonetos são interceptados a uma taxa ainda maior (90%).

Brattebo e Booth (2003) examinaram a eficácia a longo prazo de quatro sistemas de pavimentos permeáveis nos Estados Unidos. O estudo mostrou desempenho significativamente melhor para os pavimentos permeáveis, tanto para a qualidade da água, que apresentou níveis tóxicos mais baixos, quanto para a infiltração da água pluvial. Nos quatro sistemas estudados, praticamente toda a água foi infiltrada. Os níveis de cobre e zinco obtidos nas amostras de água coletadas do escoamento do concreto asfáltico convencional foram preocupantes: as concentrações tóxicas foram atingidas em 97% das amostras. Porém, em 31 das 36 amostras de água infiltrada pelos pavimentos permeáveis, as concentrações ficaram abaixo do nível tóxico detectável.

Segundo Maiolo et al. (2017), 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. Essa avaliação baseia-se principalmente na quantidade de emissão de gases que provocam o efeito estufa, assim como o consumo de energia e recursos naturais. Alguns parâmetros afetam significativamente a avaliação, tais como padrões climáticos locais, requisitos regulamentares, qualidade da água pluvial infiltrada e a vida útil e eficiência de tratamento dos sistemas (WANG et al., 2013).

Conforme declarado pela *Electric Power Research Institute* (2002), em escala nacional, o transporte e o tratamento de água e esgoto representam quase 4% da demanda de eletricidade dos Estados Unidos. Essa dependência da infraestrutura hídrica em relação à infraestrutura de energia elétrica leva a sérios impactos ambientais. Dessa forma, a gestão descentralizada de água traz benefícios não apenas como meio de reduzir as tensões na

infraestrutura de tratamento de água, mas também como estratégia para reduzir a demanda que as empresas de água impõem ao sistema energético regional, reduzindo também a pegada de carbono (SPATARI et al., 2011). Como referência, a cidade de Nova York (CITY OF NEW YORK, 2008) estima que os sistemas de tratamento de água e esgoto e abastecimento de água somam 17% das emissões de gases de efeito estufa da cidade.

De 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 (chamados de 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.

Embora a compreensão da implicação do ciclo de vida dos sistemas de drenagem sustentáveis esteja apenas em suas primeiras fases, 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 (GHIMIRE et al., 2017). 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 (pavimento convencional). 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.

## **1.2. Justificativa**

A disponibilidade de água vem decrescendo em todo o mundo devido ao crescimento da população e o conseqüente aumento da demanda por água. Um dos recursos que vêm sendo estudados e apresenta grande potencial de utilização é o sistema de aproveitamento de água pluvial. A água pluvial coletada pode ser utilizada em descarga de

vasos sanitários, torneiras de jardins, lavagem de roupas, de calçadas e de automóveis, entre outros usos não potáveis. Dessa forma, é possível reduzir o consumo de água potável, minimizar alagamentos, enchentes, racionamentos de água e preservar o meio ambiente reduzindo a escassez dos recursos hídricos.

Entretanto, a utilização de tecnologias necessárias para o uso racional de água em edificações, por meio de sistemas alternativos de suprimento de água, requer o emprego de materiais extras. Dessa forma, deve ser verificada a energia incorporada no ciclo de vida destes materiais. Essa energia incorporada se refere à energia primária consumida na extração das matérias-primas, fabricação, transporte, construção, manutenção, demolição e disposição final de materiais ou produtos de construção (CALTRANS, 2010).

Nos últimos anos, tem crescido a preocupação com relação à conservação dos recursos naturais, aos impactos das atividades humanas e às alterações no equilíbrio ambiental. Dessa forma, a sociedade, de forma geral, exerce grande pressão de demanda por informações sobre aspectos ambientais de produtos e sistemas.

A justificativa do tema desta pesquisa se dá pela necessidade da avaliação ambiental detalhada da implantação de pavimentos permeáveis como forma de reduzir o escoamento, aumentar as áreas permeáveis em centros urbanos, diminuir a frequência de inundações, além da economia de água gerada. Além de fornecer instruções científicas para a escolha de sistemas de drenagem mais sustentáveis, este trabalho apresenta o primeiro estudo de ACV envolvendo o aproveitamento de água pluvial infiltrada por pavimentos permeáveis em edificações.

As principais contribuições do trabalho dizem respeito à avaliação ambiental dos impactos causados pelos sistemas construtivos, com a identificação das categorias de impacto mais afetadas, os componentes com maior impacto ambiental e as fases do ciclo de vida que mais contribuem para os impactos ambientais. Os resultados possibilitam a proposição de melhorias para a minimização dos impactos gerados e são importantes para guiar o planejamento e a tomada de decisões a fim de melhorar o manejo das infraestruturas hídricas nos centros urbanos.

## **1.3. Objetivos**

### *1.3.1. Objetivo geral*

O objetivo geral deste trabalho é analisar e comparar ambientalmente, por meio da avaliação do ciclo de vida, dois sistemas de drenagem para um estacionamento de uma edificação, sendo o primeiro sistema composto por um pavimento permeável com aproveitamento da água pluvial e o segundo sistema do tipo convencional.

### *1.3.2. Objetivos específicos*

Este trabalho apresenta como objetivos específicos:

- Quantificar e avaliar os impactos ambientais potenciais associados ao sistema de pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis em uma edificação durante seu ciclo de vida;
- Quantificar e avaliar os impactos ambientais potenciais associados ao sistema de pavimento tradicional e abastecimento de água provindo da concessionária do município durante seu ciclo de vida;
- Estimar o potencial de economia de água potável que poderia ser alcançado em uma edificação por meio do aproveitamento de água pluvial captada pelo pavimento permeável;
- Comparar ambientalmente os dois sistemas a fim de determinar qual possui o menor potencial de impacto ambiental.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

Este trabalho é composto por cinco capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre sistemas de drenagem sustentável, pavimentos permeáveis e avaliação do ciclo de vida, assim como os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados no trabalho, divididos em pavimentos permeáveis e avaliação do ciclo de vida. Sobre os pavimentos permeáveis, são apresentados dados sobre permeabilidade, infiltração e qualidade da água infiltrada, assim como formas de tratamento adicional e dados sobre a utilização desta água em usos não potáveis em edificações. Com relação à avaliação do

ciclo de vida, são mostrados a sua caracterização, fases, usos da ACV em estudos do setor da construção civil, suas limitações, entre outros.

O capítulo 3 apresenta o método adotado no trabalho. Descreve-se como os impactos ambientais causados por ambos os sistemas (pavimento permeável e drenagem convencional) são quantificados e avaliados durante seus ciclos de vida. Apresenta também como quantificar a energia que poderia ser economizada no tratamento e abastecimento de água potável, caso o pavimento permeável fosse utilizado. Além disso, mostra como o potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento da água pluvial captada pelo pavimento permeável é estimado. Por fim, o método apresenta quais as categorias de impacto do ciclo de vida são envolvidas na comparação dos dois sistemas a fim de determinar o menos impactante ambientalmente.

No capítulo 4 são apresentados os resultados referentes aos dados pluviométricos do município de Florianópolis, área de captação de água pluvial, consumo de água na edificação, volume dos reservatórios e o potencial de economia de água potável e de energia que poderiam ser alcançados com o uso da água pluvial captada no pavimento permeável instalado no estacionamento da edificação. Além disso, são apresentados o dimensionamento dos pavimentos, drenos e sistemas hidráulicos. Após o dimensionamento dos dois cenários propostos, são apresentados também os resultados da avaliação do ciclo de vida, envolvendo os dados de entrada e saída na fase de inventário e avaliação e interpretação das categorias de impacto selecionadas no estudo.

O capítulo 5 expõe as conclusões e considerações finais do trabalho, as limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Pavimentos permeáveis**

#### *2.1.1. Caracterização*

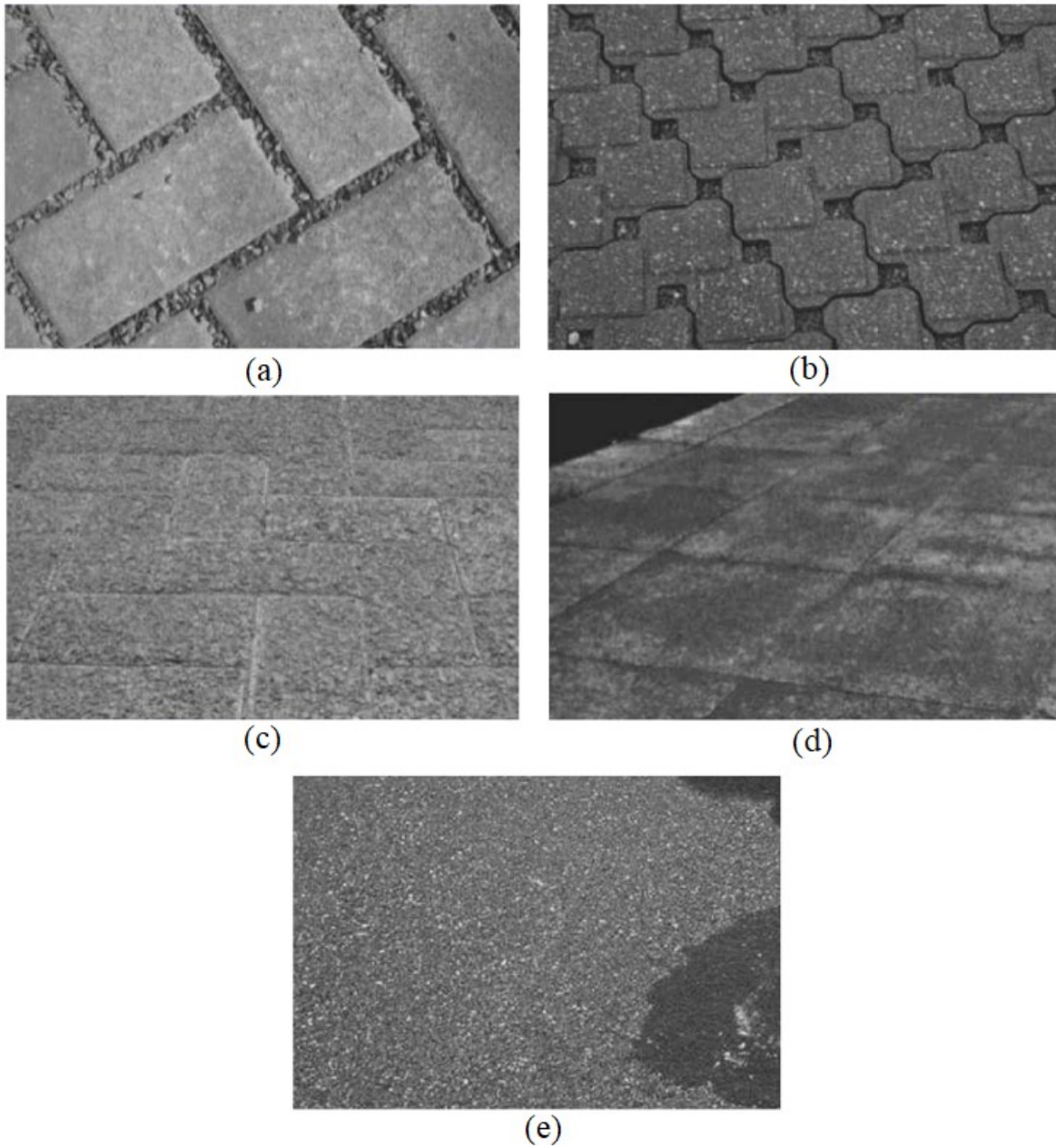
Pavimentos permeáveis são pavimentos que atendem simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, cuja estrutura permite a percolação e o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar danos à sua estrutura. Nesse tipo de pavimento a estrutura é composta pela combinação de camadas de sub-base permeável, base permeável, camada de assentamento permeável (quando for o caso) e revestimento permeável, dimensionada para suportar o carregamento do tráfego, distribuir os esforços no subleito e permitir a percolação da água. A base e a sub-base do pavimento são constituídas por materiais de granulometria aberta, com agregados que não contêm finos ou com pequena quantidade de finos, resultando em um índice de vazios relativamente elevado após a compactação (ABNT, 2015).

Segundo Xie et al. (2019), um pavimento permeável típico pode apresentar ampla gama de propriedades, por exemplo, índices de vazios efetivos de cerca de 15% a 30%, permeabilidade de 20 a 500 m/dia e resistência à compressão de 5 a 20 MPa.

Os pavimentos permeáveis de concreto podem ser executados com diversas tipologias de revestimentos permeáveis, tais como o revestimento intertravado permeável (com peças de concreto com juntas alargadas (Figura 2.1(a)), peças de concreto com áreas vazadas (Figura 2.1(b)) ou peças de concreto permeável (Figura 2.1(c)); revestimento de placas de concreto permeável, sem intertravamento (Figura 2.1(d)); ou ainda revestimento de concreto permeável moldado no local (Figura 2.1(e)).



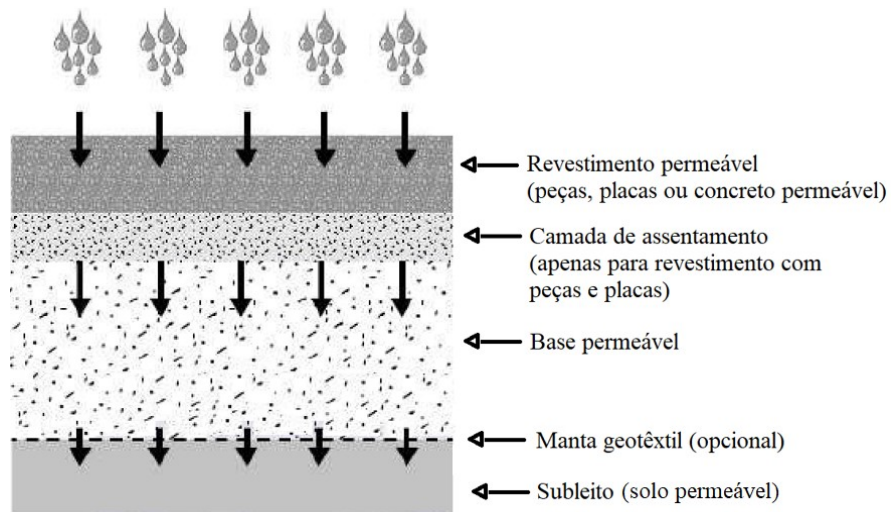
Figura 2.1. Tipologias de revestimento de pavimentos permeáveis.



Fonte: Adaptado de ABNT (2015).

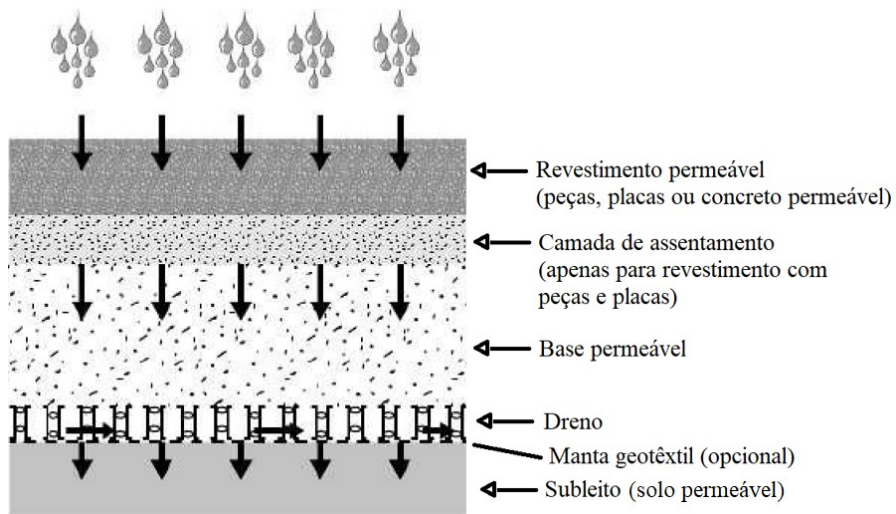
Quanto ao sistema de infiltração, o pavimento permeável pode ser concebido de três diferentes formas: com infiltração total da água precipitada (Figura 2.2), infiltração parcial (Figura 2.3) ou sem infiltração (Figura 2.4).

Figura 2.2. Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total.



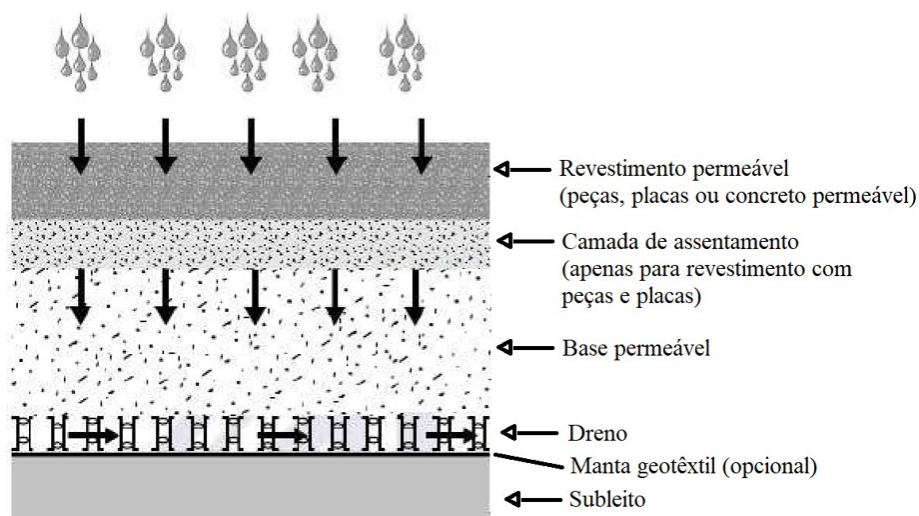
Fonte: Adaptado de ABNT (2015).

Figura 2.3. Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração parcial.



Fonte: Adaptado de ABNT (2015).

Figura 2.4. Exemplo de sistema de pavimento permeável sem infiltração.



Fonte: Adaptado de ABNT (2015).

### 2.1.2. Permeabilidade, infiltração e qualidade da água infiltrada

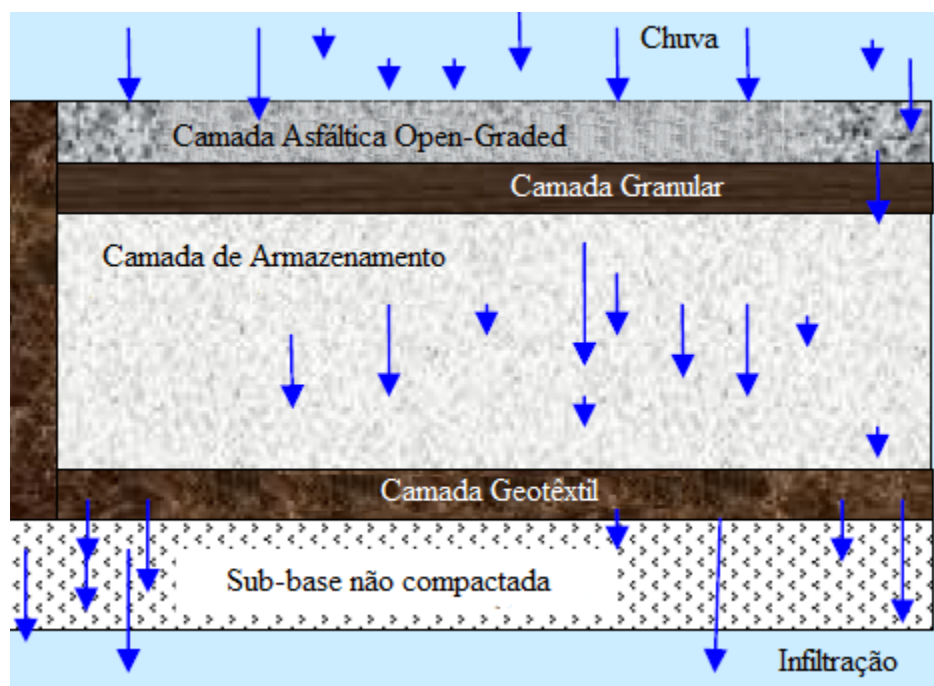
Pavimentos permeáveis podem beneficiar significativamente os ambientes urbanos. Eles podem levar à redução da quantidade de escoamento de águas pluviais e melhorar a qualidade da água em relação ao total de sólidos suspensos, fósforo, nitrogênio e metais. Além disso, o problema do ruído do tráfego e o efeito da ilha de calor podem ser atenuados ao mesmo tempo (XIE et al., 2019).

Diversos estudos têm demonstrado os benefícios da utilização de pavimentos permeáveis, como a redução do escoamento, recarga de água subterrânea, economia de água através da reciclagem e prevenção da poluição através da melhoria na qualidade da água infiltrada (JIA et al., 2012; SANSALONE et al., 2012; PARK et al., 2014; KNAPPENBERGER et al., 2017). A *Ramsey-Washington Metro Watershed District* (2006) realizou um estudo que tinha como objetivo implantar um sistema de pavimento permeável em um estacionamento com área de 650 m<sup>2</sup> em Oregon (EUA). O investimento visava infiltrar e armazenar a precipitação, diminuir o escoamento de água pluvial, maximizar a permeabilidade da área e melhorar a qualidade da água, retendo metais pesados e toxinas. O custo para a implantação do pavimento permeável foi de US\$102/m<sup>2</sup> e foi projetado para ter 100% de infiltração em precipitações de até 51 mm. Assim, qualquer precipitação até esse valor não geraria escoamento. O custo da implantação de um sistema de pavimento

convencional, por sua vez, variaria de US\$35/m<sup>2</sup> a US\$46/m<sup>2</sup>, sendo que para este tipo de pavimento o escoamento seria de 15.000 litros em uma precipitação de 25 mm.

As camadas presentes no pavimento permeável acima citado são mostradas na Figura 2.5. A camada asfáltica *Open-Graded* é a primeira camada do pavimento e é similar à do asfalto comum, exceto que exclui agregados menores para criar a camada porosa. A camada granular é composta por grânulos triturados e sua função é estabilizar a superfície. A camada de armazenamento é o local onde a água é armazenada (não existe em pavimentos convencionais). Essa camada é composta por agregado graúdo com um espaço vazio de 40% para armazenar temporariamente a água pluvial e permitir a infiltração gradual no solo. A camada geotêxtil é um tecido permeável que permite a infiltração da água e funciona como uma barreira para reter matérias sólidas. A última camada é a sub-base não compactada, assim chamada por ser descompactada do solo para otimizar a infiltração (RAMSEY-WASHINGTON METRO WATERSHED DISTRICT, 2006).

Figura 2.5. Esquema do pavimento permeável utilizado.



Fonte: Adaptado de Ramsey-Washington Metro Watershed District (2006).

Alguns autores defendem que a camada geotêxtil deve ficar entre a primeira camada (superfície) e a camada de armazenamento. Scholz (2013) salienta que uma camada geotêxtil em um nível mais acima no pavimento permeável aumenta a integridade estrutural, a retenção de poluentes e o processo de biodegradação para contaminantes orgânicos. Além disso, também evita que finas partículas (responsáveis pelo entupimento) na camada de armazenamento se movam em conjunto para baixo, consequentemente criando bolhas de ar no interior da camada e tornando a estrutura da superfície mais instável.

Wada et al. (1997) construíram um modelo que simulava a infiltração do escoamento de água pluvial através de um pavimento permeável juntamente com a construção de tubos de infiltração. O estudo mostrou que estes tubos de infiltração podem ser um dos métodos mais efetivos para o controle do escoamento pluvial em áreas urbanas, visto que a infiltração aumentou de 4 a 5 mm/h no pavimento permeável com o tubo de infiltração instalado.

O uso de pavimentos permeáveis tem como vantagens o potencial de economia devido às reduções na infraestrutura de drenagem, a filtração da água pluvial e seus contaminantes e o aumento da recarga do aquífero subterrâneo. Possui dupla função: é uma superfície de transporte e um sistema de filtração/infiltração ao mesmo tempo. Por isso, requer maior atenção na avaliação do local, supervisão rigorosa durante as fases de implantação e mão de obra qualificada. Além disso, requer um cronograma de manutenção abrangente, devido aos possíveis entupimentos dos poros. Por ser um sistema ainda relativamente novo, os pavimentos permeáveis continuam sendo mais caros que os pavimentos convencionais. Deve-se levar em conta também a manutenção necessária devido à obstrução dos poros, que eleva ainda mais os custos.

Segundo Pratt (1999), esses custos são vistos como obstáculos na instalação de reservatórios de água pluvial. Na Inglaterra, com o aumento no preço da água, a população mostrou maior interesse nas técnicas de reuso da água e os custos se tornaram mais atrativos. A questão seria avaliar onde construir os reservatórios, pois, pelas suas dimensões, apresentam questões estéticas indesejáveis. Uma saída seria construir pátios e calçadas que contenham os reservatórios. Se uma sub-base apropriada é colocada dentro de uma membrana impermeável e uma superfície permeável é colocada sobre o topo, um

reservatório é estabelecido e com fácil construção, não necessitando escavação profunda e utilizando os espaços vazios disponíveis.

Para avaliar o desempenho destes tipos de reservatório, Pratt (1999) fez um estudo de caso no albergue *Edwinstowe Youth*, cuja construção possuía 400 m<sup>2</sup> de área de telhado e 325 m<sup>2</sup> de estacionamento. A água pluvial de ambas as superfícies seria armazenada na sub-base do estacionamento. A superfície do estacionamento continha blocos permeáveis que permitiam a infiltração da água pluvial na sub-base. A água armazenada na sub-base é conectada a um reservatório do albergue e utilizada nas descargas dos vasos sanitários. A capacidade de armazenamento de água no pavimento era aproximadamente igual a 34 m<sup>3</sup>.

Legret e Colandini (1999) compararam a poluição contida no escoamento de água pluvial captado de um pavimento permeável com reservatório à poluição contida no escoamento provindo de um sistema tradicional de drenagem na cidade de Rezé (França). A Tabela 2.1 compara a quantidade de poluentes contida na água pluvial captada pelo reservatório do pavimento permeável e no sistema tradicional de drenagem.

Tabela 2.1. Poluentes dos pavimentos permeável e tradicional.

Pavimento	Variação	Sólidos suspensos	Chumbo	Cobre	Cádmio	Zinco
		(g/ha)				
Permeável	Mínimo	320	0,17	0,57	0,001	3,20
	Máximo	20900	3,60	6,30	0,27	29,90
	Média	3500	0,88	3,00	0,08	11,30
Tradicional	Mínimo	1300	1,90	1,10	0,11	34,10
	Máximo	26000	16,70	11,60	0,88	58,50
	Média	8500	5,60	3,00	0,35	41,80
<b>Diferença média (%)</b>		59	84	-	77	73

Fonte: Adaptado de Legret e Colandini (1999).

Os resultados mostram melhora significativa na qualidade da água pluvial infiltrada pelo pavimento permeável. Geralmente, nos estudos vistos na literatura, a quantidade de poluição nos sistemas tradicionais de drenagem é maior do que o obtido neste estudo.

Normalmente, o total de poluentes é estimado em 1000 a 2000 kg de sólidos suspensos por hectare impermeável por ano e 0,7 a 2,2 kg de chumbo por hectare impermeável por ano (LEGRET; COLANDINI, 1999). Considerando a média pluviométrica anual local de 787 mm, os valores encontrados por Legret e Colandini (1999) foram 200 kg de sólidos suspensos e 0,130 kg de chumbo por hectare impermeável por ano, bem abaixo dos valores estimados.

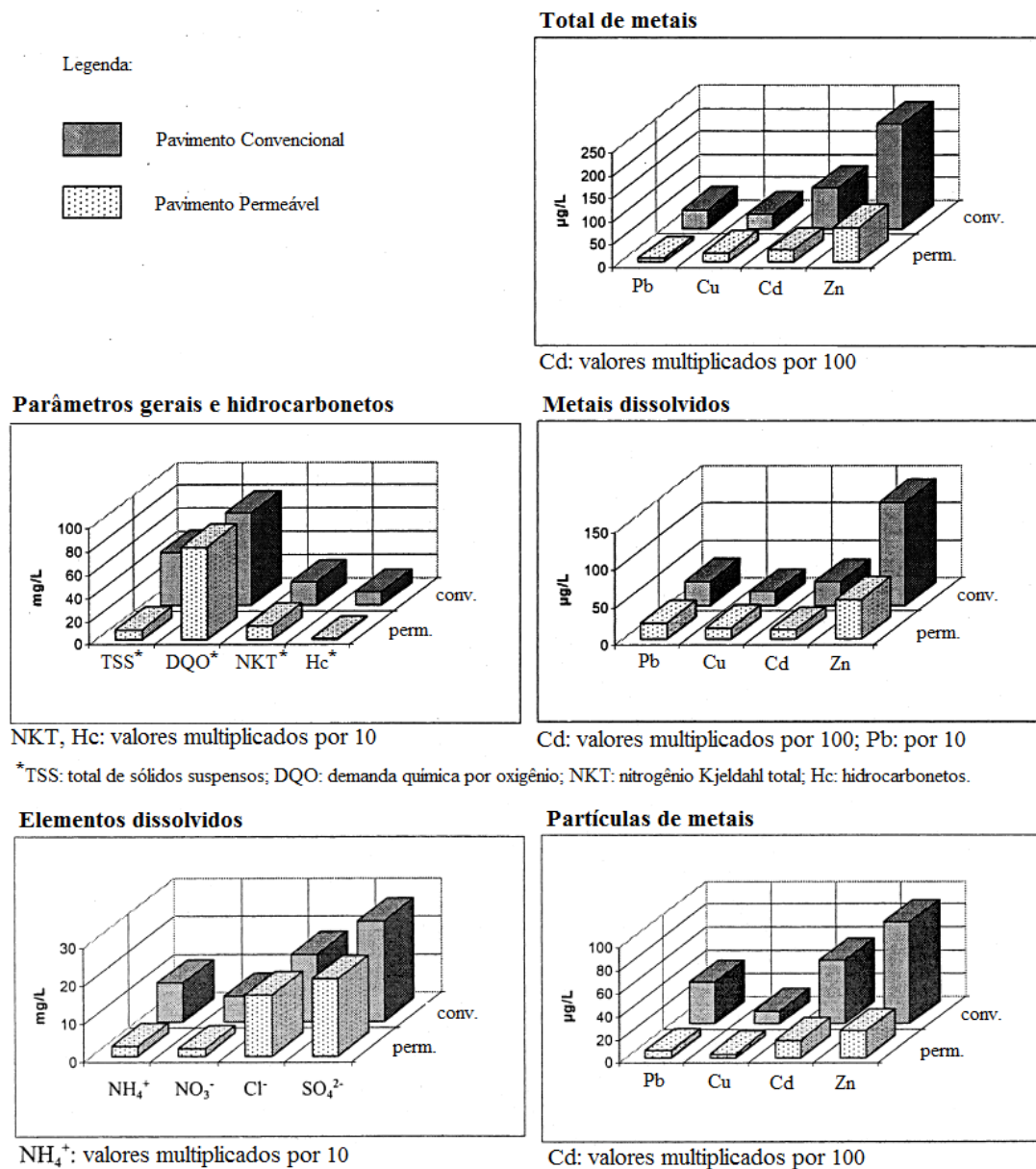
Pagotto et al. (2000) compararam o comportamento hidráulico e a qualidade da água pluvial escoada por uma seção de uma rodovia na cidade de Nantes (França) primeiramente em um pavimento convencional e, por fim, depois da substituição do pavimento convencional por um pavimento permeável. A seção da rodovia possuía área de 32000 m<sup>2</sup> e inclinação de 1,2%. Um estudo inicial foi feito no pavimento convencional, de março de 1995 a fevereiro de 1996; e um segundo estudo foi feito no pavimento permeável, de junho de 1997 a maio de 1998. Com relação ao comportamento hidráulico, o sistema de pavimento permeável obteve excelentes resultados. Os tempos de resposta (tempo decorrido entre o início da chuva e o início do fluxo de água) foram em média duas vezes mais longos neste tipo de pavimento. Isto pode ser explicado pela camada de armazenamento que retarda a evacuação da água para a saída. Este retardamento fez com que as taxas de fluxo máximo fossem reduzidas (6,2 litros/s nos pavimentos convencionais e 5,5 litros/s nos pavimentos permeáveis) e o tempo de descarga fosse maior (a média de duração da descarga foi 1,15 vezes maior nos pavimentos permeáveis).

Houve grande diferença entre os dois tipos de pavimentos quanto à qualidade da água pluvial. O percentual de hidrocarbonetos diminuiu 92% e o total de sólidos suspensos diminuiu 81%. Com relação aos metais, a redução variou de 35% (cobre) a 78% (chumbo). Para todos os metais, as formas de partículas são retidas a uma taxa elevada (superior a 70%). Entretanto, metais na forma dissolvida são retidos com maior dificuldade. Estes resultados explicam o nível considerável de retenção em massa, em termos percentuais, de zinco, cádmio e chumbo (presentes principalmente em forma de partícula) e a menor retenção de cobre (presente principalmente na forma dissolvida). O estudo mostrou também que, em média, 0,28 kg de sedimentos foram recolhidos por evento de chuva com o pavimento permeável contra mais de 4,1 kg, com o pavimento convencional (PAGOTTO et



al., 2000). A Figura 2.6 resume os dados referentes à diferença na qualidade do escoamento de acordo com o tipo de pavimento utilizado.

Figura 2.6. Poluentes contidos no escoamento do pavimento convencional e permeável.



Fonte: Adaptado de Pagotto et al. (2000).

James (2003) mostrou que o tráfego em rodovias é uma grande fonte de poluentes e que estes são carregados para rios e córregos quando a precipitação ocorre. Uma pesquisa feita pela *Forth River Purification Board* indica que mais de 14% da água insatisfatória dos



rios é devida ao escoamento de água pluvial em áreas urbanas. A qualidade da água escoada por pavimentos permeáveis e convencionais foi comparada e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.2. É possível perceber que o pavimento permeável tem grande participação no processo de tratamento da água pluvial, podendo ser um grande facilitador nos sistemas de drenagem sustentável.

Tabela 2.2. Redução de poluentes com o uso de pavimento permeável.

<b>Poluente</b>	<b>Redução com o pavimento permeável (%)</b>
Sólidos suspensos	80-99
Fósforo	65-71
Nitrogênio	75-85
Carbono orgânico	82
Chumbo	50-98
Zinco	62-99
Cromo	87-88
Cádmio	0-34
Cobre	42
Metais pesados	90-99
Demanda bioquímica de oxigênio	80-83
Demanda química de oxigênio	88
Hidrocarbonetos	95
Óleo	97-98

Fonte: Adaptado de James (2003).

Gilbert e Clausen (2006) avaliaram a quantidade de água pluvial escoada em calçadas de revestimento asfáltico e de *paver* (piso revestido de concreto que não impermeabiliza o solo, com 12% de espaços vazios em sua estrutura). A redução no escoamento do asfalto para o *paver* foi de 72%. A média de infiltração foi zero para o asfalto e 11,2 cm/h para o *paver*. Porém, a taxa de infiltração da calçada de *paver* decrescia com o tempo devido à obstrução dos poros por finas partículas. A água escoada pela calçada de *paver* continha significativamente menos poluentes quando comparada com a calçada asfáltica. Considerando os benefícios na redução do escoamento e as elevadas taxas

de infiltração, é mais vantajoso o uso de *paver* na construção de calçadas em relação ao material asfáltico tradicional.

Hou et al. (2008) avaliaram a taxa de infiltração de três diferentes tipos de sistemas de pavimentos permeáveis em comparação com um sistema de pavimento convencional. Para taxas de precipitação menores que 59 mm/h, o coeficiente de escoamento foi nulo para o pavimento permeável, enquanto o coeficiente do pavimento convencional foi de 0,85. Além da melhor taxa de infiltração, também foi verificado que o tempo de início do escoamento após o evento chuvoso foi maior para o pavimento permeável (73 minutos mais tarde). Consequentemente, o tempo de descarga da água pluvial também foi maior, o que diminui o risco de inundações causadas por precipitações intensas.

Eck et al. (2012) avaliaram a utilização do pavimento chamado *Permeable Friction Course* nos estados do Texas e Carolina do Norte (EUA). O total de sólidos suspensos teve redução de até 96% quando comparado ao pavimento convencional, e bons resultados foram encontrados para outros parâmetros, tais como fósforo (redução de até 78%), cobre (69%), chumbo (acima de 90%) e zinco (90%). O desempenho do *Permeable Friction Course* pode ser comparado ao de um filtro de areia, pois as substâncias em forma de partículas são bem filtradas, enquanto as substâncias dissolvidas apresentam menor ou nula retenção. Com relação ao escoamento, 29% a 47% do total da precipitação foi retido.

Embora os pavimentos permeáveis possam trazer benefícios promissores para os ambientes naturais e construídos, existem problemas que ameaçam a eficácia a longo prazo destes pavimentos. Tais problemas incluem a durabilidade e o entupimento, que permanecem como as principais barreiras para a ampla aplicação de pavimentos permeáveis. Alguns dos fatores que se destacam são: falha prematura ou deterioração com exposição a ataques químicos e físicos, sedimentos contidos nas águas pluviais ou poros colapsados pelo tráfego de veículos, entre outros. Esses são fatores importantes a serem considerados no projeto, construção, preservação e manutenção de pavimentos permeáveis (XIE et al., 2019).

### 2.1.3. *Tratamentos adicionais*

O controle e tratamento da água pluvial precipitada em centros urbanos envolvem diversas variáveis na escolha de sistemas de drenagem sustentável. Fatores como

viabilidade técnica, ambiental, social e econômica tornam-se importantes critérios de sustentabilidade em termos de avaliação das opções de drenagem de baixo custo e em longo prazo. O sistema de drenagem escolhido deve considerar não apenas a quantidade de água armazenada, mas também a qualidade desta água, que será posteriormente utilizada ou lançada em córregos e rios. Infelizmente, a avaliação dos sistemas de drenagem sustentável tem sido feita principalmente de forma empírica ou de natureza subjetiva (ELLIS et al., 2004).

Ellis et al. (2004) desenvolveram um método de análise envolvendo vários critérios para a avaliação de sistemas de drenagem sustentável em contexto com três bases destes sistemas: quantidade de água, qualidade da água e amenização ecológica. O método de análise desenvolvido foi aplicado na escolha da construção de uma bacia de retenção em uma rodovia em Paris com o objetivo de fornecer uma efetiva drenagem e tratamento da água pluvial escoada pela rodovia. Seguindo um estudo inicial de viabilidade, os engenheiros responsáveis pela obra estabeleceram uma lista de critérios que foram agrupados em quatro categorias: desempenho hidráulico, desempenho ambiental, viabilidade do projeto e custos. Destaca-se, também, que análises de múltiplos critérios fornecem um simples e compreensível método que pode ser apropriado para estruturas que visam o controle e tratamento de água pluvial em cidades.

Algumas formas de tratamento muito utilizadas nos países desenvolvidos são as chamadas *Best Management Practices*, que são técnicas adotadas para a melhoria da qualidade da água pluvial que entra em contato com as estradas e assim acaba por ser contaminada por diversos poluentes. Geralmente, estas técnicas trazem soluções principalmente para problemas relacionados à qualidade da água, visto que a poluição da água pluvial tem crescido devido ao aumento da urbanização e de áreas impermeáveis. As *Best Management Practices* evitam que a água pluvial poluída chegue até os rios e córregos. Algumas das práticas utilizadas são as trincheiras de infiltração, filtros de areia, faixa de filtro gramado, reservatórios de infiltração, reservatórios de detenção estendidos, *rain gardens*, entre outras. Mesmo havendo dúvidas sobre a maneira como as *Best Management Practices* afetam a qualidade da água pluvial, alguns estudos comprovam que estas técnicas auxiliam na redução de sólidos suspensos, metais, nitrogênio, fósforo e outros poluentes.

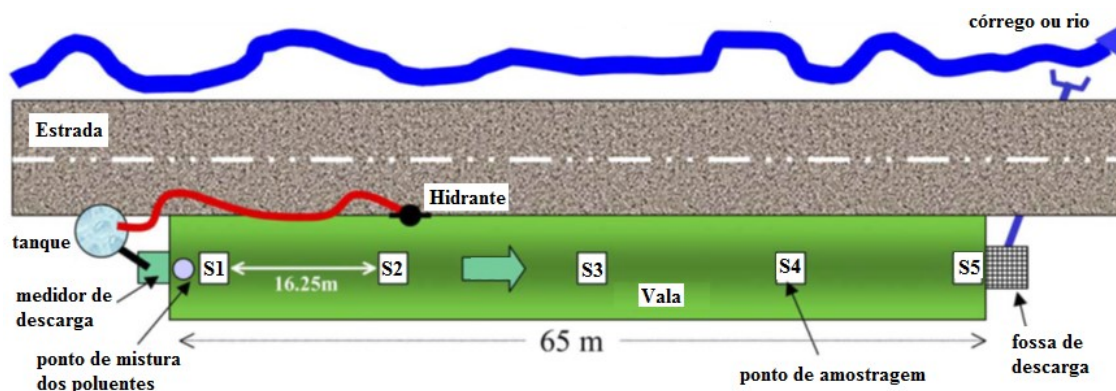
Faixas de filtro gramado e valas gramadas estão entre as mais simples e rentáveis formas de medidas de controle de poluição de água pluvial. As faixas de filtro gramado são superfícies alinhadas perpendicularmente à direção do fluxo, que são usadas para filtrar partículas e poluentes, evitando que estes poluentes cheguem às águas receptoras. As valas gramadas, por sua vez, são drenagens de vegetação aberta que filtram a água pluvial antes do seu descarte em rios e córregos. Deletic e Fletcher (2006) avaliaram a eficiência de uma faixa de filtro gramado em Aberdeen, Escócia, e de uma vala gramada em Brisbane, Austrália. Em ambos os estudos, as concentrações dos sólidos suspensos foram registradas para entrada artificial de água com diferentes vazões e concentrações de sedimentos. No estudo de Aberdeen, a ênfase foi dada ao desempenho em relação a diferentes tamanhos de partículas de sedimentos, enquanto em Brisbane, o desempenho do tratamento para o nitrogênio e fósforo também foi registrado. A Figura 2.7 mostra a faixa de filtro gramado utilizada no estudo em Aberdeen, enquanto a Figura 2.8 apresenta o esquema da vala gramada utilizada no estudo em Brisbane.

Figura 2.7. Faixa de filtro gramado no estudo em Aberdeen.



Fonte: Deletic e Fletcher (2006).

Figura 2.8. Esquema da vala gramada utilizada em Brisbane.



Fonte: Adaptado de Deletic e Fletcher (2006).

A vala possui 65 m de comprimento e altura máxima de 4 m, com uma inclinação de 1,6%. Pontos de amostragem são localizados a cada 16,25 m ao longo da vala. Um tanque fornece fluxos constantes variando de 2 a 15 l/s. As amostras de água na entrada da vala possuem uma poluição artificial, feita através da mistura de poluentes sintéticos, a uma concentração de 150 mg/l. As entradas também incluem nutrientes sintéticos para criar uma concentração de nitrogênio igual a 2,6 mg/l, e concentração de fósforo igual a 0,3 mg/l, na entrada da água.

Observações sobre os estudos feitos em Aberdeen e Brisbane confirmam que valas gramadas e faixas de filtro gramado são meios eficazes para a remoção de sedimentos da água pluvial captada de estradas. Em ambos os casos houve um decréscimo exponencial de sólidos suspensos ao longo da faixa gramada, visto que a remoção de sólidos suspensos é uma função da vazão, do gramado, juntamente com o tamanho e densidade das partículas. A remoção de nitrogênio e fósforo também se deu em forma de decréscimo exponencial ao longo da faixa gramada. A faixa de filtro gramado em Aberdeen reduziu a concentração de sedimentos entre 61% e 86%, enquanto a vala gramada em Brisbane removeu uma média de 69%, 46% e 56% para o total de sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo, respectivamente.

Stagge et al. (2012) avaliaram o desempenho de uma vala gramada como forma de tratamento para a água pluvial escoada de estradas nos Estados Unidos. Duas valas comuns, com dimensionamentos alternativos (pré-tratamento com faixas de filtro gramado e barragens de vegetação) foram comparadas durante quatro anos e meio. Ambas as valas

removeram significativamente o total de sólidos suspensos e os metais avaliados no estudo (chumbo, cobre, zinco e cádmio). Antes do tratamento, entre 41% e 56% das amostras tiveram concentrações de sólidos suspensos acima de 30 mg/l. Este valor diminuiu para valores entre 1% e 19% no escoamento tratado pela vala gramada. O estudo mostrou também que a sedimentação e a filtração da camada de grama são os mecanismos primários do tratamento dos poluentes, sendo que a sedimentação tem um papel muito maior do que a filtração. Dessa forma, as partículas sólidas são as que possuem melhor remoção nas valas. A inclusão de faixas de filtro gramado ou barragens de vegetação no tratamento tiveram mínimos efeitos na qualidade da água. Os resultados do estudo sugerem que as valas gramadas geralmente melhoram a qualidade da água pluvial escoada por estradas e devem ser consideradas como uma alternativa rentável capaz de fornecer proteção para águas superficiais e subterrâneas.

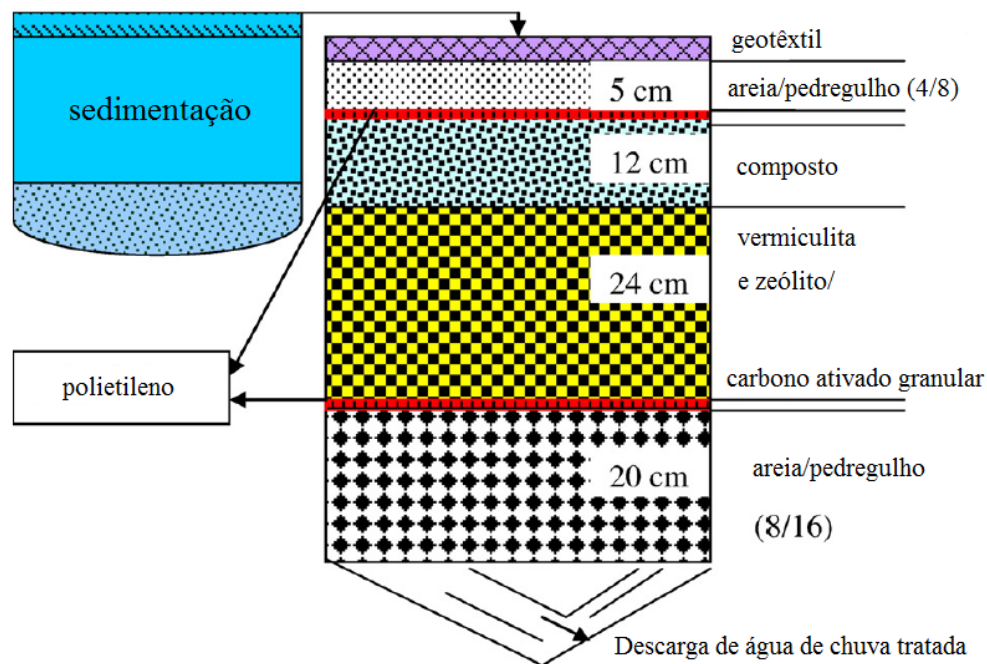
Um estudo feito por Finney et al. (2010) em uma estrada com intenso tráfego (aproximadamente 100.000 veículos por dia) em Kitchener, Canadá, mostrou que a água pluvial captada de estradas pode ter sua qualidade melhorada por um biofiltro composto. O biofiltro composto é vantajoso em relação a outras tecnologias, uma vez que não só remove os contaminantes, mas também atua como uma 'barragem' reduzindo o fluxo de água. O composto é feito de uma combinação entre constituintes orgânicos e não orgânicos, que podem ser divididos em substâncias húmicas e não-húmicas. As substâncias não-húmicas (que incluem proteínas, aminoácidos e ácidos carboxílicos) são componentes que têm características químicas conhecidas. As substâncias húmicas são principalmente matéria orgânica que possui alta afinidade com íons metálicos complexos. Toda esta diversidade de componentes faz com que o biofiltro composto tenha a capacidade de absorver metais pesados, óleo, nutrientes e matéria orgânica.

No estudo, notou-se que os principais fatores que influenciam na qualidade da água pluvial são a média de tráfego de veículos, o período de seca antes do evento chuvoso e a intensidade das chuvas. Antes da filtração, o nível de contaminação da água pluvial excedeu os limites da *Provincial Water Quality Objectives* de Ontário. Entretanto, o biofiltro reduziu o total de sólidos suspensos, zinco, cobre e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em 42%, 32%, 29% e 66%. Assim, todos os níveis de contaminantes, com exceção do cobre, ficaram abaixo dos limites exigidos.

Fuerhacker et al. (2011) avaliaram o desempenho de um sistema de filtração em um estacionamento localizado em Viena, Áustria. O sistema de tratamento por filtração possui uma área de 45 m<sup>2</sup> e três principais componentes: tanques de sedimentação e separação de óleo, três câmaras de filtros e uma câmara de controle para amostragem. A Figura 2.9 mostra um esquema com todos os componentes do filtro. No tanque de sedimentação, sólidos com alta densidade são separados por ação da gravidade. Depois de passar pela sedimentação, o escoamento flui através do separador de óleo, onde o óleo é separado devido à variação na densidade dos líquidos. Após esta etapa, o escoamento é filtrado através da camada geotêxtil, colocada no topo das camadas do filtro. A camada geotêxtil é utilizada para conseguir distribuição uniforme do fluxo e para reduzir sedimentos ou componentes flutuantes. Nas câmaras de filtração, a remoção de poluentes ocorre por meio de processos como a adsorção (troca de íons), precipitação e outra transformação química complexa.

O filtro teve bom desempenho nos resultados do estudo. A eficiência do sistema na remoção de sólidos suspensos, óleo mineral, carbono orgânico total, NH<sub>4</sub>-N, cobre e zinco foi de 85%, 90%, 52%, 71%, 75% e 73%, respectivamente.

Figura 2.9. Sistema de tratamento por filtração em Viena.



Fonte: Adaptado de Fuerhacker et al. (2011).

Em uma estrada de intenso tráfego (57.000 veículos por dia) em Munique, Hilliges et al. (2013) monitoraram, durante um ano, um sistema de tratamento de água pluvial. O sistema é composto por duas etapas. A primeira etapa consiste da eliminação de finas partículas utilizando um separador hidrodinâmico. A segunda etapa utiliza um filtro de lignito que tem como objetivo adsorver poluentes dissolvidos. Antes do tratamento, os valores encontrados para os poluentes no escoamento da estrada ficaram muito acima dos valores críticos estipulados pela *German Federal Soil Protection Act and Ordinance*. A concentração de zinco foi de 933 µg/l, cobre 194 µg/l, chumbo 37,2 µg/l, sólidos suspensos 405 mg/l e carbono orgânico total 60 mg/l. O tratamento teve excelente retenção de poluentes. A eficiência foi de 99,5% para o zinco, 95,2% para o cobre, 100% para o chumbo, 100% para os sólidos suspensos e 94% para o carbono orgânico total. Isso mostra que a água altamente poluída captada de estradas pode ser purificada pelo sistema de tratamento, de maneira que não existam riscos de contaminação para o solo e para aquíferos subterrâneos.

Outra forma de tratamento para a água pluvial são as bacias de detenção. No passado, a presença de bacias de detenção ao longo de uma estrada só era necessária caso esta estivesse localizada próxima a uma área de conservação de recursos hídricos. Entretanto, recentemente, bacias de detenção estão sendo construídas a fim de preservar os recursos hídricos, removendo os diversos poluentes existentes na superfície das estradas. Stotz (1990) avaliou a eficiência de três bacias de detenção quanto à eliminação de metais pesados e substâncias orgânicas contidas no escoamento pluvial em uma estrada alemã. As bacias se diferenciavam apenas por modelos de construção e dimensionamentos e foram localizadas em três diferentes regiões (Ulm-West, Pleidelsheim e Obereisesheim). A bacia localizada na cidade de Pleidelsheim foi a que obteve melhores resultados, com redução de 85% para sólidos suspensos, 63% para demanda química de oxigênio e 80% para óleos e gasolina. Com relação aos metais pesados, houve redução de 74%, 50%, 79%, 73%, 66%, 63% para ferro, zinco, chumbo, cobre, cromo e cádmio, respectivamente.

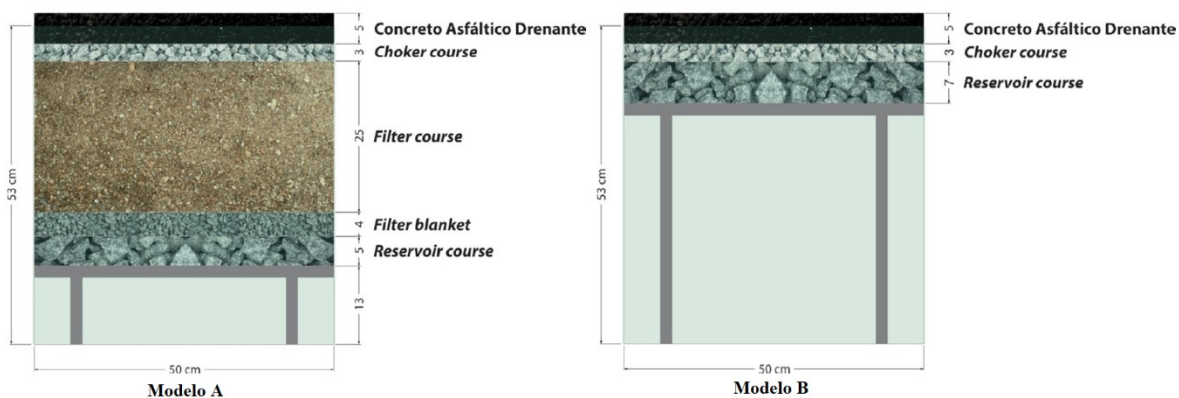


#### *2.1.4. Aproveitamento da água pluvial captada de pavimentos permeáveis para usos não potáveis em edificações*

Conforme visto na seção 2.1.2, os pavimentos permeáveis têm a capacidade de reter os poluentes e melhorar a qualidade da água pluvial infiltrada. Com o tratamento adicional, cujos exemplos foram expostos na seção 2.1.3, a água pluvial pode ter a sua qualidade melhorada de forma a permitir o seu uso em algumas atividades que não necessitam de água potável. Alguns estudos avaliaram a possibilidade de utilizar esta água para usos não potáveis em edificações, como descarga de vasos sanitários, rega de jardins, lavagem de carros, entre outros. Antunes et al. (2016) avaliaram a possibilidade do aproveitamento de água pluvial em usos não potáveis em edificações dos setores residencial, comercial e público na cidade de Florianópolis. No estudo, foram utilizadas placas de concreto asfáltico drenante modificadas com borracha moída de pneus e com polímero SBS. O valor do percentual de infiltração encontrado para o pavimento drenante foi de 85%. Dessa forma, foram obtidos potenciais de economia de água potável variando de 1% a 18% no setor residencial, 2% a 57% no setor público e 6% a 69% no setor comercial, dependendo do tamanho do reservatório utilizado.

Hammes et al. (2018) avaliaram o desempenho de um pavimento permeável quanto à quantidade e à qualidade da água pluvial infiltrada, visando seu aproveitamento em atividades que permitam o uso de água não potável. Os pavimentos ensaiados são mostrados na Figura 2.10. O modelo A obteve média de infiltração de 70%, enquanto o modelo B obteve média de 80%. A menor infiltração observada no modelo A é devida principalmente à camada de areia presente no pavimento. Foi observada uma influência positiva dos pavimentos em alguns parâmetros de qualidade da água. Porém, constatou-se a necessidade de um tratamento adicional da água para adequá-la à qualidade prevista para o uso desejado. Além disso, foi proposta a utilização do pavimento permeável em um estacionamento da Universidade Federal de Santa Catarina para filtração de água pluvial e posterior uso na descarga de vasos sanitários e mictórios do bloco central do Centro Tecnológico. O potencial de economia de água potável obtido foi de pelo menos 53%.

Figura 2.10. Modelos de pavimentos permeáveis utilizados no estudo.



Fonte: Hammes et al. (2018).

Thives et al. (2018) realizaram um estudo a fim de determinar a capacidade de filtração e a qualidade da água filtrada por pavimentos permeáveis com revestimento de concreto asfáltico drenante. Os parâmetros fósforo, ferro, alumínio, zinco, nitrito, crômio, cobre e pH obtiveram um aumento na concentração após a infiltração nos pavimentos estudados, enquanto a concentração de amônia diminuiu. Entretanto, apenas as concentrações de fósforo e alumínio excederam os limites exigidos para usos não potáveis. Foi constatado também que, nos pavimentos estudados, pelo menos 84% da água pluvial poderia ser infiltrada e estaria disponível para usos não potáveis.

Embora as taxas de remoção de poluentes variem de acordo com as condições climáticas e parâmetros de dimensionamento dos pavimentos permeáveis, os estudos mencionados nesta revisão comprovam a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento da água pluvial, assim como a melhora na qualidade da água infiltrada pelo pavimento. Porém, a literatura ainda carece de publicações relacionadas à sustentabilidade dos pavimentos permeáveis. Tais estudos devem relacionar os benefícios trazidos por estes sistemas com os impactos ambientais produzidos durante todas as fases, desde a extração dos materiais até o fim da vida útil do pavimento.

## **2.2. Avaliação do ciclo de vida**

### *2.2.1. Considerações iniciais*

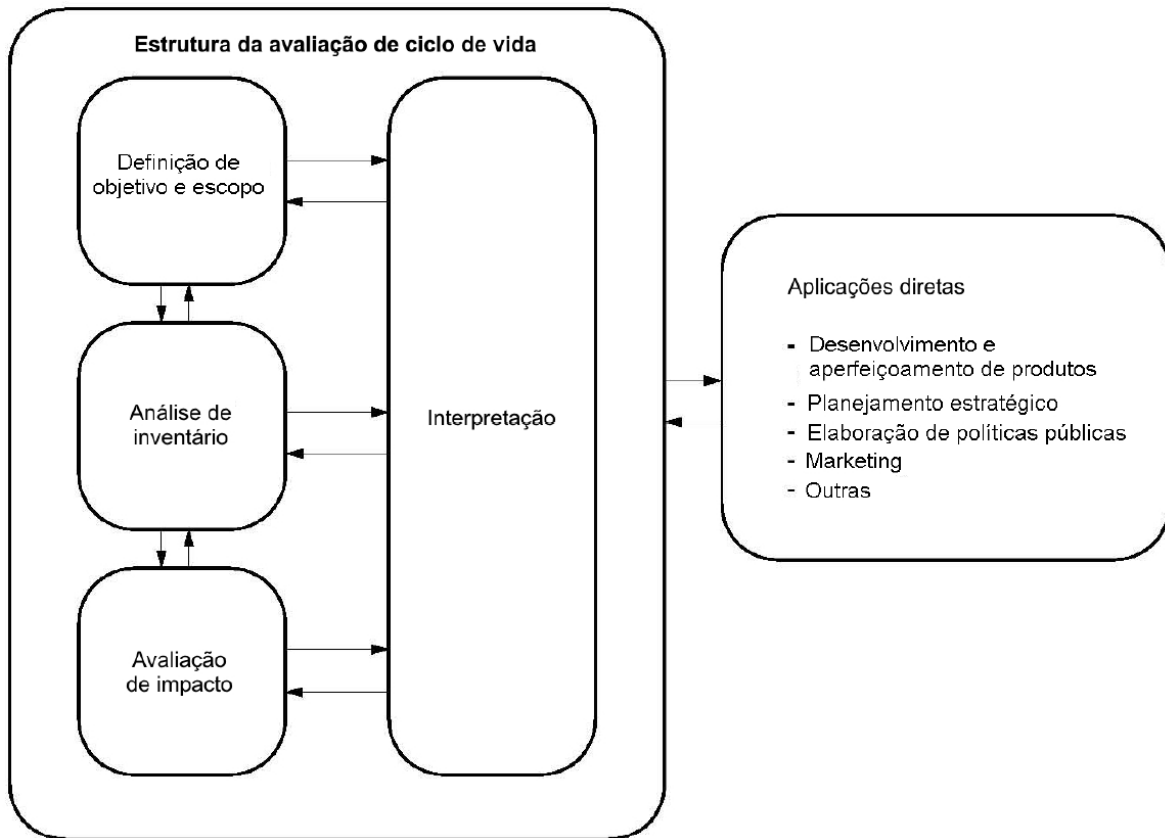
É crescente a conscientização com relação à previsão e prevenção de impactos ambientais relacionados à construção civil. Dessa forma, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com estes impactos. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV pode identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos e serviços em diversos pontos de seus ciclos de vida, assim como selecionar indicadores de desempenho ambiental relevantes, auxiliando os tomadores de decisão nas organizações governamentais ou não-governamentais, visando, por exemplo, à definição de prioridades e ao planejamento estratégico (GUINÉE et al., 2011).

A ACV enfoca os impactos ambientais potenciais, como por exemplo, o uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final. O escopo de uma ACV inclui a fronteira do sistema e o nível de detalhamento e depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A abrangência da ACV pode variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular.

### *2.2.2. Fases da avaliação do ciclo de vida*

O estudo de ACV é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto; e interpretação (ABNT, 2009a). O relacionamento entre as fases da ACV está ilustrado na Figura 2.11.

Figura 2.11. Fases de uma ACV.



Fonte: ABNT (2009a).

#### 2.2.2.1. Definição de objetivo e escopo

Segundo a ABNT (2009a), o objetivo de uma ACV envolve a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo, o público-alvo (aquele a quem se pretende comunicar os resultados do estudo), e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

O escopo, por sua vez, inclui os seguintes itens: sistemas a serem estudados; funções dos sistemas; unidade funcional; fronteira do sistema; procedimentos de alocação; categorias de impacto e metodologia para avaliação de impactos e interpretação; requisitos de dados; pressupostos; limitações; requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados; e tipo de análise crítica.

A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas do sistema. O principal propósito da unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas, assegurando a comparabilidade dos resultados de ACV.

A fronteira do sistema define os processos elementares a serem incluídos. Segundo Ribeiro (2015), as etapas do ciclo de vida podem ir desde a extração das matérias-primas para a sua fabricação (“berço”), até a disposição final dos resíduos (“túmulo”) e podem ainda envolver estágios intermediários, definidos pelos processos de manufatura envolvidos até a saída do produto da fábrica, transporte ao local de uso e operação. Há também a possibilidade de reciclagem dos materiais com reaproveitamento no mesmo ciclo. Sendo assim, um estudo de ACV pode envolver todas essas etapas (do “berço” ao “túmulo”) ou apenas parte delas.

Faz-se necessário que diversos estágios do ciclo de vida, processos unitários e fluxos elementares sejam levados em consideração, tais como: aquisição de matérias-primas; entradas e saídas na cadeia principal de processamento; transporte; produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor; uso e manutenção; disposição final de resíduos de processos; recuperação de produtos usados (incluindo reuso, reciclagem e recuperação de energia); manufatura de materiais auxiliares; manufatura, manutenção e descomissionamento de equipamentos; e operações adicionais, como iluminação e aquecimento.

#### 2.2.2.2. Análise de inventário de ciclo de vida

A análise de inventário de ciclo de vida envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema. Com relação à coleta de dados, esta inclui entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas; produtos, co-produtos e resíduos; emissões atmosféricas, descargas para a água e solo; e outros aspectos ambientais.

Os procedimentos de cálculo incluem a validação dos dados coletados, a correlação dos dados aos processos elementares, e a correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional. Esses procedimentos são necessários para gerar os resultados do inventário, para cada processo elementar, referidos à unidade funcional estabelecida.

Existem três métodos principais de inventário de ciclo de vida (ICV), que são: modelagem baseada em processos (*Process based modeling*), entrada/saída (*Input Output*) e método híbrido (*Hybrid method*). Estudos da literatura apresentam certa heterogeneidade em relação à escolha do método, o que acaba resultando em diferentes impactos ambientais para um mesmo produto (ISLAM et al., 2016).

Segundo Islam et al. (2016), dois pontos são considerados importantes ao se comparar diferentes métodos de ICV: precisão e integridade do limite. Em geral, a modelagem baseada em processos oferece maior precisão, porém, não possui integridade nos limites do sistema; o método *Input Output* oferece integridade nos limites, mas enfrenta incerteza quanto aos dados; enquanto o método híbrido oferece maior precisão e integridade de limite, mas sofre com a dupla contagem de dados e a complexidade matemática.

A modelagem baseada em processos é uma abordagem direta da compilação de inventário por meio da análise de processos. Existem dois métodos nessa categoria: o diagrama de fluxo de processo e o método da matriz. O método *Input Output* se mostra mais rápido em relação à modelagem baseada em processos, visto que utiliza referências de bancos de dados já disponíveis. Porém, uma limitação desse método é que os bancos de dados não estão disponíveis no nível necessário de detalhes (SUH; HUPPES, 2005).

O método híbrido – que é a ligação entre a modelagem baseada em processos e o método *Input Output*, por sua vez, surgiu quando os profissionais perceberam que o consumo de energia indireto é tão importante quanto o consumo de energia direto para análise de energia líquida para produzir um produto (MORIGUCHI et al., 1993). Existem três diferentes tipos de métodos híbridos: híbrido em camadas (*tiered hybrid*) ou híbrido baseado em processos; híbrido baseado em *Input Output* e híbrido integrado (SUH; HUPPES, 2005).

A fim de resolver o problema da dupla contagem de dados, o método híbrido baseado em *Input Output* foi introduzido por Treloar (1997). Esse método é executado por meio da extração de caminhos específicos da matriz *Input Output* e substituindo esses caminhos por dados de modelagem baseados em processos.

Porém, o método ainda sofre com o mesmo problema de incerteza devido a dados de entrada e saída não atualizados e a falta de informações sobre novas tecnologias (JIANG

et al., 2014). Para reduzir a incerteza no método híbrido baseado em *Input Output*, surge outro método híbrido denominado de híbrido integrado. Este método é derivado de uma estrutura de produção e uso para o sistema baseado em processos e baseado em dados *Input Output*, e vincula-os por meio de fluxos que cruzam a fronteira entre os dois sistemas por meio de matrizes de corte *downstream* e *upstream*. Esse modelo permite uma alocação consistente e evita a contagem dupla (SUH; HUPPES, 2005). Porém, devido à maior complexidade computacional, requisitos de dados e tempo, esse método só é adotado para tomada de decisão a longo prazo (ISLAM et al., 2016).

Comparando todos os métodos de ICV, percebe-se que o método de matriz é superior ao método do diagrama de fluxo de processo, particularmente para os sistemas mais simplificados. O método *Input Output* puro em geral é mais adequado para resultados mais rápidos. No entanto, quando a modelagem baseada em processos e o método *Input Output* são comparados com a análise híbrida em camadas (*tiered hybrid*), a última fornece resultado mais confiável com relação à integridade do sistema. No entanto, neste método, a conexão entre o processo e os dados de entrada e saída é feita externamente, o que pode causar dupla contagem. Em contraste, a análise híbrida baseada em *Input Output* mostra maior resolução para o sistema baseado em entradas e saídas e não tem problemas de sobreposição. Por fim, o método híbrido integrado, por possuir informações sobre o valor monetário apenas para fluxos de corte e com disponibilidade aprimorada de dados de entrada e saída, torna-se a melhor escolha, embora o método seja bastante caro (SUH; HUPPES, 2005; ISLAM et al., 2016).

Constata-se que a escolha de um método apropriado pode aumentar a confiabilidade do resultado e redução de erros, requisitos de tempo e complexidade. Além disso, não existe um método específico de ICV que seja superior a todos os outros, mas decisões podem ser tomadas para selecionar a ferramenta mais relevante com base no objetivo e no escopo, além de recursos e tempo disponíveis (SUH; HUPPES, 2005; ISLAM et al., 2016).

### 2.2.2.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados da análise do inventário. Nesse processo, associam-se os dados de inventário com categorias de impacto

específicas e indicadores de categoria, a fim de se compreender melhor tais impactos. A fase de avaliação de impacto também fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida.

De acordo com a NBR 14044 (ABNT, 2009b), a fase de AICV apresenta elementos obrigatórios e opcionais. Os elementos obrigatórios, responsáveis por transformar os resultados da análise de inventário em resultados dos indicadores de categoria, são:

- seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- correlação dos resultados às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

Os elementos opcionais, por sua vez, objetivam a normalização, agrupamento ou ponderação dos resultados dos indicadores de categoria, além da análise de qualidade dos dados, sendo eles:

- cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência (normalização);
- agrupamento;
- ponderação;
- análise da qualidade dos dados.

A relação do produto ou sistema analisado no estudo de ACV com questões ambientais é demonstrada através da caracterização das categorias de impacto. Guinée et al. (2011) citam como exemplos: exaustão de recursos; potencial de aquecimento global; potencial de redução da camada de ozônio; acidificação; toxicidade humana; potencial de nutrificação; entre outros.

As categorias de impacto do ciclo de vida são classificadas de acordo com sua abordagem, podendo ser do tipo *midpoint* (ponto médio) ou *endpoint* (ponto final). O *endpoint* é efeito final do sistema, enquanto *midpoint* são efeitos intermediários, determinados em termos de indicadores.



Segundo Bare et al. (2000), categorias *endpoint* são direcionadas ao dano e geralmente são consideradas mais compreensíveis para os tomadores de decisão, apresentando mais relevância na tomada de decisão, embora possuam maior subjetividade. As categorias *midpoint*, por outro lado, apresentam menor subjetividade, porém possuem menor relevância no suporte à tomada de decisão.

Cavalett et al. (2013) afirmam que a nível *midpoint* todos os parâmetros referentes ao inventário de ciclo de vida são agregados em categorias de impacto adequadas na cadeia de causa e efeito do mecanismo ambiental. Estas categorias não representam as consequências finais das emissões listadas no inventário, mas são indicadores de impacto em potencial. As categorias *endpoint* consistem em caracterizar as consequências das categorias de impacto de ponto médio nas áreas a nível de ponto final. Segundo a ABNT (2009a), o ponto final da categoria é um atributo ou aspecto do ambiente natural, saúde humana ou recursos que identifica uma questão ambiental merecedora de atenção. Dessa forma, a caracterização a nível *endpoint* exige a conexão dos resultados do inventário com o respectivo impacto, sendo quantificados os danos finais das emissões.

#### 2.2.2.4. Interpretação do ciclo de vida

A interpretação é a fase da ACV em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto. A fase de interpretação da ACV deve fornecer resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos e que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações. As constatações dessa interpretação podem tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisão (ABNT, 2009a).

#### 2.2.3. *Uso de programas computacionais*

Tendo em vista o aumento na complexidade da quantificação de impactos e dos cálculos envolvidos em uma ACV, o uso de programas computacionais vem se tornando cada vez mais comum. Esses programas auxiliam o desenvolvimento de estudos de ACV e produzem resultados com maior agilidade e confiabilidade. Tais ferramentas agregam

bancos de dados para inventários de ciclo de vida e gerenciam modelos de avaliação de impacto de ciclo de vida.

Existem diferentes opções de *software* disponíveis no mercado. Entre eles, podem ser citados *SimaPro (PRé Consultants)*, *GaBi (Think Step)*, *OpenLCA (Green Delta)*, *Umberto (Ifu Hamburg)*, *Quantis Suite (Laboratoires CEETAL)* e *TEAM (Ecobilan)*. Segundo Kabulsch (2011), cabe ao pesquisador verificar qual programa computacional melhor se enquadra nos objetivos do estudo de ACV a ser desenvolvido.

#### 2.2.4. ACV em estudos de pavimentação

Azarijafari et al. (2016) destacam o grande aumento no número de estudos sobre a avaliação do ciclo de vida de pavimentos convencionais. A literatura atual demonstra uma ampla gama de implicações nas cargas ambientais associadas aos pavimentos (PRATICÒ et al., 2010; SANTERO et al., 2010; GIUSTOZZI, et al., 2012). Chiu et al. (2008) demonstraram que ações visando o desenvolvimento sustentável em projetos de construção de pavimentos podem levar à redução de emissões de gases de efeito estufa e seu custo de ciclo de vida. No entanto, ainda restam conceitos imaturos, que necessitam de mais pesquisas nos próximos anos, em diferentes etapas da avaliação do ciclo de vida dos pavimentos. Um dos campos ainda pouco explorado é o de pavimentos permeáveis. Poucos estudos na literatura são encontrados a respeito do ciclo de vida destes pavimentos e os benefícios ambientais que podem ser alcançados através da retenção de água e consequente diminuição dos problemas relacionados a inundações e recargas hídricas.

A ACV é uma ferramenta apropriada que pode ajudar os projetistas a lidar com os aspectos ambientais de seus pavimentos para alcançar o objetivo de construção de pavimentos mais sustentáveis. De fato, a ACV ajuda a quantificar, analisar e comparar os impactos ambientais de diferentes tipos de pavimento, desde a extração do material até o fim da vida útil (CALTRANS, 2010).

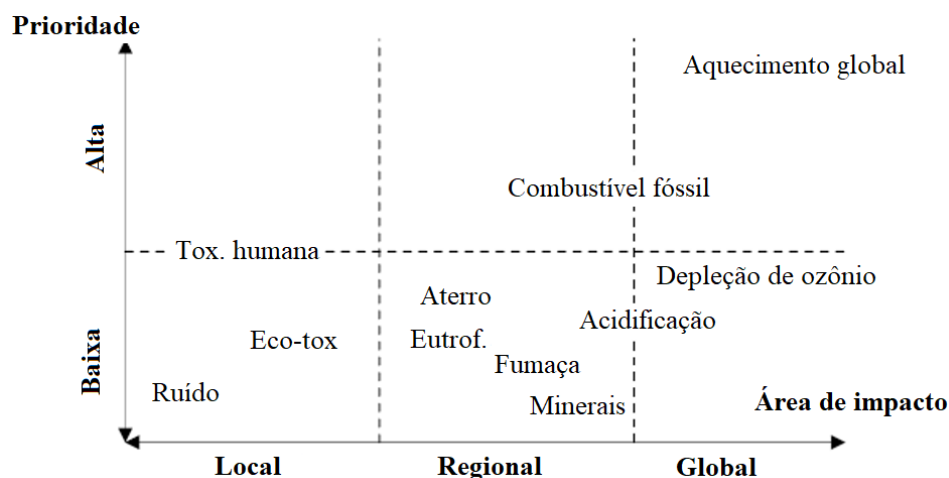
AzariJafari et al. (2016) compararam publicações envolvendo a ACV de diversos tipos de pavimentos. Os resultados mostram heterogeneidade significativa de unidades funcionais e outros componentes. As normas de ACV, como a ISO 14040 e 14044, não possuem detalhes técnicos sobre, por exemplo, fases e processos que devem ser incluídos na avaliação, vida útil que deve ser analisada ou quais são os dados mínimos que devem ser

considerados na modelagem da ACV. Além das inconsistências entre as publicações, as diferenças significativas nos resultados do impacto ambiental calculados do ciclo de vida tornam a comparação dos resultados dos estudos simplesmente impossível.

Anualmente, aproximadamente 150 bilhões de dólares e 320 milhões de toneladas de materiais de construção são investidos na construção, reabilitação e manutenção de pavimentos nos Estados Unidos. Porém, muito pouco se sabe sobre os danos ambientais causados pela construção desses pavimentos (HOLTZ; EIGHMY, 2000). Alguns estudos mostram que o tipo de pavimento pode influenciar no consumo de combustível dos veículos (SANTOS et al., 2014; TAYLOR; PATTEN, 2002). Taylor e Patten (2002) mostraram que pavimentos construídos com concreto a base de cimento Portland podem diminuir a quantidade de combustível consumida quando comparados a pavimentos construídos com asfalto pré-misturado a quente (PMQ).

Huang et al. (2009) desenvolveram uma ferramenta de avaliação de ciclo de vida para auxiliar na construção e manutenção de pavimentos asfálticos. A estrutura da ACV era composta por parâmetros do processo (energia consumida no transporte, produção dos materiais e na construção do pavimento), parâmetros do pavimento (dimensão, materiais utilizados, vida útil), unidade, inventário do projeto e resultados de caracterização. Os resultados são divididos em diferentes categorias, tais como depleção de minerais e combustíveis fósseis, depleção da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, formação de foto-oxidante, toxicidade humana, eco-toxicidade, eutrofização, entre outros. O estudo propôs um método de agrupamento e ponderação das categorias, de acordo com os "Eco-pontos" desenvolvidos pela *Building Research Establishment* (Reino Unido) para o setor da construção, conforme ilustra a Figura 2.12.

Figura 2.12. Agrupamento e ponderação de categorias de impacto ambiental da ACV.

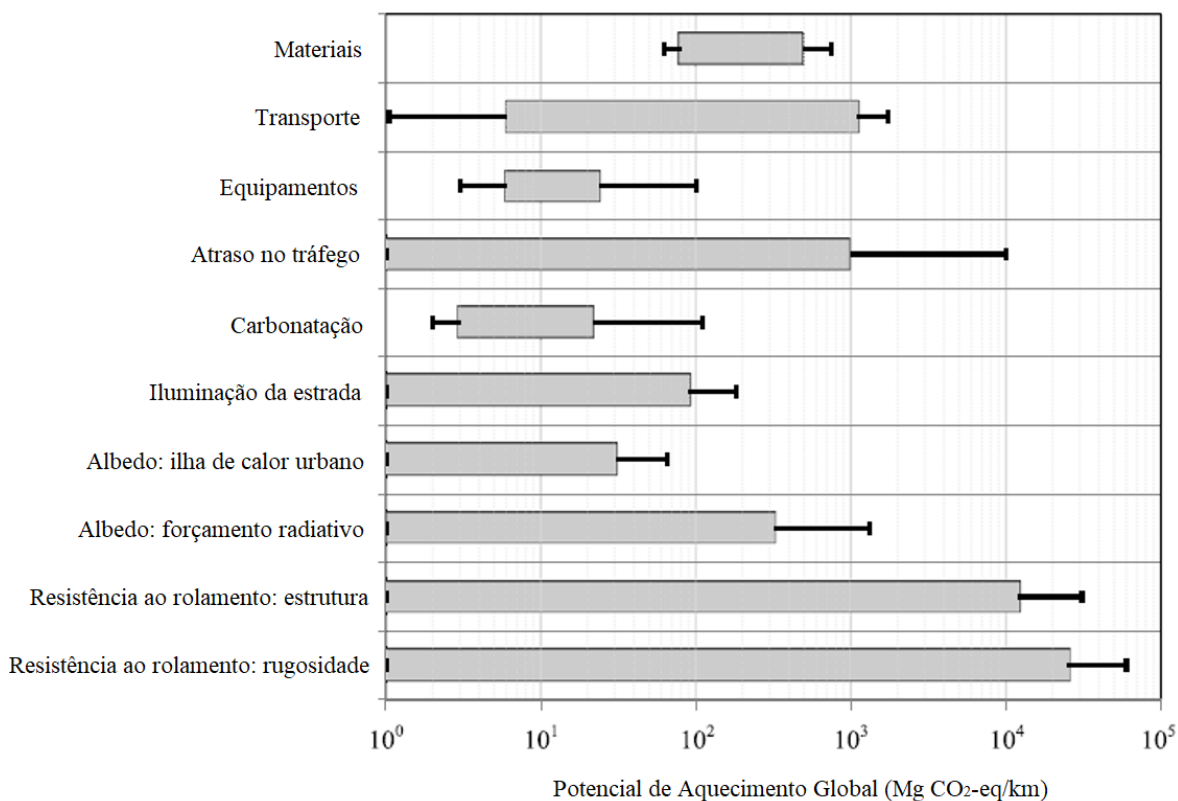


Fonte: Huang et al. (2009).

Huang et al. (2009) utilizaram a metodologia proposta de ACV para realizar um estudo de caso, investigando os impactos ambientais do ciclo de vida da pavimentação asfáltica em uma rodovia, na qual os agregados naturais foram parcialmente substituídos por resíduos de vidro e cinzas de incineração. Os resultados foram comparados ao pavimento convencional de mesmo tamanho e função, mas usando apenas agregados virgens. A mistura asfáltica, a produção de ligante e os agregados consumiram aproximadamente 62%, 23% e 6% da energia total, respectivamente, e, conseqüentemente, produziram mais emissões do que os outros processos. O uso de materiais reciclados reduziu em cerca de 7% o consumo de ligante asfáltico. Outro benefício significativo da reciclagem foi a economia de 5.766 toneladas de agregados naturais e a reciclagem de 579 e 989 toneladas de resíduos de vidro e cinzas de incineração, respectivamente. O transporte de agregados representou mais de 61% de todo o uso de diesel, devido à longa distância de transporte (193 km). Trens com maior eficiência de combustível (0,17 MJ/ton.km) que caminhões (0,46–0,94 MJ/ton.km) foram usados para o transporte de agregados. Vidros e cinzas de incineração foram obtidos de fontes locais e o uso do diesel para o transporte de asfalto foi de apenas 17%, pois a rodovia localizava-se bastante próxima da usina de asfalto a quente (6,4 km). Os resultados deste estudo mostram a grande dependência da localização da rodovia a ser estudada e dos materiais utilizados na estrutura do pavimento, que interferem significativamente nos impactos ambientais do ciclo de vida.

Santero e Horvath (2009) avaliaram o potencial de aquecimento global de pavimentos convencionais nos Estados Unidos analisando diversos componentes, tais como: extração e produção de materiais, transporte, equipamentos utilizados, absorção de carbono, ilhas de calor, rugosidade da superfície do pavimento, resistência ao rolamento, albedo, entre outros. O resultado do estudo é ilustrado na Figura 2.13, que apresenta a emissão de gás carbônico (em Mg CO<sub>2</sub> equivalente) por quilômetro de pista ao longo de 50 anos. As barras cinza mostram as variações prováveis, enquanto as barras pretas mostram os valores extremos de cada componente. Os resultados demonstram a ampla gama de impactos possíveis para os componentes do ciclo de vida do pavimento. Este impacto varia de insignificamente pequeno a 60.000 Mg de CO<sub>2</sub> equivalente por quilômetro de pista ao longo de 50 anos.

Figura 2.13. Intervalos de impacto do potencial de aquecimento global do ciclo de vida do pavimento.



Fonte: Santero e Horvath (2009).

### 2.2.5. ACV em pavimentos permeáveis

Nos últimos anos, o uso de concreto permeável como material de pavimentação em aplicações rodoviárias de baixo volume ganhou importância devido a seus aspectos ambientais positivos. Devido ao aumento do uso de concreto permeável na indústria de pavimentos, há uma grande possibilidade de pesquisas futuras para melhor entender o material, tornando-o um material promissor para futuras estradas sustentáveis (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

Comparado com pavimentos de concreto convencionais, o processo de construção e as propriedades dos pavimentos permeáveis são diferentes em termos de materiais, métodos de construção e equipamentos, especialmente das perspectivas econômica e ambiental. Sabe-se que a produção de cimento é um processo que consome grande quantidade de energia, contribuindo com emissões significativas de CO<sub>2</sub> e de gases de efeito estufa. Em relação aos pavimentos de concreto convencionais, os pavimentos permeáveis resultam em uma redução significativa no consumo de cimento e, assim, aliviam os impactos ambientais negativos associados (XIE et al., 2019). Anastasiou et al. (2017) compararam a avaliação do ciclo de vida de um pavimento convencional de concreto em relação a um pavimento composto por blocos permeáveis. Os resultados indicam que a emissão total de CO<sub>2</sub> do pavimento convencional de concreto é de cerca de 110,0 kg CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>2</sup>, enquanto a emissão de CO<sub>2</sub> do pavimento com blocos permeáveis é de apenas 19,5 kg CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>2</sup>. Nesse cálculo, os materiais, transporte e produção/construção do pavimento convencional de concreto emitiram 92,5, 1,2 e 16,3 kg CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>2</sup>, respectivamente. Para o concreto permeável, no entanto, as emissões foram de apenas 18,9, 0,3 e 0,3 kg CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>2</sup>, respectivamente.

Wang et al. (2018) elaboraram um modelo de ACV que pode ser aplicado para pavimentos permeáveis tanto de asfalto quanto de concreto, a fim de avaliar os impactos ambientais causados por estes tipos de pavimento. Os impactos investigados no estudo eram relacionados a inundações urbanas, reciclagem da água pluvial e purificação da água. Os autores realizaram uma comparação entre a utilização de um pavimento asfáltico permeável e um pavimento asfáltico convencional em uma rodovia secundária típica de quatro pistas. Os resultados mostraram que, em 10 km da rodovia modelada, 49 TJ de

consumo de energia, 6.700 toneladas de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>, 0,1 tonelada de emissão de chumbo e uma tonelada de emissão de zinco poderiam ser evitadas caso o pavimento permeável fosse utilizado no lugar do pavimento convencional. O estudo mostrou que a redução mais significativa no consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa, emissões de chumbo e emissões de zinco ocorre na fase de utilização do pavimento. Além disso, em uma área de 200.000 m<sup>2</sup> (10 km x 20 m), o volume de água pluvial reciclado para o subsolo anualmente com o uso do pavimento permeável é de 154.000 m<sup>3</sup>.

Bhatt et al. (2019) avaliaram comparativamente o ciclo de vida de estratégias *LID* (*Low Impact Development*) instaladas em um estacionamento. O estudo considerou os impactos do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*), quantificando os custos ambientais da fabricação, construção, transporte, operação, manutenção e destinação final de três bacias de bioretenção e três sistemas de pavimentos permeáveis localizados em Mississauga, Ontário. Foi verificado 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. As estratégias *LID* ofereceram significativa diminuição no potencial de eutrofização, emissões não cancerígenas e ecotoxicidade, que são todas associadas principalmente aos benefícios da qualidade da água oferecidos pelas *LID*.

Os autores constataram ainda que os impactos causados pelas bacias de biorretenção são aproximadamente 90% inferiores aos dos pavimentos permeáveis devido ao seu maior tratamento de área impermeável em relação ao seu tamanho em comparação com o pavimento permeável. Os impactos normalizados mostram que os impactos negativos das estratégias *LID* são insignificantes em comparação com os benefícios que elas proporcionam. A comparação das *LIDs* com uma infraestrutura tradicional equivalente de tratamento revela que os impactos das *LIDs* do berço ao túmulo são aproximadamente 20% mais baixos do que os da infraestrutura tradicional e os benefícios acumulados pelas *LIDs* são aproximadamente 300% maior (BHATT et al., 2019).

Spatari et al. (2011) examinaram a redução no consumo de energia e a diminuição nas emissões de gases de efeito estufa através de uma estratégia selecionada de *LID* (*Low Impact Development*) usando a avaliação do ciclo de vida em um modelo de bacia urbana.

A estratégia de *LID* consistia em um *retrofit* das calçadas convencionais, sendo estas substituídas por pavimentos permeáveis. Foram estimadas redução anual de energia de 7,3 GJ e diminuição de 0,4 tonelada nas emissões de gases de efeito estufa para o *retrofit* implementado em um bairro da cidade de Nova York. Examinando os materiais utilizados na estratégia, a borracha e o concreto são os que mais contribuem para a energia incorporada (31% e 28%, respectivamente) e emissões de gases de efeito estufa (34% e 27%, respectivamente), enquanto a energia de transporte é responsável por aproximadamente 10% da energia do ciclo de vida dos materiais de construção e 17% das emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida. A economia anual é pequena em comparação com a intensidade de energia e gases de efeito estufa dos materiais, resultando em tempos lentos de retorno ambiental (os *paybacks* variaram de 70 a 180 anos). Esta análise preliminar sugere que, se implementadas ao longo de uma bacia hidrográfica urbana, as estratégias *LID* podem ter importantes economias de custo de energia para as instalações de controle de poluição da água, e podem avançar na redução de sua pegada de carbono.

Um estudo feito pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBSC, 2014), realizou a avaliação do ciclo de vida modular de blocos de concreto para pavimentos intertravados, que podem ser utilizados como revestimento de pavimentos permeáveis. O estudo estimou indicadores tais como uso de materiais, consumo de água e energia, emissão de CO<sub>2</sub> e geração de resíduos no processo de produção. Os dados foram coletados em 33 fábricas de blocos, localizadas em diferentes regiões do Brasil. Os resultados mostraram a grande variabilidade existente nos consumos, dependentes principalmente da forma de produção adotada pelas fábricas e também das dimensões dos blocos. O consumo energético variou de 50 a 810 MJ/m<sup>2</sup>, enquanto a emissão de CO<sub>2</sub> teve variação de 10 a 70 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. O consumo de água, por sua vez, teve variação de 0,01 a 0,91 litro/peça. Os resíduos gerados pelas fábricas são diversos, tais como madeira, plástico, papel, óleo, aço e material cimentício. O percentual de reciclagem praticada pelas empresas varia de 67 a 100%.

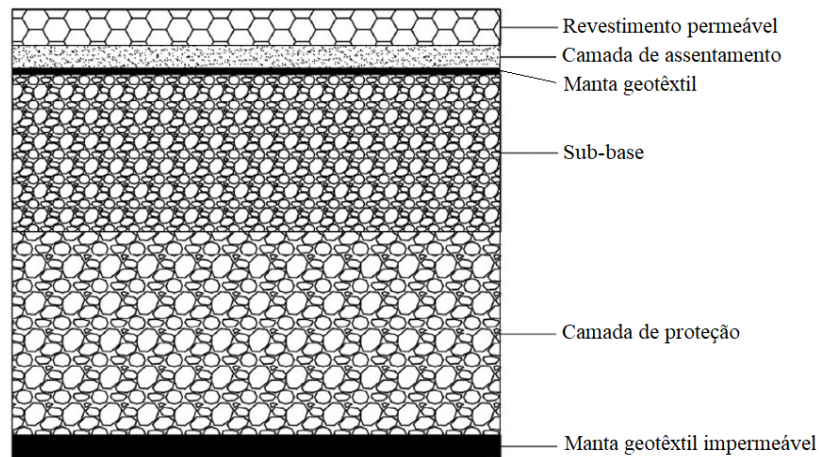
Li et al. (2018) avaliaram o ciclo de vida de diferentes sistemas de drenagem sustentáveis: pavimentos permeáveis, telhados verdes e *wetlands*. Indicadores em todos os estágios do ciclo de vida (construção, operação, manutenção e disposição final) foram



avaliados. Os resultados mostraram que o potencial de depleção abiótica, o potencial de acidificação e o potencial de aquecimento global dos três sistemas de drenagem obtiveram os maiores impactos em cada categoria: esgotamento de recursos, ecossistemas e saúde humana, respectivamente. O impacto na saúde humana está relacionado ao concreto usado na construção, impactando diretamente o esgotamento de recursos. O esgotamento de recursos também contribuiu significativamente para os danos ao ecossistema, enquanto a alta depleção abiótica é devida principalmente ao transporte de materiais. O estudo também mostrou que os pavimentos permeáveis contribuíram significativamente na redução de inundações, com taxa de controle de escoamento igual a 67,5%. Contudo, os pavimentos permeáveis obtiveram o maior valor para o potencial de depleção abiótica, devido principalmente ao maior uso de materiais de construção em sua estrutura.

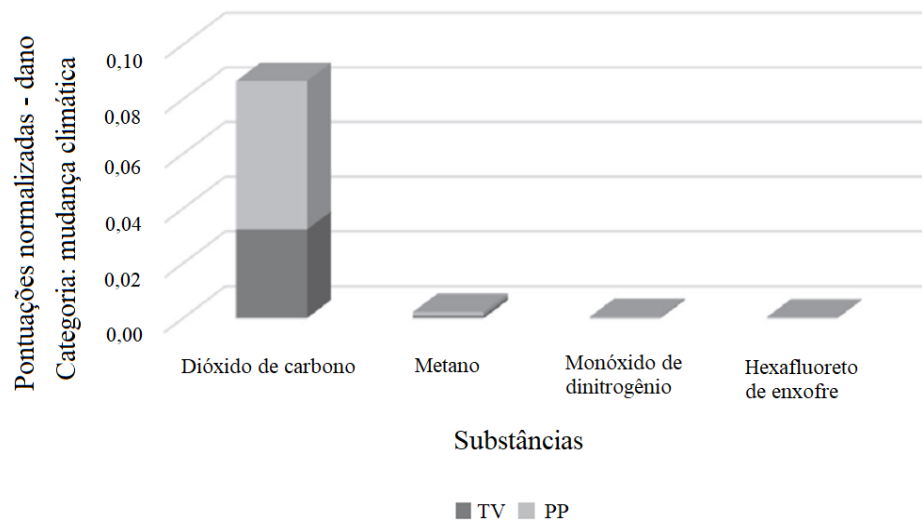
Maiolo et al. (2017) criaram uma metodologia baseada no índice de sustentabilidade a fim de avaliar o ciclo de vida de telhados verdes e pavimentos permeáveis implementados na Itália. A Figura 2.14 apresenta o esquema do pavimento permeável utilizado no estudo. A aplicação da ACV destacou que existem contribuições substanciais para as camadas constituídas por material natural (areia, cascalho), que têm impacto devido ao transporte do local de origem ao local de execução do sistema. Além disso, o ciclo de vida dos materiais poliméricos é igual para ambos os sistemas de drenagem, devido a fontes não renováveis de fornecimento de energia e tipos de transporte cuja classe energética não é particularmente competitiva. Uma confirmação deste fato é a de que a contribuição do dióxido de carbono tem uma porcentagem maior do que as emissões de outros gases (metano e monóxido de dinitrogênio), conforme mostra a Figura 2.15. Como conclusão, os autores afirmam que a comparação numérica entre os índices sustentáveis calculados mostra que as infraestruturas verdes analisadas são tecnologias que refletem adequadamente o objetivo de diminuir o impacto ambiental produzido pelas obras de sistemas de drenagem.

Figura 2.14. Estrutura do pavimento permeável utilizado no estudo.



Fonte: Maiolo et al. (2017).

Figura 2.15. Gases emitidos durante o ciclo de vida do pavimento permeável (PP) e telhado verde (TV).



Fonte: Maiolo et al. (2017).

Um estudo conduzido pela *Center for Neighborhood Technology (CNT)* e *American Rivers* (2010) mostrou que a temperatura do ar pode ser reduzida por pavimentos permeáveis, que absorvem menos calor do que os pavimentos convencionais. Ao reduzir o efeito de ilha de calor nos centros urbanos, esse resfriamento pode reduzir doenças e

fatalidades relacionadas ao excesso de calor durante eventos extremos de altas temperaturas e ondas de calor.

De Sousa et al. (2012) realizaram uma comparação da avaliação do ciclo de vida de três diferentes sistemas de drenagem nos Estados Unidos. O sistema 1 era composto por infraestruturas verdes, incluindo 27,12 ha de pavimentos permeáveis, 1,18 ha de bacias de biorretenção, 2,80 ha de plantas de infiltração, 1,06 ha de *rain gardens* e 8,54 ha de cisternas de subleito. Esta combinação foi coletivamente dimensionada para capturar os primeiros 2,5 cm de escoamento gerados a partir de aproximadamente um terço da área total de drenagem. A infraestrutura do sistema 1 ocupava cerca de 5% da área total. Os sistemas 2 e 3 eram do tipo “cinza”, sendo que o sistema 2 apenas retinha o escoamento em um tanque de detenção e lançava-o ao rio Bronx, enquanto o sistema 3 realizava também o tratamento antes de lançar ao rio. A instalação do sistema 1 emitiu 20.000 t CO<sub>2</sub>-eq, comparado com 31.500 t CO<sub>2</sub>-eq do sistema 2 e 100.000 t CO<sub>2</sub>-eq do sistema 3. Do total de emissões associadas à construção das infraestruturas verdes, as maiores contribuições vieram do transporte (8.500 t CO<sub>2</sub>-eq), seguidas pela produção de cimento e concreto (8.400 t CO<sub>2</sub>-eq).

O estudo apresentou ainda uma estimativa de emissão cumulativa para a fase de operação e manutenção dos sistemas em um período de 50 anos. As emissões líquidas da estratégia verde foram 19.000 t CO<sub>2</sub>-eq, enquanto as estratégias cinza emitiram 85.000 t CO<sub>2</sub>-eq (detenção) e 400.000 t CO<sub>2</sub>-eq (detenção e tratamento). Esses resultados foram significativamente influenciados pelas emissões associadas às atividades de operação e manutenção necessárias para as estratégias 2 e 3, e pelo sequestro de carbono fornecido pela vegetação na estratégia 1. Dessa forma, nota-se que as infraestruturas verdes têm desempenho ambiental superior quando comparadas aos sistemas de infraestrutura cinza.

Yuan et al. (2018) compararam os impactos ambientais e econômicos da fabricação de blocos permeáveis de pavimentação (com no mínimo 10% de porosidade) em comparação com blocos de pavimentação convencionais na China. A unidade funcional utilizada no estudo foi de 1 m<sup>2</sup>. Todos os insumos de matérias-primas, consumo de energia, transporte, resíduos e descarga de efluentes foram calculados usando a unidade funcional como uma linha de base para os dois tipos de processos de produção de blocos. Apenas a fase de produção dos blocos e a fase de aquisição das matérias-primas foram consideradas.

O custo econômico para produzir blocos de pavimento convencional e blocos permeáveis foi de 24,26 RMB<sup>1</sup> e 29,68 RMB por m<sup>2</sup>, respectivamente. Os resultados mostraram que o cimento foi o material que causou o maior impacto ambiental nos blocos permeáveis. Este impacto poderia ser otimizado pela redução do consumo. O resultado do cálculo mostrou que se o consumo de cimento fosse reduzido em 5%, o impacto ambiental global seria reduzido em cerca de 2,21%, e o custo de produção seria reduzido em 1,02 RMB. O coeficiente de permeabilidade dos blocos era de  $1,8 \times 10^{-2}$ . Dessa forma, durante um período de serviço de 3 anos, os blocos teriam uma capacidade de infiltração de água pluvial de 2,01 m<sup>3</sup> a cada 1 m<sup>2</sup> de área.

Lu et al. (2019) avaliaram o consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa de três tipos de pavimentos com diferentes materiais em suas superfícies: pavimento asfáltico impermeável (*stone mastic asphalt SMA-13*), pavimento asfáltico permeável (*porous asphalt*) e pavimento permeável com poliuretano utilizado como ligante (*polyurethane-bound porous pavement*). As propriedades principais (materiais, tamanho dos grãos e distribuição) estão listadas na Tabela 2.3. Nota-se que o SMA-13 possui distribuição bem graduada, com predominância de agregados graúdos. Os pavimentos permeáveis, por sua vez, são compostos principalmente por agregados graúdos pouco graduados e com pouco ou nenhum agregado fino adicionado.

Tabela 2.3. Propriedades dos diferentes pavimentos estudados.

Materiais	Tamanho dos grãos (mm)	Porcentagem em massa (%)		
		SMA-13	Asfalto permeável	Asfalto permeável com poliuretano
Calcário	0 – 0,063	8	4	2
	0,063 - 2	12	4	8
Diabásio	2 – 5,6	15	7	41
	5,6 - 8	55	85	49
	8 – 11,2	10	0	0

Fonte: Lu et al. (2019).

Os autores avaliaram o ciclo de vida durante as fases de extração das matérias-primas, construção, operação, manutenção e reabilitação dos pavimentos. Para calcular o

<sup>1</sup> Em 05/12/2019 1,00 RMB equivale a R\$ 0,60.

consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, foram utilizados os parâmetros volume médio diário anual (VMDa) de tráfego e o índice de rugosidade internacional (IRI) dos pavimentos. Conclui-se que com valores relativamente baixos de IRI, o *SMA-13* contribui com o maior consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa, enquanto o pavimento permeável com poliuretano como ligante teve o menor impacto ambiental. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre o *SMA-13* e o pavimento asfáltico permeável. Tais resultados podem ser explicados principalmente pelo procedimento de mistura a frio do pavimento com poliuretano, no qual o polímero pode ser misturado com agregados sem aquecimento. No entanto, não há diferença entre o *SMA-13* e o pavimento asfáltico permeável, pois durante a produção, apenas a graduação dos agregados tem diferença, enquanto os outros procedimentos durante a pavimentação são similares para os dois tipos de pavimento.

#### *2.2.6. Análise do custo de ciclo de vida em pavimentos permeáveis*

Há poucos dados publicados sobre a análise do custo de ciclo de vida de pavimentos permeáveis que incluem custos reais e desempenho. A maioria dos estudos está limitada a análises comparativas de custos iniciais para pavimentos permeáveis em comparação com pavimentos convencionais, o que indica que o custo de construção de pavimentos permeáveis é maior do que o custo de pavimentos convencionais. No entanto, alguns estudos indicam que os custos totais iniciais são semelhantes ou menores porque os pavimentos permeáveis não requerem sistemas de drenagem de água pluvial (CALTRANS, 2010).

Segundo Mei et al. (2018), os governantes enfrentam a tarefa cada vez mais difícil de planejar sistemas de gestão de águas em centros urbanos, principalmente em relação às incertezas das mudanças climáticas e socioeconômicas. Isso exige que os tomadores de decisão planejem a infraestrutura de gerenciamento de água pluvial a partir de pontos de vista econômicos e de adaptação. Para uma área específica, considerando a macrodrenagem de uma região, várias opções de infraestruturas verdes são possíveis dentro do escopo do planejamento. No entanto, os sistemas possuem diferentes impactos e custos hidrológicos,

tornando-se necessárias avaliações integrando a sustentabilidade e o custo-benefício desses sistemas.

A Caltrans (2010) realizou uma análise do custo de ciclo de vida para entender as implicações de custo da construção e manutenção de pavimentos permeáveis. Os dados de entrada para os modelos foram obtidos a partir de pesquisas de laboratório e modelagem de desempenho em programas computacionais. Uma avaliação detalhada do ciclo de vida não pôde ser realizada devido à insuficiência de dados disponíveis sobre a construção, desempenho de longo prazo, manutenção e valor de recuperação de pavimentos permeáveis e *Best Management Practices (BMPs)* atualmente usadas para o gerenciamento de água pluvial. Dois cenários foram considerados no estudo: um *retrofit* da drenagem de uma rodovia de alta velocidade e uma rodovia de baixa velocidade ou estacionamento. Ambos os cenários compararam pavimentos convencionais com tratamento convencional (*BMP*) *versus* o uso de pavimentos permeáveis. Os resultados indicam que os pavimentos permeáveis são potencialmente mais rentáveis do que as tecnologias *BMP* atualmente disponíveis. Estes resultados foram usados para preparar projetos preliminares de pavimentação para estudos piloto de pavimento permeável na Califórnia e para identificar sob quais condições eles são apropriados para uso. Entretanto, uma avaliação mais abrangente do ciclo de vida deve ser realizada após a conclusão dos estudos piloto.

Kluck et al. (2010) destacam que na Holanda utiliza-se pavimentos com superfície permeável a fim de reduzir os ruídos produzidos pelo tráfego. Porém, os pavimentos permeáveis possuem vida útil menor que os pavimentos tradicionais, causando frequentes manutenções e aumentando os custos e assim causando danos econômicos e ambientais. O estudo conduzido pelos autores tinha como objetivo substituir o ligante tradicional utilizado no pavimento permeável por ligantes sintéticos, a fim de aumentar a vida útil do sistema. Considerando o valor presente líquido do investimento, concluiu-se que o valor do pavimento permeável produzido com os ligantes sintéticos custa o mesmo que o pavimento convencional, porém com um ciclo de vida até dez vezes maior, o que traz benefícios ambientais e econômicos para o sistema de drenagem dos centros urbanos holandeses.

Os benefícios econômicos dos pavimentos permeáveis podem ser apreciados quando a análise de custo do ciclo de vida é realizada. No entanto, devido à falta de testes em larga escala, dados de desempenho de longo prazo e dados de custo de construção e

manutenção, tem sido difícil realizar a análise do custo do ciclo de vida, sendo necessárias diversas suposições. Wang et al. (2010) compararam sistemas de pavimentos permeáveis com sistemas convencionais de gerenciamento de água pluvial usados nas margens das rodovias. Os pavimentos permeáveis reduziram os custos do ciclo de vida em até 30%. Em outro estudo conduzido por Terhell et al. (2015), com base nos dados obtidos de várias agências, verificou-se que pavimentos permeáveis podem economizar até US\$64.649,00, considerando custo de instalação e US\$3.788.856,00 em benefícios de tratamento de água pluvial ao longo de 25 anos em comparação com pavimentos convencionais, em uma área de ½ acre (aproximadamente 20.000 m<sup>2</sup>). A redução no custo de construção é atribuída principalmente ao fato de que pavimentos permeáveis não exigem drenos laterais, sobreposições e assim por diante.

A fim de comparar a eficácia no controle de inundações e o custo-benefício de infraestruturas verdes, Mei et al. (2018) avaliaram a implementação de pavimentos permeáveis, telhados verdes, *wetlands* e bacias de biorretenção na China. A ordem crescente de eficácia do controle de inundação para a área estudada foi: telhado verde, pavimento permeável, *wetland* e bacia de biorretenção. Esta sequência está relacionada tanto às características da área de estudo quanto às propriedades das práticas específicas das infraestruturas verdes. A implementação da combinação das quatro práticas resultaria em redução de 80,6% do fluxo de pico. O estudo também contemplou o custo do ciclo de vida dos sistemas, considerando as fases de projeto, planejamento, construção, operação e benefícios trazidos pelas estratégias. A ordem crescente de custo do ciclo de vida foi *wetland* (US\$ 31,72/m<sup>2</sup>), pavimento permeável (US\$ 98,48/m<sup>2</sup>), bacia de biorretenção (US\$ 186,90/m<sup>2</sup>) e telhado verde (US\$ 317,10/m<sup>2</sup>). Como conclusão, obteve-se que a combinação de pavimentos permeáveis com bacias de biorretenção e *wetlands* é recomendada como a melhor estratégia em termos de controle de inundações e custo-benefício para o local de estudo.

Chui et al. (2016), por sua vez, verificaram que o custo do ciclo de vida dos sistemas de drenagem dependem do local onde são implementados, sendo que no caso estudado, os valores calculados para o custo do ciclo de vida dos sistemas foram menores na cidade de Hong Kong (China) quando comparados a Seattle (EUA). Os custos efetivos para a redução do escoamento foram de 0,02 L/10<sup>3</sup> US\$, 0,15 L/10<sup>3</sup> US\$ e 0,93 L/10<sup>3</sup> US\$,

para os sistemas de telhado verde, bacia de biorretenção e pavimento permeável na cidade de Hong Kong, enquanto na cidade de Seattle os valores foram de 0,03 L/10<sup>3</sup> US\$, 0,29 L/10<sup>3</sup> US\$ e 1,58 L/10<sup>3</sup> US\$, respectivamente. Nota-se que os valores encontrados por Chui et al. (2016) mostram uma ordem contrária de custo-benefício quando comparados ao estudo publicado por Mei et al. (2018). Chui et al. (2016) concluem que a relação entre a redução do escoamento de água pluvial e o custo do pavimento permeável forma uma curva "S", ou seja, seu design ideal tende a ter uma área menor e uma superfície de pavimento mais fina. No entanto, para eventos de chuvas mais intensos, é mais econômico expandir a área do que aumentar a profundidade. O pavimento permeável obteve o melhor custo-benefício para a redução do escoamento entre as três estruturas estudadas. Dessa forma, esse tipo de pavimento é recomendado para locais em que o gerenciamento de água pluvial é o objetivo principal.

#### *2.2.7. ACV em estudos de sistemas hidráulicos prediais*

Assim como visto na seção 2.1.4, é crescente o número de estudos que avaliam a possibilidade de utilizar a água infiltrada por pavimentos permeáveis para usos não potáveis em edificações, como descarga de vasos sanitários, rega de jardins, lavagem de carros, entre outros.

Para que isso aconteça, faz-se necessária a instalação de um sistema hidráulico que leve a água infiltrada pelo pavimento até um reservatório inferior, passando primeiramente por um tratamento adicional. Do reservatório inferior, esta água segue por bombeamento para um reservatório superior e, deste, segue para os aparelhos sanitários de uso não potável da edificação.

Todo este sistema hidráulico gera impactos ambientais, desde a extração das matérias primas para produção até a sua disposição final. Faz-se necessária, então, a compreensão dos impactos causados. Dessa forma, esta seção traz uma breve revisão sobre estudos de ACV de sistemas hidráulicos prediais.

Marinoski e Ghisi (2018) analisaram a viabilidade ambiental e econômica de sistemas de aproveitamento de água pluvial para um projeto de uma edificação residencial de baixo padrão localizada em Florianópolis, SC, através de conceitos de ACV. A avaliação comparou um cenário em que existia somente sistema hidráulico predial que utiliza água



potável da rede pública, e outro cenário em que a edificação possuía sistema hidráulico predial complementado por aproveitamento de água pluvial. O sistema de aproveitamento de água pluvial foi analisado com três diferentes opções de materiais para o reservatório inferior: plástico reforçado com fibra de vidro, polietileno de alta densidade e concreto armado. A avaliação ambiental considerou a quantidade de matérias primas utilizadas, energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub>. Foi verificado que, mesmo considerando a economia de água potável, os sistemas hidráulicos prediais complementados por aproveitamento de água pluvial utilizam mais energia embutida ao longo do ciclo de vida e geram mais emissões de CO<sub>2</sub> nos processos de fabricação de seus componentes, ocasionando maiores impactos ambientais. Dentre os sistemas com aproveitamento de água pluvial, o reservatório de plástico com fibra de vidro se mostrou o mais viável ambientalmente. Porém, os sistemas com reservatório de concreto armado foram os mais viáveis economicamente.

Ribeiro (2015) desenvolveu um método baseado em análise do ciclo de vida a fim de avaliar o impacto ambiental da implantação de sistemas integrados de aproveitamento de água pluvial e água cinza em habitações residenciais unifamiliares. A avaliação de impactos do ciclo de vida foi realizada por meio dos métodos *ReCiPe* e *CML 2 baseline 2000* gerenciados pelo programa *SimaPro versão 7.3*. As categorias de impacto escolhidas para a análise foram categorias relativas à saúde humana (potencial de aquecimento global/mudanças climáticas e depleção da camada de ozônio, radiação ionizante), à qualidade dos ecossistemas (acidificação, ecotoxicidade, eutrofização, toxicidade humana, transformação do ambiente natural) e a recursos (depleção de recursos minerais, recursos fósseis e mananciais). Através da análise comparativa dos cenários com o método *ReCiPe endpoint* (pontuação única), o resultado mostrou que o ciclo de vida do cenário de fornecimento de água com sistema convencional possui impacto global maior que o ciclo de vida do cenário com sistema integrado. Além disso, mostrou-se que a fase de operação (energia para o tratamento, coleta e recalque de água potável e esgoto) foi a responsável pela maior parcela dos impactos para as categorias avaliadas nos dois cenários.

Kalbusch (2011) propôs um método para verificação dos impactos ambientais quando da substituição de equipamentos em Programas de Uso Racional da Água. Foram quantificados os impactos ambientais no ciclo de vida de equipamentos hidrossanitários e

verificada a viabilidade ambiental da substituição de equipamentos convencionais por equipamentos economizadores de água que cumpram a mesma função nos sistemas prediais hidrossanitários analisados. O estudo considerou as fases de produção, uso e disposição final com quantificação das entradas referentes a matérias-primas, água e energia e saídas como emissões atmosféricas, no solo e na água. As categorias de impacto analisadas foram potencial de aquecimento global, potencial de redução da camada de ozônio, toxicidade humana, acidificação, consumo de água e consumo de energia total. O estudo demonstrou que é ambientalmente viável a substituição das torneiras convencionais por torneiras economizadoras de água no edifício em estudo, pois os impactos ambientais foram menores quando houve a substituição de equipamentos.

Outros estudos contemplam a avaliação do ciclo de vida em sistemas hidráulicos prediais e demonstram o potencial desta metodologia para a análise comparativa de serviços, processos e tecnologias (MORALES-PINZÓN et al., 2012; KALBUSCHI; GHISI, 2012; ANGRILL et al., 2011). Segundo Ribeiro (2015), a avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta de apoio à decisão para projetistas, empresários, pesquisadores e gestores do setor de abastecimento de água, além de contribuir para a recomendação de potenciais medidas de mitigação de impactos ambientais e para o incentivo da construção de habitações mais sustentáveis.

#### *2.2.8. Limitações da ACV*

Embora seja considerada adequada e confiável para avaliação de impactos ambientais, a metodologia de ACV apresenta diversas limitações. Algumas delas são a idade dos dados ou falta de dados que reflitam a realidade local. Nesses casos, há a necessidade da utilização de dados disponíveis de outros locais, o que pode não representar os verdadeiros impactos na região em estudo. Além disso, alterações nas fronteiras do sistema considerado podem ser feitas devido à falta de dados, o que influencia no objetivo e escopo do estudo.

Segundo Kalbusch (2011), o Brasil ainda carece de dados sobre impactos ambientais de diversos tipos de matérias-primas, de avaliação de operação de produtos, de impactos relativos ao descarte final, entre outras fases do ciclo de vida. Zocche (2014) atribui como fator mais relevante em relação às limitações que a ACV enfrenta no Brasil a

falta da construção de banco de dados genuinamente brasileiros, que segundo a autora faria da ACV um instrumento bastante efetivo para a introdução definitiva da variável ambiental no processo gerencial de tomada de decisão.

De acordo com a NBR 14040 (ABNT, 2009a), outras limitações da ACV podem ser citadas:

- As escolhas e suposições feitas na ACV podem ser subjetivas, como por exemplo, a escolha das fronteiras do sistema, seleção de fontes de dados, escolha das categorias de impacto, entre outros;
- Os modelos de análise de inventário ou de avaliação de impactos ambientais podem não estar disponíveis para todos os impactos potenciais;
- Os resultados que enfoquem questões globais ou regionais muitas vezes não são apropriados para aplicações locais;
- A exatidão dos resultados dos estudos de ACV depende da disponibilidade e da qualidade dos dados a serem utilizados;
- A incerteza dos estudos de ACV varia com as características espaciais e temporais de cada categoria de impacto.

Além de todas as limitações citadas, Islam et al. (2016) enfatizam que o processo completo de ACV na maioria dos casos é muito demorado e caro. Zocche (2014) destaca que existe uma grande dificuldade para concretizar parcerias com empresas para a aplicação da metodologia e que essas barreiras dificultam sua aplicação e consequentemente afetam o potencial da ACV como contribuição para tomadas de decisões.

### **2.3. Considerações finais**

Os estudos revisados neste capítulo constataam que os pavimentos permeáveis são capazes de reter e infiltrar a água pluvial, trazendo benefícios como a redução do escoamento da água pluvial, assim como a melhora na qualidade da água infiltrada pelo pavimento. As publicações revisadas sobre ACV foram capazes de trazer uma estimativa da

sustentabilidade dos pavimentos permeáveis, fornecendo avaliações nas etapas que precedem e seguem a vida útil desses sistemas.

Há diversos estudos cujos resultados comprovam a sustentabilidade trazida pelas infraestruturas verdes, incluindo os pavimentos permeáveis, assim como o custo-benefício destas (SPATARI et al., 2011; MAIOLO et al., 2017; WANG et al., 2018; LI et al., 2018). Porém, percebe-se que os estudos de ACV ainda apresentam heterogeneidade significativa de unidades funcionais, limites da avaliação, fases, processos, parâmetros e dados mínimos avaliados, entre outros componentes. Dessa forma, os resultados muitas vezes são inconsistentes, principalmente quando comparados entre si, e não conduzem a uma avaliação precisa dos impactos ambientais causados por esses sistemas durante seus ciclos de vida (ANTUNES et al., 2018).

Deve-se levar em conta diversos parâmetros, tais como padrões climáticos locais, requisitos regulamentares, qualidade da água pluvial infiltrada, vida útil e eficiência de tratamento dos sistemas. As fases de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação devem ser mais homogêneas, definindo-se fases e processos da avaliação e quais são os dados mínimos a serem considerados na modelagem da ACV. Dessa forma, evita-se heterogeneidade nas unidades funcionais e demais componentes, trazendo resultados mais consistentes e que conduzam a uma real avaliação dos impactos ambientais causados pelos pavimentos permeáveis.

Esta dissertação apresenta um avanço científico do estado da arte relacionado ao assunto, trazendo dados e métodos de avaliação atuais. Serão detalhados os impactos causados pela implantação de um sistema de aproveitamento de água pluvial captada por pavimento permeável, com a identificação das categorias de impacto mais afetadas, os componentes com maior impacto ambiental e as fases do ciclo de vida que mais contribuem para os impactos ambientais.

Além de fornecer instruções científicas para a escolha de sistemas de drenagem mais sustentáveis, este trabalho apresenta o primeiro estudo de ACV envolvendo pavimento permeável e o aproveitamento da água pluvial infiltrada. Os estudos encontrados na literatura limitam-se à realização da ACV apenas da estrutura do pavimento permeável em si, não levando em consideração a captação da água pluvial e todo o sistema hidráulico

necessário para o uso da água em edificações. Dessa forma, este trabalho visa preencher esta lacuna existente na literatura.

Embora os estudos sobre o ciclo de vida de pavimentos permeáveis ainda apresentem diversos conceitos imaturos, estando apenas em suas primeiras fases, a ACV é essencial para guiar o planejamento e a tomada de decisões. Tais estudos auxiliam na escolha de sistemas que consideram o aumento de recursos hídricos e a redução de desastres naturais e impactos ambientais.

### 3. Método

Este capítulo apresenta o método desenvolvido para avaliar ambientalmente, por meio da avaliação do ciclo de vida, um sistema de pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial em comparação com um sistema de drenagem convencional.

O objetivo deste método é avaliar comparativamente o impacto ambiental de dois cenários. No primeiro cenário (Figura 3.1), considera-se a instalação de um pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis em um edifício público com estacionamento próprio. No segundo cenário (Figura 3.2), para o mesmo edifício e estacionamento, considera-se um sistema de drenagem tradicional, ou seja, com pavimento convencional, sem aproveitamento de água pluvial, sendo os usos não potáveis abastecidos pela rede pública. Dessa forma, será realizada uma comparação dos efeitos ambientais por categoria de impacto acumulados ao longo do ciclo de vida dos cenários mencionados. Ressalta-se que ambos os cenários são teóricos, não havendo a construção dos sistemas em campo.

O primeiro passo foi a escolha de um edifício público com estacionamento próprio a ser utilizado como objeto de estudo. O segundo passo caracterizou-se pela escolha de um modelo de pavimento permeável, a partir de estudos encontrados na literatura, a fim de obter-se dados de infiltração e coeficientes de aproveitamento de água pluvial necessários para as simulações. O passo seguinte foi o cálculo do potencial de economia de água potável que poderia ser obtido na edificação caso o pavimento permeável fosse instalado. Para este cálculo, diversos dados foram utilizados, tais como: dados pluviométricos, área de drenagem (área do estacionamento), consumo de água na edificação, usos finais de água, porcentagem de água infiltrada pelo pavimento, volume dos reservatórios, entre outros.

Com o potencial de economia de água potável calculado, foi estimada também a quantidade de energia que poderia ser economizada no tratamento e abastecimento de água potável economizada pelo sistema, caso o pavimento permeável fosse utilizado.

Após estes passos, foi realizado o dimensionamento hidráulico do pavimento permeável e dos drenos, assim como o dimensionamento do sistema hidráulico necessário para o aproveitamento de água pluvial na edificação.

Figura 3.1. Esquema de funcionamento do Cenário 1 - Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial.

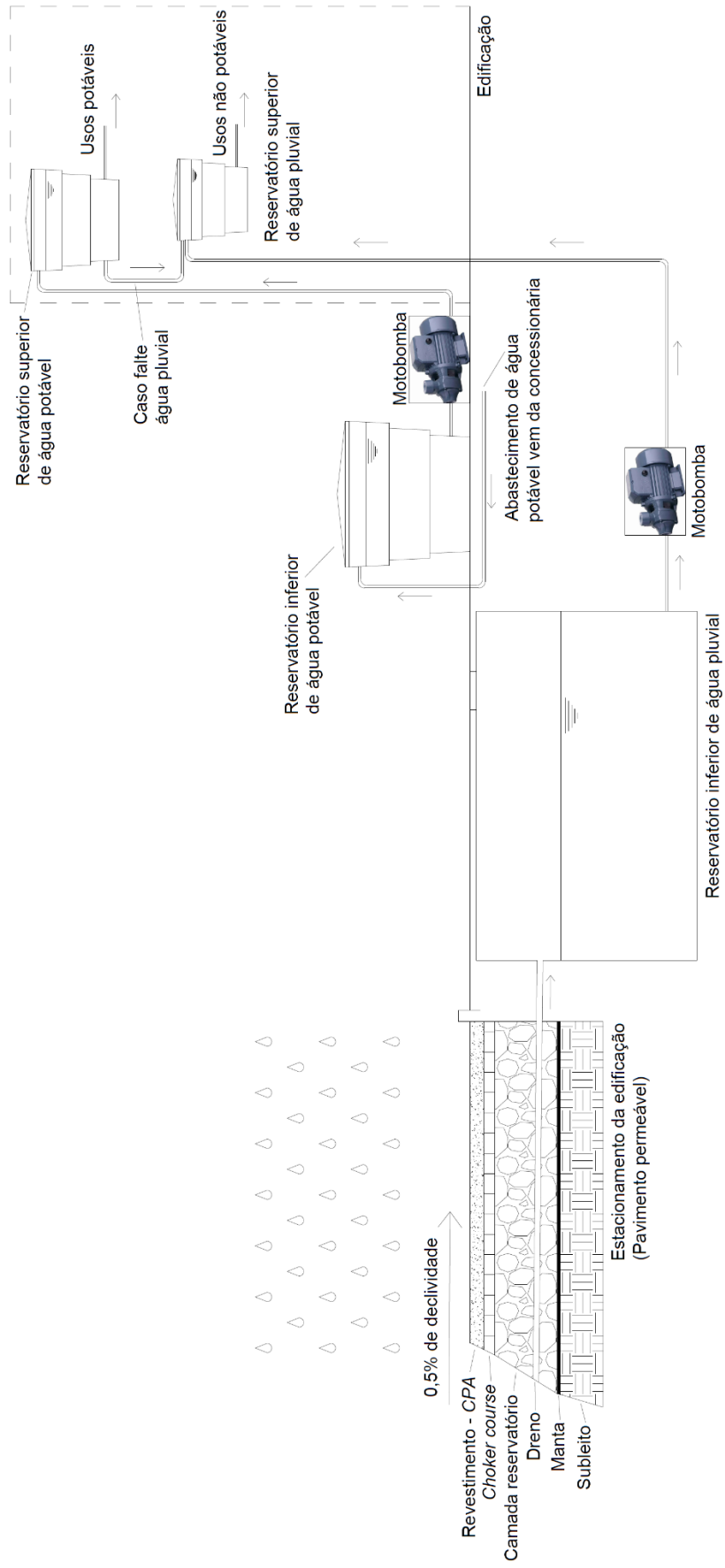
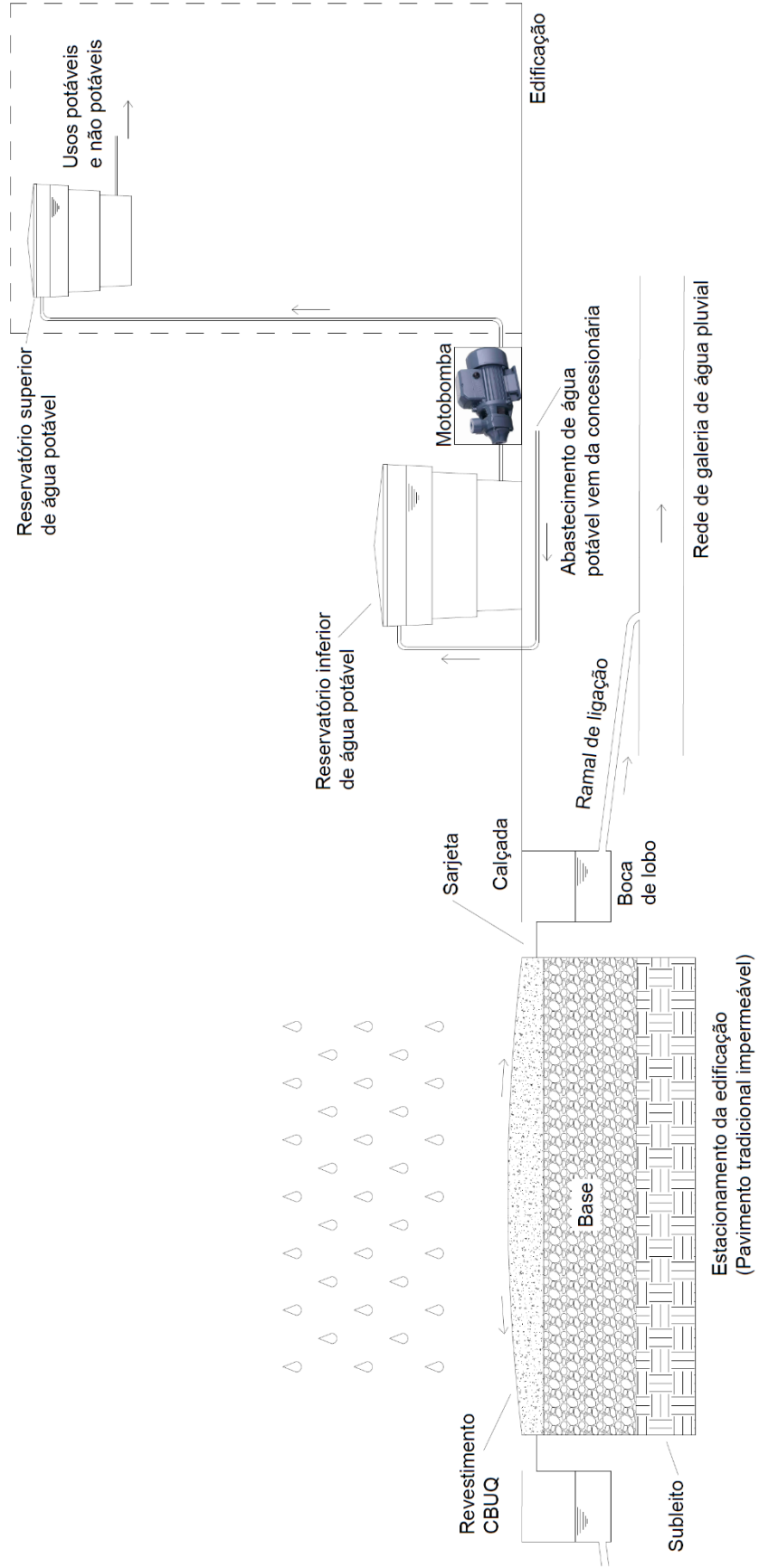


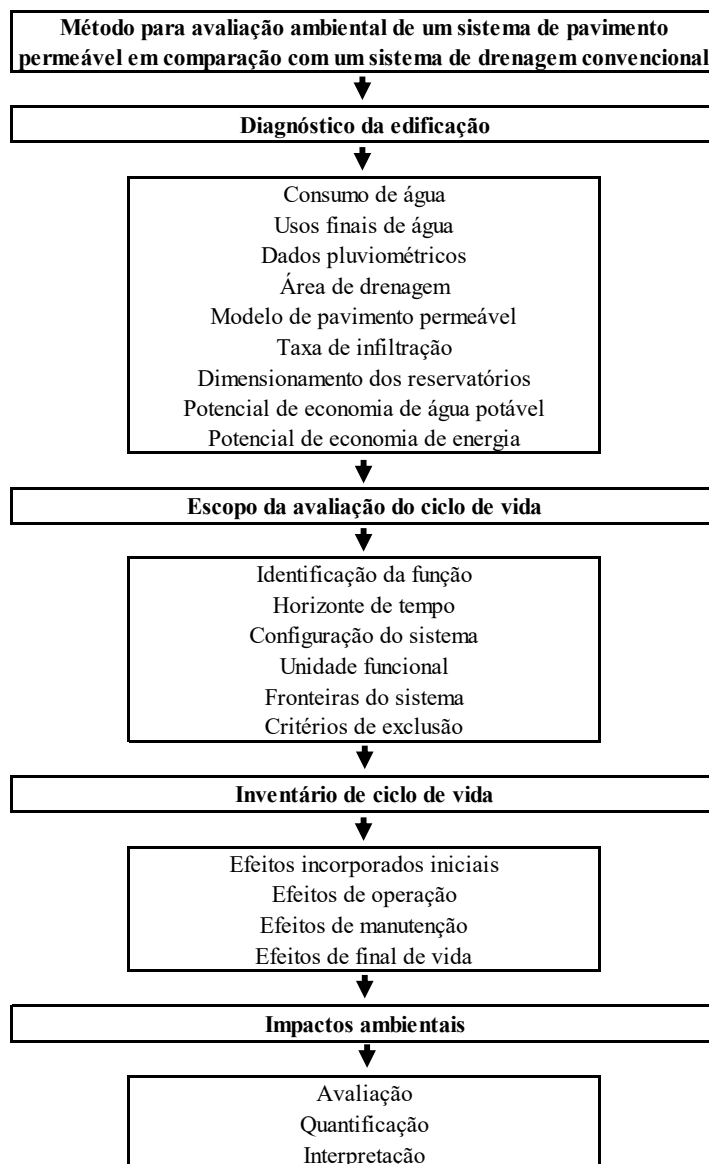
Figura 3.2. Esquema de funcionamento do Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento de água convencionais.





Após todos os dimensionamentos dos sistemas, foi realizada a avaliação do ciclo de vida de cada cenário. A avaliação do ciclo de vida envolve a comparação entre sistemas diferentes, porém com uma mesma função. Foram definidas e quantificadas as características de desempenho e promovida a equivalência entre os cenários analisados. Estas comparações foram estabelecidas tendo como base uma mesma função, que é relacionada a uma unidade funcional e exercida durante determinado período. Mais detalhes sobre o método de ACV utilizado são expostos na seção 3.4. A Figura 3.3 mostra o fluxograma do método proposto no estudo.

Figura 3.3. Fluxograma do método proposto.



### 3.1. Objetos de estudo

Este estudo tem como objetos o estacionamento e o edifício da Epagri – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, localizados na Rodovia Admar Gonzaga, número 1486, bairro Itacorubi, Florianópolis, Santa Catarina. A edificação é composta por dois blocos de dois pavimentos, com área total de 8.025 m<sup>2</sup>. A edificação é composta por uma população de 271 pessoas (255 empregados e 16 terceirizados). A Figura 3.4 apresenta uma foto aérea da edificação e do estacionamento da Epagri.

Figura 3.4. Foto aérea da edificação e do estacionamento da Epagri.



Fonte: Google Earth. Acesso em 11 dez. 2018.

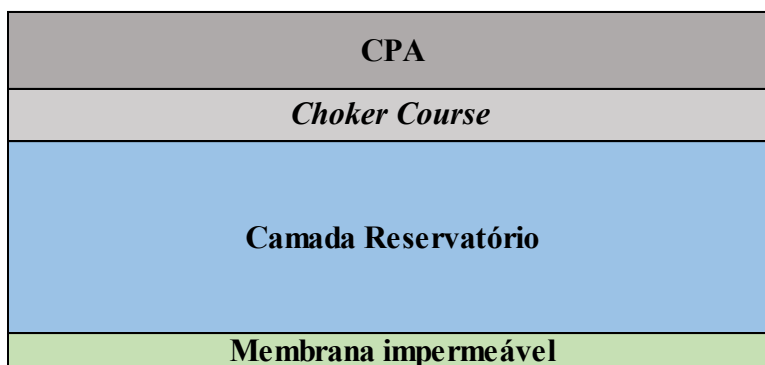
### 3.2. Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial

Esta seção apresenta as características adotadas para o Cenário 1 – Sistema com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis na edificação.

### 3.2.1. 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 3.5 ilustra o modelo de pavimento permeável adotado.

Figura 3.5. Modelo de pavimento permeável adotado.



Fonte: Adaptado de Hammes et al. (2018).

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 é composta por ligante modificado por borracha moída de pneus em uma porcentagem de 5%. 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 que será utilizada nas simulações do potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial (seção 3.2.2.5) será 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 os cálculos apresentados na seção 3.5. 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%.

### *3.2.2. Potencial de economia de água potável*

Para determinar o potencial de economia de água potável na edificação por meio do aproveitamento de água pluvial infiltrada pelo pavimento permeável, foi considerado que a água pluvial a ser captada seria destinada a usos não potáveis, tais como descarga do vaso sanitário, mictório, limpeza de áreas externas e rega de jardim. Considera-se também que o volume de água pluvial captado no estacionamento é armazenado em um reservatório inferior, posteriormente sendo bombeado para um reservatório superior. Utilizou-se o programa Netuno 4 (GHISI; CORDOVA, 2014) para os cálculos dos potenciais de economia de água potável para diferentes volumes de reservatório e para os cálculos do atendimento da demanda de água pluvial.

Os dados de entrada para o programa são: histórico da precipitação pluviométrica em base diária, área do estacionamento coberto pelo pavimento permeável (área de captação disponível), demanda total de água, demanda de água pluvial e o coeficiente de aproveitamento de água pluvial. Para realizar o cálculo, foram feitas simulações para diversos volumes, indicando um volume máximo para o reservatório e o intervalo entre os volumes, conforme exposto na seção 3.2.2.6.

Os dados de saída do programa são: potenciais de economia de água potável para diferentes volumes de reservatório, consumo de água pluvial, atendimento de água pluvial (total, parcial ou nulo) e volume extravasado.

#### *3.2.2.1. Dados pluviométricos*

Os dados sobre a precipitação pluviométrica na cidade de Florianópolis foram obtidos de uma série histórica disponibilizada no site HidroWeb – Sistemas de Informações Hidrológicas, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2019). Foram utilizados dados de precipitação diária para um período de 16 anos (1º de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2017). Estes dados são de operação e responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

#### 3.2.2.2. Área de captação

A área de captação considerada no estudo foi igual à área do estacionamento com pavimento permeável. Para o cálculo da área foi utilizado o programa computacional Google Earth (GOOGLE, 2018), que possui ferramenta de medição de área.

#### 3.2.2.3. Consumo de água

A quantificação do consumo de água na edificação foi feita por meio de consultas às contas de água. A medição de consumo é feita mensalmente pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Foram fornecidos pela equipe administrativa da Epagri dados sobre o consumo de água na edificação dos últimos cinco anos (de janeiro de 2014 a dezembro de 2018). Foi calculado, por meio desses dados, o consumo diário médio per capita na edificação, que foi o valor utilizado nas simulações no programa Netuno 4.

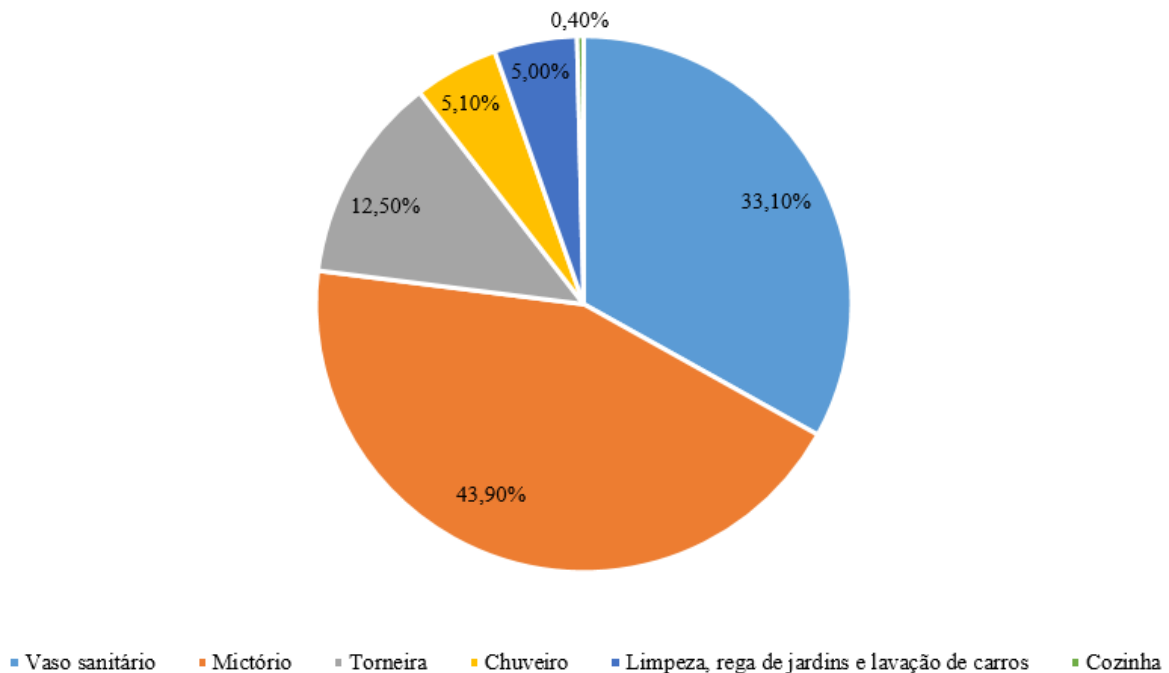
#### 3.2.2.4. Usos finais de água

A estimativa dos usos finais de água em uma edificação é fundamental para o cálculo do potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial, visto que, através deste dado, é possível estimar a demanda de água pluvial.

Kammers e Ghisi (2005) realizaram uma pesquisa mediante levantamento de dados de consumo do edifício em estudo junto à concessionária de água em Florianópolis e uma série de levantamentos com entrevistas e quantificações de campo, de forma a se estimar o consumo de água para cada dispositivo sanitário.

Como resultado, foram obtidos os usos finais no edifício da Epagri, ilustrados na Figura 3.6. Como o presente estudo não tem como objetivo a realização de novos estudos relacionados aos usos finais da edificação, será assumido que o estudo de Kammers e Ghisi (2005) ainda é representativo quanto aos usos finais no edifício da Epagri, visto que não foram verificadas modificações significativas de layout e uso dos ambientes. São considerados como usos não potáveis o vaso sanitário, mictório, limpeza, rega de jardins e lavagem de carros. Dessa forma, a demanda de água pluvial é igual a 82,0%.

Figura 3.6. Estimativa dos usos finais de água da edificação em estudo.



Fonte: Adaptado de Kammers e Ghisi (2005).

#### 3.2.2.5. Porcentagem de água infiltrada pelo pavimento

Um dos dados de entrada do programa Netuno 4 é o coeficiente de escoamento superficial, a fim de verificar a quantidade de água pluvial captada. Este dado está relacionado com a quantidade de água que, após incidir na superfície de captação, pode ser captada pelo sistema de aproveitamento de água pluvial. Neste estudo, como a área de captação é a área do pavimento permeável, o dado “coeficiente de escoamento superficial” será substituído pela porcentagem de água infiltrada pelo pavimento, que segundo o estudo de Hammes et al. (2018) é igual a 80% (valor médio, que leva em consideração a colmatagem do pavimento).

#### 3.2.2.6. Volume dos reservatórios de água pluvial

O cálculo do volume do reservatório superior de água pluvial foi feito por meio da Equação 3.1, que leva em consideração o consumo médio per capita de água, o número de

ocupantes da edificação e o percentual de substituição de água potável por água pluvial igual a 82,0%.

$$V_{res. sup.} = C_{diário per capita} \times N \times D_{ap} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

$V_{res. sup.}$  é o volume do reservatório superior de água pluvial (litros);

$C_{diário per capita}$  é o consumo médio diário de água (litros/pessoa/dia);

$N$  é o número de ocupantes da edificação;

$D_{ap}$  é a demanda de água pluvial (%).

O dimensionamento do volume do reservatório inferior de água pluvial foi feito com auxílio do programa Netuno 4. Foram feitas simulações variando o volume do reservatório de zero a 100.000 litros, com intervalo entre volumes igual a 5.000 litros. Optou-se pela indicação do volume ideal através da diferença entre potenciais de economia de água por meio do aproveitamento de água pluvial. A diferença escolhida foi de 0,5%/m<sup>3</sup>. A escolha da diferença entre potenciais cabe ao projetista, podendo este valor ser diferente do adotado neste estudo (PROENÇA et al., 2011; MARINOSKI; GHISI, 2018).

### *3.2.3. Potencial de economia de energia para tratamento e abastecimento de água potável*

Após a quantificação do potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial captada pelo pavimento permeável, foi também 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 3.2. O valor do consumo diário de água pluvial da edificação foi calculado através das simulações no programa Netuno 4, conforme explicado na seção 3.2.2. O valor da energia consumida pelo sistema de tratamento e distribuição de água do município foi estimado através de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2018).

$$EE = CA_p \times E_c \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

$EE$  é o potencial de economia de energia elétrica (kWh/dia);

$CA_p$  é o consumo diário de água pluvial na edificação (m<sup>3</sup>/dia);

$E_c$  é a energia consumida pelo sistema de tratamento de água do município (kWh/m<sup>3</sup>).

#### 3.2.4. 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 3.3 (ABNT, 2015). A Figura 3.7 ilustra os parâmetros de projeto para a camada reservatório.

$$H_{máx} = (\Delta Q_c R + P - f T_e) / V_r \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

$H_{máx}$  é a espessura total da camada reservatório (m);

$\Delta Q_c$  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 (m<sup>2</sup>);

$A_p$  é a área de pavimento permeável (m<sup>2</sup>);

$P$  é a precipitação de projeto (m);

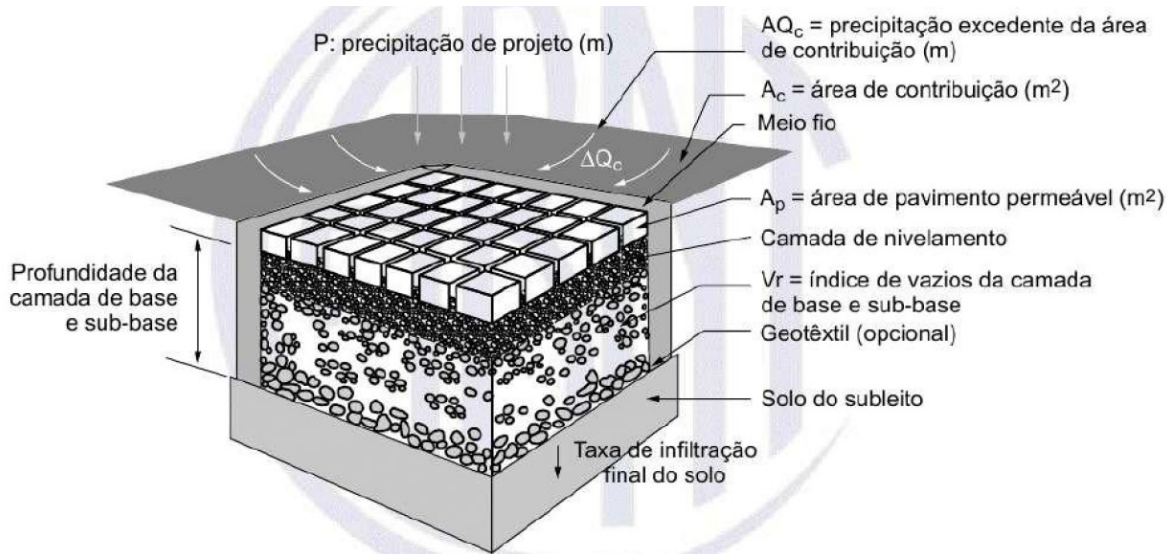
$f$  é a taxa de infiltração no solo (m/h);

$T_e$  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).



Figura 3.7. Parâmetros de projeto para o dimensionamento da camada reservatório.



Fonte: ABNT (2015).

A razão entre a área drenada e a área do pavimento permeável ( $R$ ) foi obtida a partir de áreas estimadas com a utilização de imagens de satélite, conforme explicado na seção 3.2.2.2. O volume de vazios ( $V_r$ ) adotado para a camada reservatório foi o percentual indicado pela literatura, 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 3.4 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.

$$q_s = Q_s/A_a \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

$q_s$  é a vazão de saída específica (m/h);

$Q_s$  é a vazão de saída constante (m<sup>3</sup>/h);

$A_a$  é a área de drenagem efetiva (m<sup>2</sup>).

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 será 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 3.5 mostra a equação IDF utilizada.

$$i = (1168,46 \times T^{0,237}) / ((t + 9,12)^{0,703}) \quad (\text{Equação 3.5})$$

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.

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.

### 3.2.5. Dimensionamento dos drenos

Os drenos têm como função encaminhar a água da camada reservatório do pavimento até o reservatório inferior propriamente dito. Neste estudo, o dimensionamento dos drenos foi feito por meio da Equação 3.6, proposta por Tomaz (2009). Esta equação relaciona a intensidade média máxima da chuva (vazão de entrada no reservatório) com o espaçamento dos drenos.

$$i = K \times (h / (0,5 \times E))^2 \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde:

$i$  é a intensidade média máxima da chuva de projeto (mm/h);

$K$  é a permeabilidade da camada reservatório (mm/h);

$h$  é a espessura da camada reservatório (m);

$E$  é o espaçamento entre drenos (m).

### 3.2.6. Dimensionamento do sistema hidráulico

O dimensionamento das bombas hidráulicas foi feito por meio das Equações 3.7 e 3.8. O cálculo da altura manométrica seguiu um modelo simplificado, em que há a majoração da diferença de cotas entre o reservatório inferior e o superior. A escolha pela majoração da diferença de cotas se fez pela dificuldade em estimar o número de conexões, válvulas e demais componentes presentes no recalque do reservatório inferior para o superior. A Equação 3.7 mostra o cálculo da altura manométrica e a Equação 3.8 mostra o cálculo da potência da bomba hidráulica.

$$H_m = H_g \times K \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde:

$H_m$  é a altura manométrica do sistema (m);

$H_g$  é a diferença de cota do nível mínimo do reservatório inferior para o nível de saída da água no reservatório superior (m);

$K$  é um coeficiente de majoração para contabilização da perda de carga em recalque e em sucção.

$$Pot = (Q_r \times H_m) / (75 \times \eta) \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde:

$Pot$  é a potência necessária das bombas (cavalo vapor);

$H_m$  é a altura manométrica do sistema (m);

$\eta$  é o rendimento da bomba (adimensional);

$Q_r$  é a vazão de recalque (m<sup>3</sup>/s).

A NBR 15527 (ABNT, 2019) recomenda a quantidade mínima de duas unidades de bombas hidráulicas, a fim de se garantir a elevação hidráulica caso uma das bombas falhe.

Para o dimensionamento da tubulação de recalque, foi utilizada a fórmula de ForschHeimmer-Bresse, representada pela Equação 3.9. Para a tubulação de sucção, optou-se por utilizar o diâmetro comercialmente disponível imediatamente superior ao diâmetro de recalque.

$$D_r = 1,3 \times \sqrt{Q} \times (\sqrt[4]{t/24}) \quad (\text{Equação 3.9})$$

Onde:

$D_r$  é o diâmetro de recalque da tubulação (mm);

$Q$  é a vazão de recalque (m<sup>3</sup>/s);

$t$  é o tempo de funcionamento diário da motobomba (h).

### *3.2.7. 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 3.1. Esta mesma norma foi a utilizada neste estudo, visto que a água pluvial captada pelo pavimento permeável será destinada a usos não potáveis (descarga do vaso sanitário, mictório, limpeza de áreas externas e rega de jardim).

Os tratamentos adicionais que podem ser utilizados na água pluvial captada por meio do pavimento permeável estão descritos na seção 2.1.3 deste trabalho. 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 será 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.

Tabela 3.1. Parâmetros mínimos de qualidade para usos não potáveis.

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

Fonte: ABNT (2019).

### **3.3. Cenário 2 - Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento de água convencionais**

No segundo cenário a ser analisado, o modelo de pavimento tradicional a ser utilizado no estacionamento em estudo será do tipo flexível, com utilização de ligante betuminoso na construção do revestimento. O dimensionamento será feito de acordo com o método de projeto de pavimentos flexíveis desenvolvido pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1981), que é o método mais utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil.

Em resumo, o pavimento será constituído por duas camadas: a base (sub-base, reforço) e o revestimento. A base tem como função resistir às deformações e distribuir os esforços verticais através das tensões dos veículos e sobre a qual se constrói o revestimento. O revestimento, por sua vez, recebe diretamente a ação de rolamento dos veículos e das intempéries e tem como função resistir aos esforços tangenciais (cisalhamento, frenagem, aceleração, movimentos centrífugos, entre outros).

Dessa forma, os serviços que envolvem a construção do pavimento dito tradicional neste estudo são: terraplenagem, regularização do sub-leito, compactação da sub-base, base e capa asfáltica (CBUQ). Entretanto, o objetivo principal do estudo não é o dimensionamento do pavimento implantado no estacionamento, mas sim a comparação dos

impactos ambientais trazidos pelos dois cenários analisados (pavimento permeável e pavimento tradicional).

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.

### **3.4. Comparação dos sistemas por meio da avaliação do ciclo de vida**

Até esta seção, foi apresentado o método para obter o consumo de água e os usos finais na edificação em estudo. Também foram apresentados os cálculos necessários para a obtenção dos potenciais de economia de água potável e energia e os cálculos para o dimensionamento dos pavimentos e reservatórios necessários aos sistemas.

Tais valores são essenciais para a definição da unidade funcional e para a composição do inventário do ciclo de vida dos dois sistemas, sendo estes resultados necessários para a quantificação das entradas e saídas de materiais, componentes e insumos nos dois cenários.

#### *3.4.1. Considerações iniciais*

O processo de comparação dos dois cenários é baseado nos princípios da ACV, seguindo a metodologia proposta pelas normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b). As seguintes etapas são contempladas neste trabalho: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto de ciclo de vida; e interpretação.

No objetivo e escopo do estudo é definida a função do sistema, assim como o horizonte de tempo da análise. De acordo com a função do sistema, define-se a unidade funcional, que serve como referência adequada para relacionar as entradas e saídas. As fronteiras dos sistemas especificam em quais fases do ciclo de vida a análise será realizada.

Na fase de inventário são inseridos os dados de entrada e saída referentes aos dois cenários (cenário com a implantação do pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis na edificação e cenário com pavimento e drenagem

convencionais, sem aproveitamento de água pluvial). O inventário de ciclo de vida é elaborado a partir de bases de dados confiáveis em ambos os cenários avaliados e relacionado aos efeitos incorporados iniciais dos materiais utilizados nos sistemas, aos efeitos de operação e manutenção e aos efeitos de final de vida (destinação de materiais para disposição final).

Os efeitos de operação são baseados no consumo de energia para o funcionamento dos sistemas nos dois cenários. Os efeitos de manutenção são relacionados às novas entradas e saídas que se fazem necessárias devido à substituição e manutenção de componentes dos sistemas. Estes efeitos mencionados referem-se a impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida ou etapas do ciclo de vida dos sistemas.

Para cada um dos cenários foram realizadas análises ambientais por meio de equações baseadas no método desenvolvido por Ribeiro (2015), a fim de estimar os efeitos avaliados. Devido à grande quantidade de dados demandada ao presente estudo, foi verificada a necessidade da utilização de um programa computacional especializado e base de dados a fim de dar suporte à avaliação dos cenários. O programa computacional auxilia a identificar e coletar dados com qualidade apropriada. Dessa forma, foi utilizado o *software SimaPro*, versão 9.0, por meio da licença gratuita *Faculty*, disponibilizada para fins educacionais aos estudantes e pesquisadores do LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A base de dados utilizada foi a *Ecoinvent® 3.5*. Ressalta-se que tal base não é de origem nacional. A justificativa da utilização da referida base de dados se dá pela confiabilidade das informações contidas, mesmo sendo esta de origem estrangeira. Outra justificativa é a inexistência de uma base de dados nacional consolidada no programa *SimaPro*.

O *SimaPro* é um *software* desenvolvido pela *PRé Consultants (SIMAPRO, 2019)*, utilizado para a gestão de informações relacionadas ao ciclo de vida dos sistemas de produto. O *software* é usado para o desenvolvimento de projetos de ACV, atendendo as exigências da ISO 14040 e ISO 14044, através de análises por indicadores de desempenho ambiental.

O *SimaPro* permite que a modelagem de um sistema de produto seja realizada tanto na forma de processos unitários onde os fluxos de entrada e de saída são conectados automaticamente a um fluxo intermediário de produto ou na forma de fluxograma, com

processos ligados manualmente. O *software* possui uma completa gama de ferramentas para a interpretação dos resultados de modelagem do ciclo de vida. Dessa forma, é possível extrair as informações necessárias para qualquer objetivo e escopo de projeto ambiental.

#### 3.4.2. Definição de objetivo e escopo

O método é baseado no estudo desenvolvido por Ribeiro (2015) e 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.

##### 3.4.2.1. Identificação da função

Para este estudo, a função foi considerada dupla. A primeira função escolhida para a comparação dos dois cenários foi o fornecimento de água na edificação. A segunda função é a drenagem/infiltração da água pluvial que incide sobre o pavimento do estacionamento. No primeiro cenário (estacionamento com pavimento permeável implantado), a água utilizada para os usos não potáveis é a água pluvial infiltrada e captada pelo próprio pavimento. No segundo cenário (estacionamento com pavimento tradicional e drenagem convencional), a água utilizada para os usos não potáveis na edificação é provinda da rede pública de abastecimento, enquanto a água pluvial que incide sobre o pavimento do estacionamento é drenada para a rede pública de coleta de água pluvial.

##### 3.4.2.2. Horizonte de tempo

Faz-se necessária a definição de um horizonte de tempo para a utilização dos sistemas, especificando um período de referência que indica o tempo em que o sistema será utilizado. Essa definição leva em conta a durabilidade dos equipamentos e componentes dos sistemas, porém não é obrigatório que o horizonte de tempo seja idêntico à vida útil do sistema (ABNT, 2009a).



Para a avaliação realizada neste estudo, foi considerado um período igual a 20 anos como horizonte de tempo, conforme analisado em outras pesquisas sobre sistemas hidráulicos prediais (RIBEIRO, 2015; VIEIRA, 2012; PROENÇA et al., 2011; CHIU et al., 2009). A reposição dos equipamentos e componentes que tenham vida útil inferior ao horizonte de tempo adotado foi contabilizada na avaliação.

#### 3.4.2.3. Unidade funcional

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a unidade funcional representa o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência, permitindo análise e comparação entre diferentes sistemas. A NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) recomenda que os dados de entrada e saída sejam referidos sempre à unidade funcional adotada.

A unidade funcional escolhida para a comparação entre o sistema com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial e o sistema com pavimento tradicional e abastecimento convencional é a drenagem da área do estacionamento (em m<sup>2</sup>) e o fornecimento de água (em m<sup>3</sup>) para a edificação durante o horizonte de tempo de 20 anos.

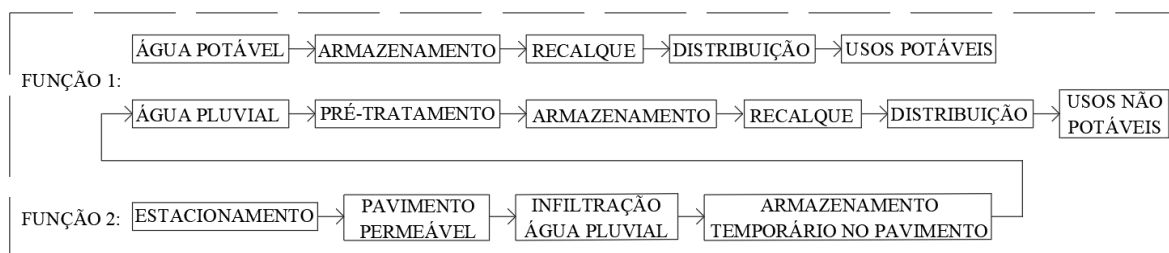
#### 3.4.2.4. Fronteiras do sistema

São consideradas no estudo todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas (“berço”) até a disposição final (“túmulo”). Dessa forma, a fronteira do sistema compreende a produção dos materiais e componentes para os sistemas, incluindo extração de matérias primas, processamento e transporte; reposição de componentes ao longo da vida útil dos sistemas; uso de energia para operação dos sistemas; e destinação final dos componentes ao fim da vida útil dos sistemas.

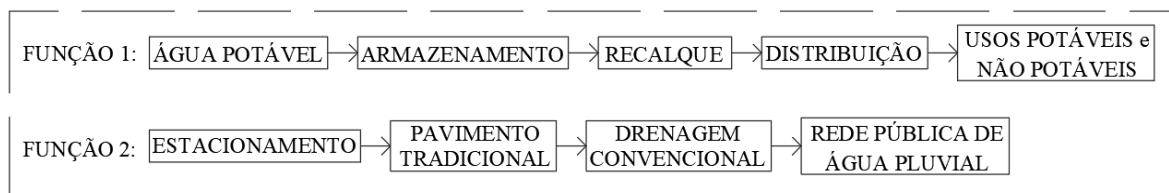
A Figura 3.8 ilustra as fronteiras do sistema com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial e as fronteiras do sistema com pavimento tradicional e drenagem convencional. Nota-se que em cada fronteira há duas funções, sendo a função 1 relacionada ao fornecimento de água na edificação e a função 2 relacionada ao tipo de pavimento utilizado no estacionamento e drenagem ou infiltração da água pluvial que incide sobre o pavimento. Percebe-se ainda que no cenário com pavimento permeável,

existe uma ligação entre as duas funções, visto que a água pluvial infiltrada no estacionamento é utilizada na edificação. No cenário com pavimento tradicional, por sua vez, não há essa ligação, visto que a água pluvial é drenada para a rede pública.

Figura 3.8. Fronteiras dos cenários (a) com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial e (b) com pavimento tradicional e drenagem convencional.



(a) cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial



(b) cenário com pavimento tradicional e drenagem convencional

#### 3.4.2.5. Omissões de estágios do ciclo de vida

Por tratar-se de uma avaliação comparativa, todos os processos elementares (definido como o menor elemento considerado na análise de inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados) idênticos entre os dois cenários foram omitidos na avaliação do ciclo de vida.

#### 3.4.2.6. Critérios de exclusão de aspectos ambientais

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) aponta como critérios de corte a especificação dos limites que definem a exclusão de dados de um estudo, em termos de fluxos de material ou energia ou do nível de significância ambiental associados a processos elementares ou a sistemas de produto. Estes critérios de exclusão visam o refinamento do inventário de ciclo

de vida, visto que não é possível e nem prático considerar todos os aspectos ambientais de um sistema de produto.

Os critérios de exclusão podem ser quantitativos ou de relevância ambiental. Pelo critério quantitativo, excluem-se do sistema os fluxos de matéria ou energia cuja contribuição cumulativa em termos da massa ou energia total que entra ou sai do sistema seja inferior a determinada porcentagem limite.

Para este trabalho, o critério de exclusão inicial é de 1% em termos de massa, desde que observadas sua relevância ambiental, conforme método proposto por Ribeiro (2015). Entretanto, o critério de corte deve ser reduzido caso as entradas que não contribuam com mais de 1% de massa produzam impacto ambiental significativo.

### *3.4.3. Inventário de ciclo de vida*

A fase de inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes em cada um dos processos unitários do sistema de pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial e do sistema de pavimento tradicional com abastecimento hidráulico predial convencional. Esta etapa deve conter um balanço de todos os fluxos que entram e saem do sistema ao longo do ciclo de vida. Os fluxos elementares são materiais ou energia retirados do meio ambiente e que entram no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou material ou energia que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana (ABNT, 2009a).

Em relação ao transporte dos materiais, são definidos valores médios para cada categoria de material, envolvendo a distância entre as jazidas, fabricantes e comerciantes e o local da edificação em estudo. O Quadro 3.1 apresenta os conjuntos de dados requeridos para a elaboração do inventário do ciclo de vida. Os dados são coletados a partir de bancos de dados, pesquisas junto a fabricantes e literatura específica. Todos os dados devem ser relacionados à unidade funcional. Também devem ser analisados, validados e tratados de modo a serem convertidos nos impactos ambientais posteriormente. Os dados devem ser sempre referenciados, e de preferência serem atuais e compatíveis com a realidade nacional.

Quadro 3.1. Dados para a elaboração do inventário do ciclo de vida.

<b>Efeitos ambientais</b>	<b>Dados requeridos</b>
Efeitos incorporados iniciais	Quantitativos de materiais utilizados nos sistemas; incluindo fabricação e transporte de componentes
Efeitos de operação	Energia consumida para a operação dos sistemas no horizonte de tempo
Efeitos de manutenção	Quantitativos de materiais utilizados na manutenção dos sistemas; incluindo fabricação e transporte de componentes
Efeitos de final de vida	Quantitativos de materiais destinados para disposição final, incluindo transporte

Fonte: Ribeiro (2015).

#### 3.4.3.1. Pressupostos adotados

Foi necessária a adoção de alguns pressupostos de forma a possibilitar a composição do inventário do ciclo de vida dos sistemas avaliados neste estudo. Tais pressupostos são descritos a seguir.

Foram desconsideradas as instalações elétricas necessárias para a instalação das motobombas, realimentador e conjunto mangueira boia.

Foi considerado apenas o ferro fundido como material componente das motobombas, visto que os demais materiais (bronze, alumínio, aço inox) não alcançam 1% em termos de massa e foram excluídos da análise, conforme explicado na seção 3.4.2.6.

Os serviços de mão de obra, equipamentos e energia consumida na implantação dos pavimentos permeável e tradicional, nos cenários 1 e 2, respectivamente, foram desconsiderados na análise, visto que não foi verificada a capacidade estrutural dos pavimentos, nem o nível de compactação destes. Dessa forma, não é possível determinar o tempo de uso necessário para cada equipamento. Além disso, estima-se que o tempo de serviço e a energia consumida para a implantação dos dois tipos de pavimentos sejam similares, não trazendo diferença significativa para o estudo em questão.

Foi desconsiderado o serviço de escavação necessário à execução do reservatório inferior do cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial.

Os serviços de manutenção do pavimento permeável e tradicional também foram desconsiderados na análise, devido à dificuldade de se determinar a quantidade de energia

consumida nesses processos. Além disso, a frequência desses serviços varia de acordo com alguns parâmetros, como o teor de poluição, tamanho e estrutura dos vazios, declividade da camada subjacente ao revestimento, velocidade do tráfego, entre outros (TDEC, 2014), dificultando ainda mais a quantificação. O Quadro 3.2 apresenta uma recomendação da frequência dos serviços de manutenção para pavimentos permeáveis. Nota-se que tais serviços são de simples operação e não afetam a análise feita neste estudo.

Quadro 3.2. Serviços de manutenção recomendados para pavimentos permeáveis.

Serviços de manutenção	Frequência
Nos primeiros seis meses após a construção, inspecionar pelo menos duas vezes após eventos com mais de 12,7 mm de chuva para verificar a permeabilidade do sistema. Realizar os reparos e estabilizações necessárias.	Após instalação
Remover partículas do solo ou sedimentos que estiverem sobre o pavimento. Reparar a superfície do pavimento que estiver degenerando (recapear).	Quando necessário
Aspirar o pavimento com um varredor de rua para evitar colmatação.	De duas a quatro vezes ao ano
Inspeção visual e remoção de crescimento de vegetação.	Uma vez ao ano
Aspirar o pavimento com um varredor de rua regenerador para reabilitar o pavimento.	Caso esteja colmatado

Fonte: Adaptado de TDEC (2014).

Por último, todos os materiais não disponíveis na base de dados *Ecoinvent*® e não documentados na literatura nacional foram substituídos por processos similares.

#### 3.4.3.2. Quantificação das entradas

A quantificação das entradas é realizada a partir de equações baseadas no método proposto por Ribeiro (2015), bem como com o auxílio do *software SimaPro* e demais bases de dados. Estas possuem inventários de materiais e processos acoplados a ferramentas de cálculo de impactos ambientais. Dois cenários foram modelados no *software SimaPro*, o “cenário com pavimento permeável” e o “cenário com sistema convencional”. Foram inseridas no programa as entradas de matérias-primas e energia obtidas no banco de dados

*Ecoinvent*® 3.5 e como resultado o programa apresentou as saídas na forma de emissões no solo, na água e no ar.

Os efeitos ambientais totais do cenário com implantação do pavimento permeável no estacionamento e aproveitamento de água pluvial em usos não potáveis da edificação, de acordo com a categoria de impacto avaliada, são definidos pela Equação 3.10. Os efeitos ambientais totais do cenário com pavimento tradicional, sem aproveitamento da água pluvial, por categoria de impacto, são dados pela Equação 3.11.

$$EAT_{pp} = EI_{pp} + EM_{pp} + EO_{pp} + EF_{pp} \quad (\text{Equação 3.10})$$

Onde:

$EAT_{pp}$  são os efeitos ambientais totais do sistema com implantação do pavimento permeável;

$EI_{pp}$  são os efeitos ambientais incorporados iniciais do sistema com implantação do pavimento permeável;

$EM_{pp}$  são os efeitos ambientais de manutenção do sistema com implantação do pavimento permeável;

$EO_{pp}$  são os efeitos ambientais de operação do sistema com implantação do pavimento permeável;

$EF_{pp}$  são os efeitos ambientais de final de vida do sistema com implantação do pavimento permeável.

$$EAT_{sc} = EI_{sc} + EM_{sc} + EO_{sc} + EF_{sc} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Onde:

$EAT_{sc}$  são os efeitos ambientais totais do sistema com pavimento convencional;

$EI_{sc}$  são os efeitos ambientais incorporados iniciais do sistema com pavimento convencional;

$EM_{sc}$  são os efeitos ambientais de manutenção do sistema com pavimento convencional;

$EO_{sc}$  são os efeitos ambientais de operação do sistema com pavimento convencional;

$EF_{sc}$  são os efeitos ambientais de final de vida do sistema com pavimento convencional.

Os efeitos ambientais incorporados iniciais do sistema com implantação do pavimento permeável, em cada categoria de impacto, são definidos por meio da Equação 3.12. Os efeitos ambientais incorporados iniciais do sistema com pavimento convencional, por categoria de impacto, são definidos por meio da Equação 3.13.

$$EI_{pp} = EIM_{pp} \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

$EI_{pp}$  são os efeitos ambientais incorporados iniciais do sistema com implantação do pavimento permeável;

$EIM_{pp}$  são os efeitos ambientais incorporados nos materiais utilizados na implantação do sistema com pavimento permeável, incluindo fabricação e transporte de componentes.

$$EI_{sc} = EIM_{sc} \quad (\text{Equação 3.13})$$

Onde:

$EI_{sc}$  são os efeitos ambientais incorporados iniciais do sistema com pavimento convencional;

$EIM_{sc}$  são os efeitos ambientais incorporados nos materiais utilizados na implantação do sistema com pavimento convencional, incluindo fabricação e transporte de componentes.

As operações de transporte de materiais da fábrica para a edificação e da edificação para a disposição final foram consideradas como processo “*Transport, freight, lorry 3.5-7.5/7.5-16/16-32 metric ton, EURO3 {RoW} | Cut-off, U*” da base *Ecoinvent*® 3.5. O *Ecoinvent*® utiliza a unidade tonelada quilômetro (tkm) para os processos relacionados ao transporte de cargas e leva em consideração o trecho de retorno, com o deslocamento do veículo sem carga.

Os efeitos ambientais de manutenção de cada sistema, para os dois cenários, em cada categoria de impacto, são calculados por meio da Equação 3.14.

$$EM = \Sigma (EI_c \times n_r) \quad (\text{Equação 3.14})$$

Onde:

$EM$  são os efeitos ambientais de manutenção do sistema avaliado;

$EI_c$  são os efeitos ambientais incorporados iniciais nos materiais de cada componente substituível ou manutenível do sistema avaliado;

$n_r$  é o número de vezes que os componentes devem ser trocados ao longo do horizonte de tempo de utilização do sistema avaliado (vezes/tempo).

O valor de  $n_r$ , referente ao número de vezes que os componentes devem ser trocados ao longo do horizonte de tempo, é calculado por meio da Equação 3.15.

$$n_r = (H/VU_{comp}) - 1 \quad (\text{Equação 3.15})$$

Onde:

$n_r$  é o número de vezes que os componentes devem ser trocados ao longo do horizonte de tempo de utilização do sistema avaliado (vezes/horizonte de tempo);

$H$  é o horizonte de tempo de utilização do sistema avaliado;

$VU_{comp}$  é a vida útil de cada componente substituível ou manutenível do sistema avaliado.

Os efeitos ambientais gerados pelo uso de energia para a operação dos sistemas avaliados são calculados por meio da Equação 3.16, para ambos os cenários. A energia de operação envolve a energia consumida para o fornecimento de água potável e a energia para o recalque de água (bombeamento). O consumo de energia para operação em cada um dos cenários é calculado com base na unidade funcional escolhida.

Os consumos energéticos foram inseridos na modelagem dos efeitos de operação no programa *SimaPro* como processo “*Electricity, medium/low voltage {BR} | market for | Cut-off, U*”, dentro da categoria *Electricity country mix*. Assim, a matriz energética brasileira é levada em consideração. Estão inclusos no processo a produção de energia elétrica no Brasil, a rede de transmissão e emissões diretas ao ar, sendo as perdas de energia contabilizadas pelo programa.



$$EO = O \times H \quad (\text{Equação 3.16})$$

Onde:

$EO$  são os efeitos ambientais de operação do sistema avaliado;

$O$  são os efeitos ambientais relacionados ao consumo anual total de energia para operação do sistema avaliado;

$H$  é o tempo de utilização do sistema avaliado.

A Equação 3.17 determina o consumo diário de energia para a operação da motobomba. A energia necessária para o bombeamento da água pluvial é função da altura manométrica, vazão, eficiência do conjunto motobomba e eficiência de transmissão. Existem perdas de energia nas motobombas mesmo quando essas não estão operando. Portanto, considerou-se perdas de energia de 2W no modo *standby*, conforme indicado por Retamal et al. (2009). Além disso, foi considerado também consumo energético de partida da motobomba equivalente à operação de regime por 30 segundos (RETAMAL et al., 2009)

$$E_{mb} = (P_m \times t) / n + s_p \times e_{sp} \quad (\text{Equação 3.17})$$

Onde:

$E_{mb}$  é o consumo diário de energia da motobomba (kWh/dia);

$P_m$  é a potência da motobomba (kW);

$t$  é o tempo de funcionamento da motobomba (h/dia);

$n$  é a eficiência da motobomba (adimensional);

$s_p$  é o número de partidas da motobomba (vezes/dia);

$e_{sp}$  é o consumo de energia elétrica para o arranque da motobomba (kWh/h).

O consumo de energia para bombeamento da água foi calculado por meio da Equação 3.18.

$$E_{bomb} = (E_{mb} \times C) / C_a \quad (\text{Equação 3.18})$$

Onde:

$E_{bomb}$  é o consumo de energia para bombeamento de água (MJ/m<sup>3</sup>);

$E_{mb}$  é o consumo diário de energia da motobomba (kWh/dia);

$C$  é o fator de conversão de kWh para MJ, igual a 3,6;

$C_a$  é o consumo diário de água na edificação (m<sup>3</sup>/dia).

Os efeitos ambientais de final de vida dos sistemas, em cada categoria de impacto, são definidos por meio da Equação 3.19. É levado em consideração o consumo de energia na fase de disposição final dos componentes de cada sistema, desde a desconstrução até o transporte ao local de descarte final. A disposição final adotada para este estudo foi a de um aterro sanitário. Dessa forma, considera-se apenas a energia relativa à desconstrução e ao transporte, visto que o simples descarte não produz consumo de energia direto. Não foram considerados cenários com reciclagem dos materiais, pois esse processo pode consumir grandes quantidades de energia, além de dar origem, em alguns casos, a produtos de qualidade inferior.

A distância entre a edificação em estudo e o aterro sanitário escolhido para o descarte final é utilizada como valor de entrada nos processos “*sanitary landfill*”, “*final disposal*” e “*inert waste*” da base *Ecoinvent*® 3.5.

$$EF = ED + ET + \Sigma (EFV \times n_r) \quad (\text{Equação 3.19})$$

Onde:

$EF$  são os efeitos ambientais de final de vida do sistema avaliado;

$ED$  são os efeitos ambientais da energia na fase de desconstrução;

$ET$  são os efeitos ambientais do transporte de componentes até o local de descarte final;

$EFV$  são os efeitos ambientais de final de vida de cada componente substituído ou reparado do sistema avaliado;

$n_r$  é o número de vezes que cada componente deve ser trocado ao longo do horizonte de tempo do sistema avaliado (vezes/tempo).

A unidade de cada um dos termos presentes nas Equações 3.10 a 3.16 e Equação 3.19 é relacionada à unidade da categoria de impacto e dano que estiver sendo avaliado. Estas categorias estão expostas na seção 3.4.4. Cada categoria de impacto tem seus resultados normalizados em termos percentuais em relação aos impactos ambientais totais.

#### 3.4.3.3. Quantificação das saídas

Para a quantificação das saídas é utilizada a base de dados disponível no *Ecoinvent*® (ECOINVENT, 2019). A base *Ecoinvent*® apresenta conjunto de dados de inventários de ciclo de vida em diversas áreas. A quantificação das saídas refere-se a emissões atmosféricas, emissões aquáticas e emissões no solo. Tais emissões são avaliadas em todas as fases do ciclo de vida dos sistemas (produção, uso e disposição final).

Com relação à quantificação de emissões de gases à atmosfera, leva-se em conta todas as fases do ciclo de vida. Na fase de produção dos componentes, considera-se a massa dos materiais, as distâncias referentes ao transporte (do local de extração da matéria prima até a indústria), assim como as emissões atmosféricas geradas na manufatura e distribuição dos equipamentos. Também devem ser levadas em conta as emissões atmosféricas na fase de uso do sistema, e, por fim, devem ser verificadas as emissões atmosféricas relacionadas aos processos de disposição final, levando em conta a quantidade de material e as distâncias de transporte.

As emissões aquáticas, por sua vez, são decorrentes de processos de extração e beneficiamento das matérias-primas dos materiais. Devem ser verificadas também as emissões aquáticas relacionadas aos processos de disposição final.

Na quantificação de emissões de substâncias ao solo, consideram-se as contribuições dos componentes em todas as fases do ciclo de vida. As emissões no solo relacionadas à fase de desconstrução são incluídas na análise.

#### 3.4.4. Avaliação de impacto do ciclo de vida

Após a conclusão da fase de inventário de ciclo de vida, o próximo passo é a avaliação do impacto de ciclo de vida. Nessa fase, todas as cargas ambientais presentes no

inventário são associadas e caracterizadas em termos de impactos ambientais por categoria de impacto.

As categorias de impacto selecionadas para este estudo foram escolhidas por serem as mais utilizadas em pesquisas sobre ACV realizadas na área da construção civil (LI et al., 2018; WANG et al., 2018; MAIOLO et al., 2017; AZARIJAFARI et al., 2016; RIBEIRO, 2015; DE SOUZA et al., 2012; KALBUSCH, 2011; HUANG et al., 2009; SANTERO; HORVATH 2009). 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 o relacionamento dos fluxos elementares das categorias selecionadas, foi utilizado o método de cálculo *ReCiPe*, com perspectiva hierárquica e dados de referência global média (HUIJBREGTS et al., 2016). Este método compreende dezoito categorias de impacto intermediárias (*midpoint*) e três categorias de impacto finais (*endpoint*). As intermediárias são: Aquecimento global, Depleção de ozônio na estratosfera, Radiação ionizante, Formação de ozônio (saúde humana), Formação de partículas finas, Formação de ozônio (ecossistemas terrestres), Acidificação dos solos, Eutrofização de água potável, Eutrofização marinha, 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.

O Quadro 3.3 apresenta as categorias de impacto ambiental do método adotado no estudo de acordo com a nomenclatura em português/inglês e as respectivas unidades definidas no programa *SimaPro*, método *ReCiPe* 2016. O Apêndice I descreve resumidamente as características de cada categoria intermediária (*midpoint*) selecionada no estudo.

Quadro 3.3. Categorias de impactos ambientais intermediárias selecionadas no estudo.

<b>Categorias</b>	<b>Unidade</b>
Aquecimento global / <i>Global warming</i>	kg CO <sub>2</sub> 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 <sub>x</sub> eq
Formação de partículas finas / <i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM <sub>2,5</sub> eq
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres / <i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NO <sub>x</sub> eq
Acidificação dos solos / <i>Terrestrial acidification</i>	kg SO <sub>2</sub> 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 <sup>2</sup> a crop 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 <sup>3</sup>

Após a etapa de normalização, o método *ReCiPe* agrupa as dezoito categorias intermediárias em três categorias finais: Danos à saúde humana, Danos à diversidade dos ecossistemas e Danos à disponibilidade de recursos. A escolha do método *ReCiPe* foi feita pois o método envolve ambas as abordagens (*midpoint* e *endpoint*) na avaliação de impactos do ciclo de vida.

A fase de avaliação do impacto da ACV visa compreender a significância dos impactos ambientais potenciais, através dos resultados do inventário. O processo envolve a associação de dados de inventário com as categorias de impacto selecionadas. Os fluxos de materiais e energia, identificados no inventário, são associados aos impactos ambientais. Nessa fase, inclui-se processo iterativo de análise do objetivo e escopo do estudo de ACV a fim de verificar se os objetivos do estudo foram atingidos ou para modificar o objetivo e escopo se a avaliação indicar que estes não podem ser alcançados (ABNT, 2009a).

#### 3.4.5. Interpretação do ciclo de vida

Na fase de interpretação do ciclo de vida são consideradas em conjunto as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto. É realizada a comparação

dos efeitos ambientais por categoria de impacto acumulados ao longo do ciclo de vida em cada cenário. Entre as interpretações destacam-se: as categorias de impacto mais afetadas; os componentes com maior impacto ambiental; as principais fases do ciclo de vida que contribuem para os impactos ambientais; entre outros.

Nesta etapa, os resultados devem ser consistentes com o objetivo e escopo definidos para o estudo e que levem a conclusões, deixem claro as limitações e forneçam recomendações. Caso se faça necessário, a fase de interpretação deve envolver um processo iterativo de análise e revisão do escopo da ACV. É importante ressaltar que os resultados da avaliação do ciclo de vida indicam efeitos ambientais potenciais, sendo estes baseados em uma abordagem relativa. Não há como prever impactos reais sobre os pontos finais de cada categoria, a extrapolação de limites, margens de segurança ou riscos (ABNT, 2009a).

### **3.5. Resumo do método proposto**

O método deste trabalho visa avaliar de forma comparativa os efeitos ambientais causados pela implantação de um pavimento permeável (cenário 1) no estacionamento de um edifício público em relação a um sistema com pavimento convencional (cenário 2). No cenário 1, utiliza-se a água pluvial captada pelo pavimento permeável em usos não potáveis da edificação. No cenário 2, os usos não potáveis da edificação são abastecidos pelo sistema hidráulico predial convencional.

Na primeira etapa do método é analisado o consumo de água na edificação e estimado o potencial de economia de água potável que poderia ser obtido por meio do aproveitamento de água pluvial captada pelo pavimento. Nesta etapa ocorre também o dimensionamento dos pavimentos (permeável e convencional, um para cada cenário) e dos reservatórios.

Na etapa seguinte, são definidos o objetivo e escopo do estudo. São determinadas a função, a configuração dos sistemas, a unidade funcional e o horizonte de tempo da avaliação.

Na fase de inventário são catalogados todos os dados de entrada e saída dos dois cenários avaliados. A relação dos dados com os sistemas é feita por meio de equações baseadas no método proposto por Ribeiro (2015). Estas equações permitem quantificar os efeitos ambientais nas diversas fases da ACV.

A fase de avaliação de impacto de ciclo de vida compreende a quantificação dos impactos ambientais por meio da avaliação dos dados quantificados na fase de inventário. Essa avaliação é feita com o auxílio de programas computacionais específicos para ACV.

A última etapa é a de interpretação dos impactos ambientais. Nesta fase são identificadas as categorias de impacto mais afetadas, os componentes com maior impacto ambiental e as principais fases do ciclo de vida que contribuem para os impactos ambientais.

## 4. Resultados

Este capítulo apresenta os resultados referentes aos dados pluviométricos do município de Florianópolis, área de captação de água pluvial, consumo de água na edificação e capacidades dos reservatórios. Também são mostrados os potenciais de economia de água potável e de energia que poderiam ser alcançados com o uso da água pluvial captada no pavimento permeável instalado no estacionamento da edificação. Além disso, são apresentados o dimensionamento dos pavimentos, drenos e sistemas hidráulicos. Após o dimensionamento dos dois cenários propostos, são apresentados também os resultados da avaliação do ciclo de vida, envolvendo os dados de entrada e saída na fase de inventário e avaliação e interpretação das categorias de impacto selecionadas no estudo.

### 4.1. Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial

Esta seção apresenta os resultados obtidos para o Cenário 1 – Sistema com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis na edificação.

#### 4.1.1. *Dados pluviométricos*

Os dados sobre precipitação pluviométrica na cidade de Florianópolis foram utilizados para determinar o potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento da água pluvial coletada pelo pavimento permeável instalado no estacionamento da edificação. A Figura 4.1 apresenta a precipitação diária do município de Florianópolis de 2002 a 2017. Estes dados foram utilizados nas simulações feitas com auxílio do programa Netuno 4 para o cálculo do potencial de economia de água potável. A Figura 4.2, por sua vez, mostra a precipitação mensal média de Florianópolis para o mesmo período, 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 4.1. Precipitação diária de Florianópolis de 2002 a 2017.

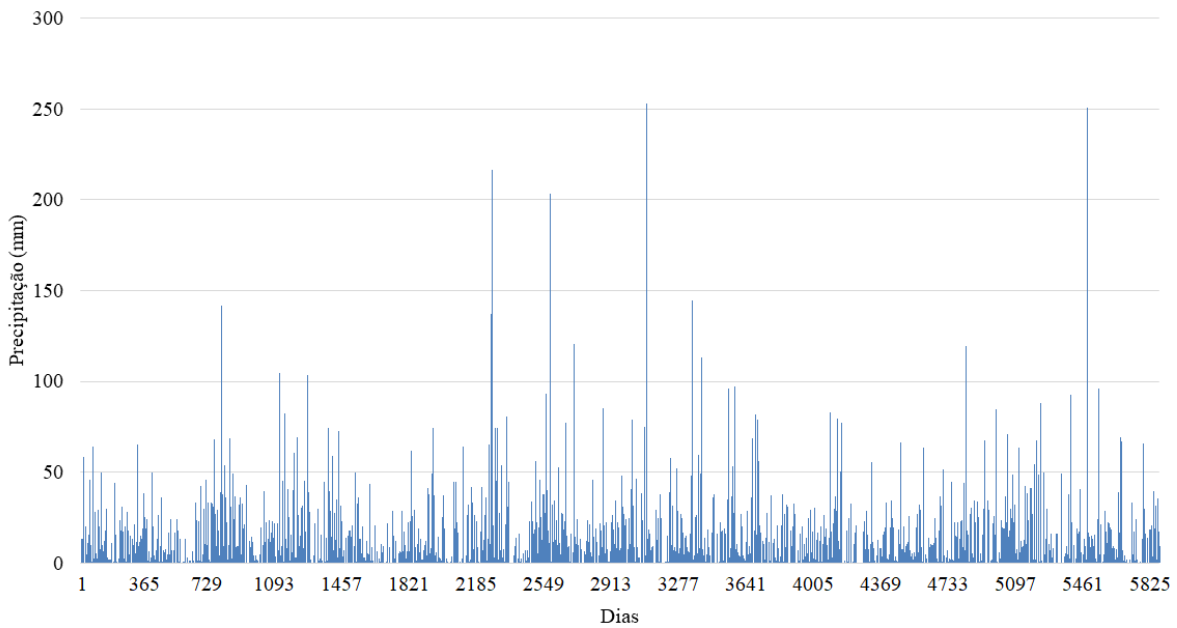
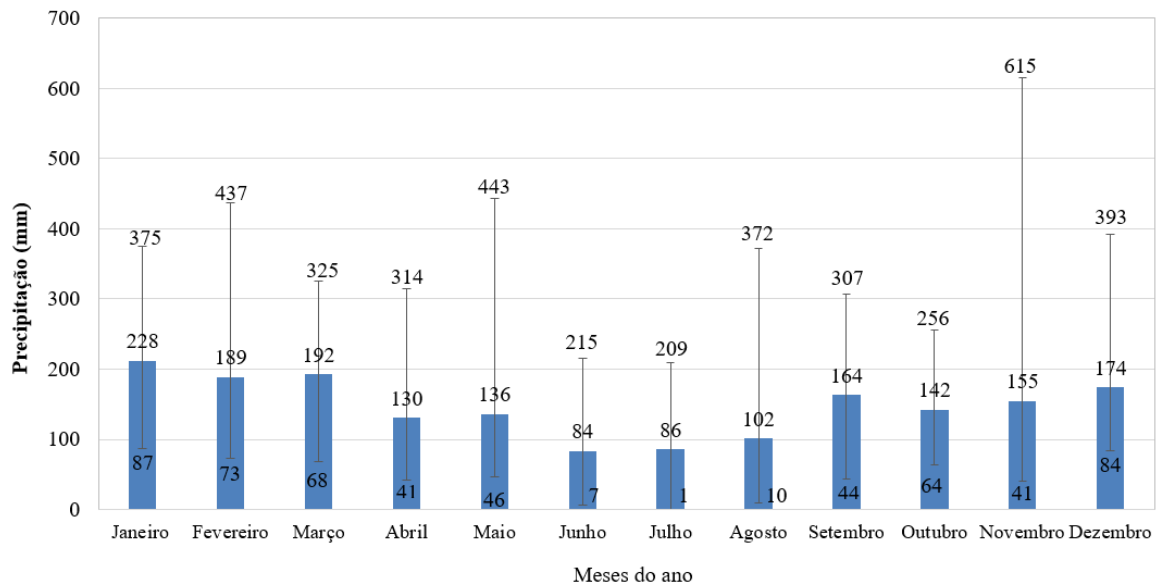


Figura 4.2. Precipitação mensal média de Florianópolis de 2002 a 2017, com valores máximos e mínimos para cada mês.

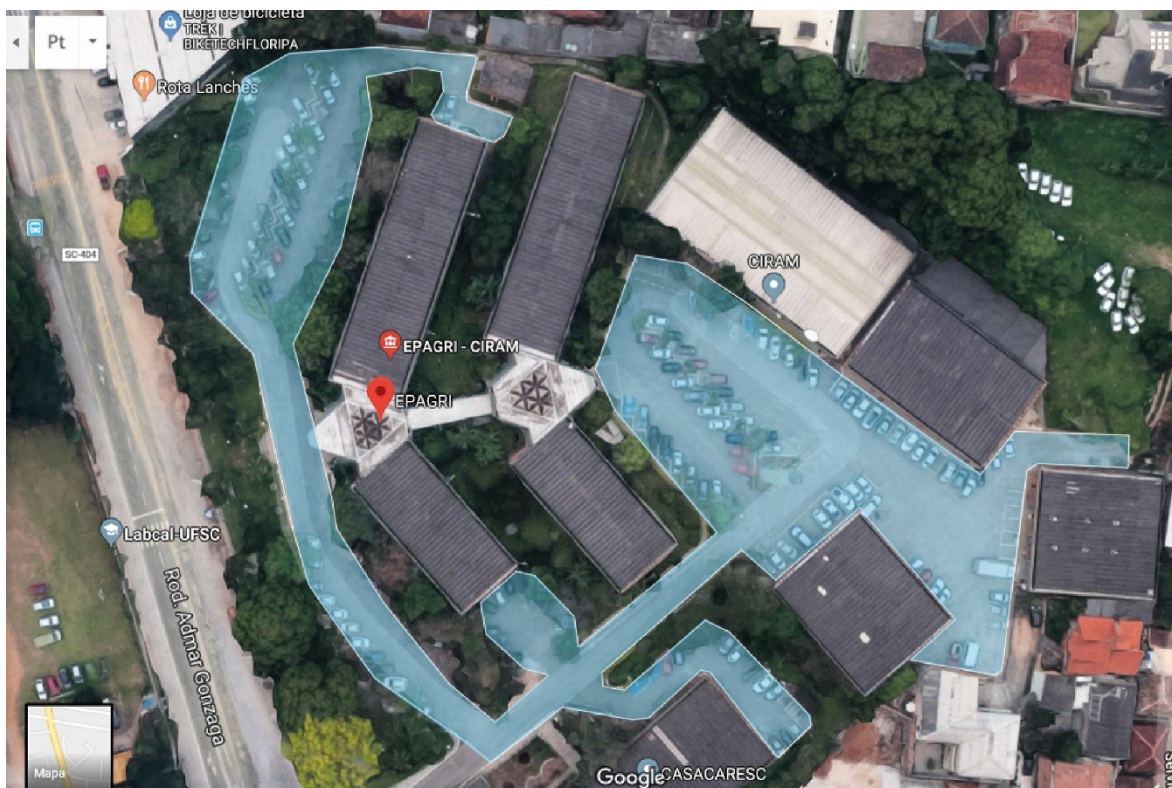


#### 4.1.2. Área de captação

Conforme exposto na seção 3.2.2.2, a área utilizada para captação da água pluvial foi calculada com auxílio do programa computacional Google Earth (GOOGLE, 2018), que

possui uma ferramenta de medição de área. A área aproximada estimada para a coleta da água pluvial é de 5.800 m<sup>2</sup>, envolvendo as áreas de calçadas (aproximadamente 350 m<sup>2</sup> de área de contribuição) e área do estacionamento propriamente dito (aproximadamente 5.450 m<sup>2</sup>). As calçadas entre as vagas, embora não sejam permeáveis, também contribuem para o escoamento superficial gerado, escoando para o pavimento permeável. Na Figura 4.3 é possível ter uma noção das dimensões da área de coleta da água pluvial.

Figura 4.3. Imagem de satélite da área de coleta de água pluvial.

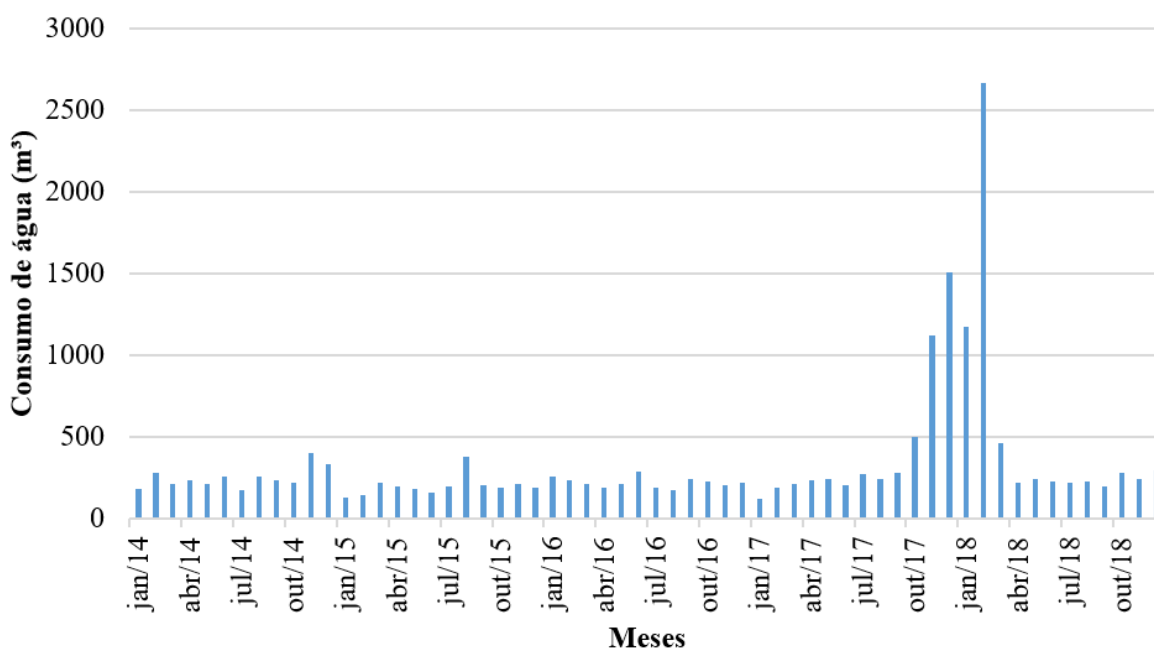


Fonte: Adaptado de Google Earth. Acesso em 03 mai. 2019.

#### 4.1.3. Consumo de água na edificação

Os dados de consumo de água da edificação foram fornecidos pela equipe administrativa da Epagri, conforme exposto na seção 3.2.2.3. Foram disponibilizados dados referentes aos anos de 2014 a 2018, totalizando cinco anos. A Figura 4.4 apresenta o consumo de água na edificação entre os meses de janeiro de 2014 e dezembro de 2018.

Figura 4.4. Consumo de água na edificação entre janeiro de 2014 e dezembro de 2018.



Nota-se que os meses de outubro de 2017 a março de 2018 apresentaram consumos exageradamente maiores do que os demais meses. Segundo a administração da Epagri, tais consumos foram obtidos devido a reformas feitas na edificação durante esse período. Para verificar a discrepância desses meses em relação aos demais, foi utilizado o teste de Chauvenet, que permite determinar se um valor amostral é discrepante em relação aos demais valores restantes da amostra. Dessa forma, foi confirmado que os consumos dos meses de outubro de 2017 a março de 2018 são discrepantes em relação aos demais meses. Portanto, tais dados foram excluídos da amostra. Assim, os consumos dos meses excluídos não foram considerados na elaboração das Figuras 4.5 e 4.6.

A Figura 4.5 apresenta o consumo anual na edificação referente a cada um dos cinco anos presentes na série histórica. A Figura 4.6 mostra o consumo médio mensal, com consumos máximos e mínimos para o período. Nota-se que entre 2014 e 2018 foram verificados consumos semelhantes, variando de 2416 a 3002 m<sup>3</sup> por ano. A média mensal para o mesmo período foi de 226,68 m<sup>3</sup>. Percebe-se que o mês de janeiro é o que possui a menor média, devido principalmente ao período de recesso dos funcionários em parte desse mês.

Figura 4.5. Consumo anual de água na Epagri (2014 a 2018).

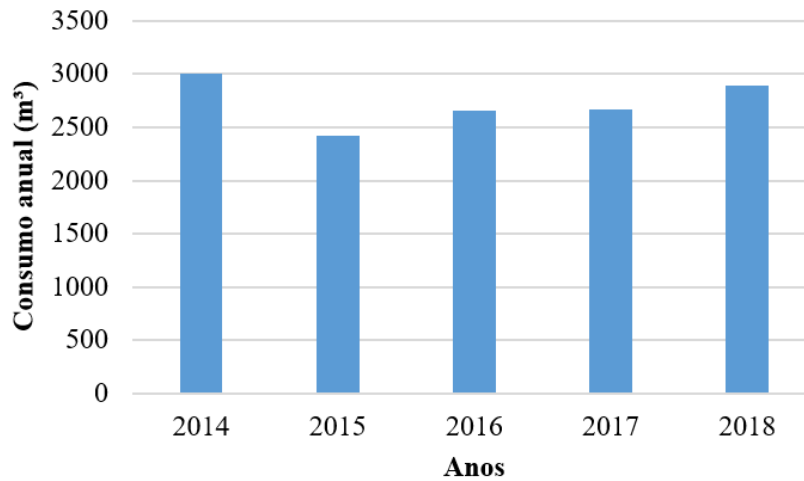
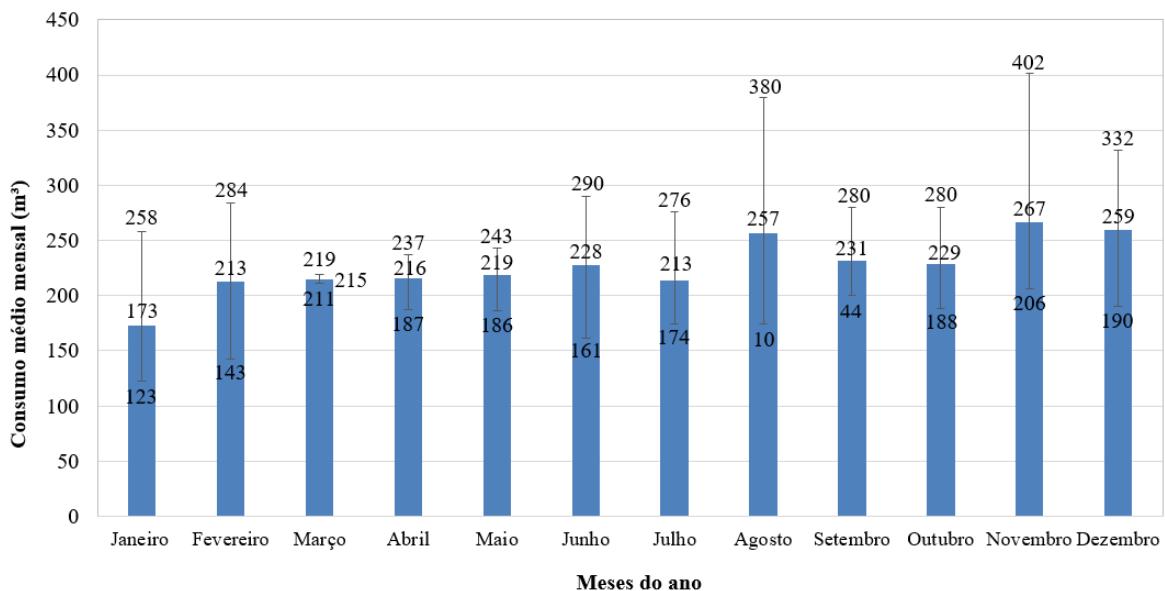


Figura 4.6. Consumo máximo, médio e mínimo mensal na Epagri (2014 a 2018).



#### 4.1.4. Volume do reservatório superior de água pluvial

Por meio da Equação 3.1 calculou-se o volume do reservatório superior de água pluvial necessário para o sistema. A média mensal para o período de consumo avaliado foi de 226,68 m<sup>3</sup>, conforme visto na seção 4.1.3. Considerando 30 dias por mês, tem-se que o consumo diário foi de 7.556,17 litros/dia. A população da edificação é igual a 271 pessoas. Assim sendo, obteve-se consumo igual a 27,88 litros/pessoa/dia. A demanda de água

pluvial é igual a 82,0% do consumo total. O volume do reservatório superior de água pluvial calculado foi de 6.196 litros. Foram adotados quatro reservatórios superiores de água pluvial, um para cada bloco da edificação, com volume igual a 2.000 litros cada, totalizando 8.000 litros.

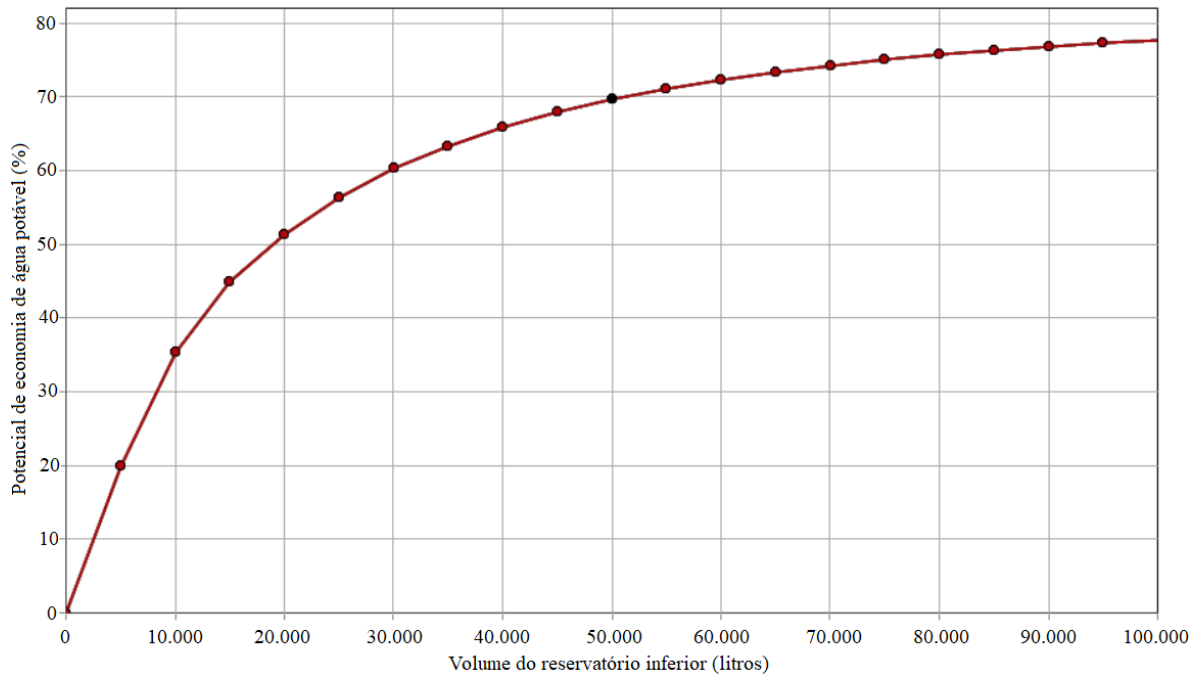
#### 4.1.5. Potencial de economia de água potável

Com os dados apresentados nas seções 4.1.1 a 4.1.4, foi possível calcular, com auxílio do programa Netuno, o volume do reservatório inferior necessário ao sistema de aproveitamento de água pluvial e também o potencial de economia de água potável que tal sistema poderia gerar. 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. A Tabela 4.1 apresenta os dados de entrada utilizados no programa Netuno, enquanto a Figura 4.7 mostra o potencial de economia de água potável conforme a variação do volume do reservatório inferior.

Tabela 4.1. Dados de entrada no programa Netuno.

<b>Variável de entrada</b>	<b>Valor</b>
Quantidade de descarte do escoamento inicial	0 mm
Área de captação da água pluvial	5.800 m <sup>2</sup>
Demanda diária per capita de água potável	27,88 L/capita
População total atendida	271
Demanda de água pluvial (% do consumo total de água na edificação)	82,0%
Coefficiente de aproveitamento da água (infiltração do pavimento)	0,8
Volume máximo do reservatório inferior	100.000 L
Intervalo entre volumes do reservatório inferior	5.000 L
Volume do reservatório superior	8.000 L
Volume de água no reservatório superior abaixo do qual há recalque	10%
Diferença entre potenciais de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial	0,5%/m <sup>3</sup>

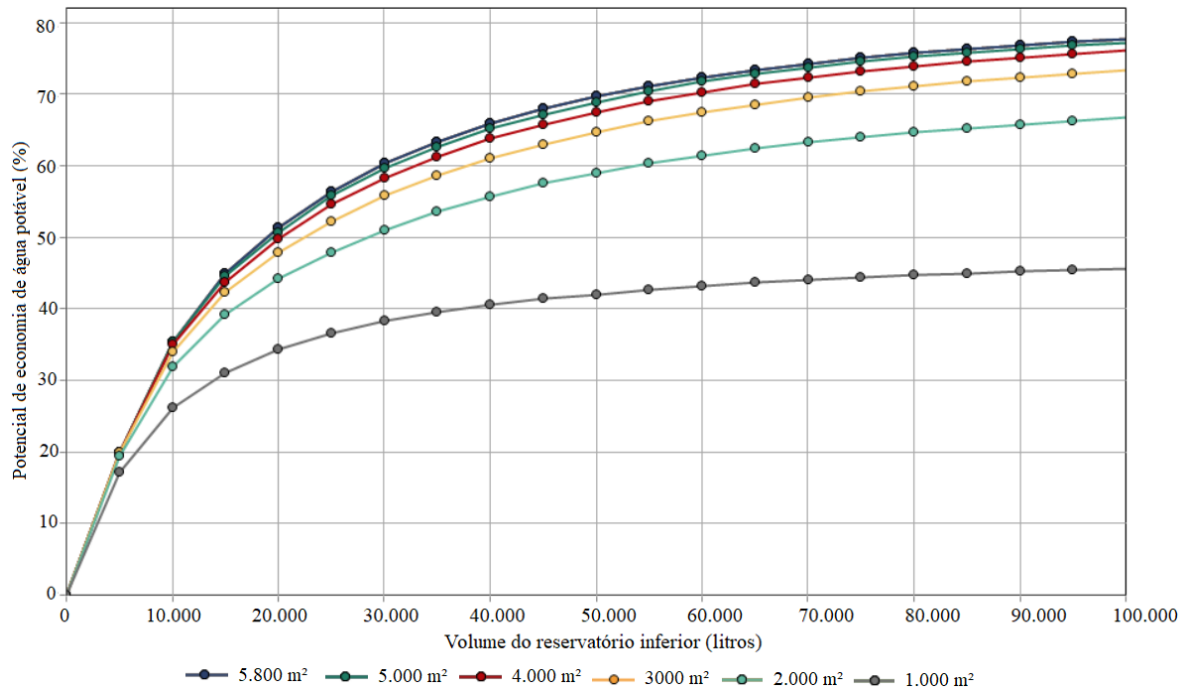
Figura 4.7. Potencial de economia de água potável.



Utilizando diferença entre potenciais de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial igual a  $0,5\%/m^3$ , foi adotado, com o auxílio do programa Netuno, volume do reservatório inferior igual a 50.000 litros. O potencial de economia de água potável atingido foi de 69,6%, que equivale a um consumo médio de água pluvial igual a 5.260 litros/dia. Com relação ao atendimento de água pluvial, o volume adotado atende completamente a demanda em 83,3% dos dias, parcialmente em 3,2% e não atende em 13,5%. O volume de água pluvial extravasado diariamente é igual a 16.864 litros.

Nota-se o grande volume de água pluvial extravasado e, dessa forma, conclui-se que para a pluviosidade do local e o volume adotado para o reservatório inferior, a área de coleta de água pluvial é maior que a necessária para atender a demanda da edificação. Assim, a instalação de um pavimento permeável apenas em parte do estacionamento já atenderia grande parte do consumo. Esse fato pode ser verificado na Figura 4.8 que mostra o potencial de economia de água potável em função das áreas de coleta de água pluvial menores que a utilizada ( $5.800 m^2$ ).

Figura 4.8. Potencial de economia de água potável para diferentes áreas de captação.



Observa-se que, adotando reservatório inferior de 50.000 litros, o potencial de economia reduz de 69,6%, com 5.800 m<sup>2</sup>, para 67,5%, considerando área de 4.000 m<sup>2</sup>, e 64,7%, para área de 3.000 m<sup>2</sup>. Diferença não muito significativa se comparada à redução da área. Nota-se, porém que com 1.000 m<sup>2</sup>, há queda mais acentuada no potencial de economia, reduzindo para 42,0%.

No entanto, sabe-se que uma das funções do pavimento permeável é amortecer as vazões em caso de chuvas intensas e, no caso do pavimento do tipo sem infiltração no solo, é possível aproveitar a água infiltrada. Dessa forma, ao invés de reduzir a área de coleta, pode se considerar a utilização da água coletada também nas edificações adjacentes, otimizando o sistema de aproveitamento de água pluvial.

Outra possibilidade para minimizar o volume de água pluvial extravasado seria optar pela construção de um pavimento permeável com infiltração parcial no solo. Ressalta-se que para essa opção deve ser avaliado o tipo de solo do subleito e se sua permeabilidade se adequa aos requisitos necessários (HAMMES et al., 2018).

O consumo médio diário de água na edificação é igual a 7.556 litros, conforme exposto na seção 4.1.4. Desse total, um volume de 5.260 litros é atendido por água pluvial

em usos não potáveis, conforme calculado nesta seção. Portanto, os outros 2.296 litros são utilizados em usos potáveis (lavatórios, pias de cozinha, chuveiros, etc.). Essa demanda de água potável é abastecida pela concessionária do município. Dessa forma, são considerados, para este cenário, um reservatório inferior de água potável com capacidade igual a 5.000 litros e reservatório superior com capacidade igual a 4.000 litros, dividido em quatro reservatórios de 1.000 litros, um para cada bloco da edificação. A motobomba utilizada para recalcar água do reservatório inferior de água potável para o reservatório superior tem potência de  $\frac{1}{4}$  CV, calculada por meio da Equação 3.8, com rendimento de 50%. O tempo de funcionamento diário da motobomba é de 4 h, conforme recomenda a NBR 5626 (ABNT, 1998).

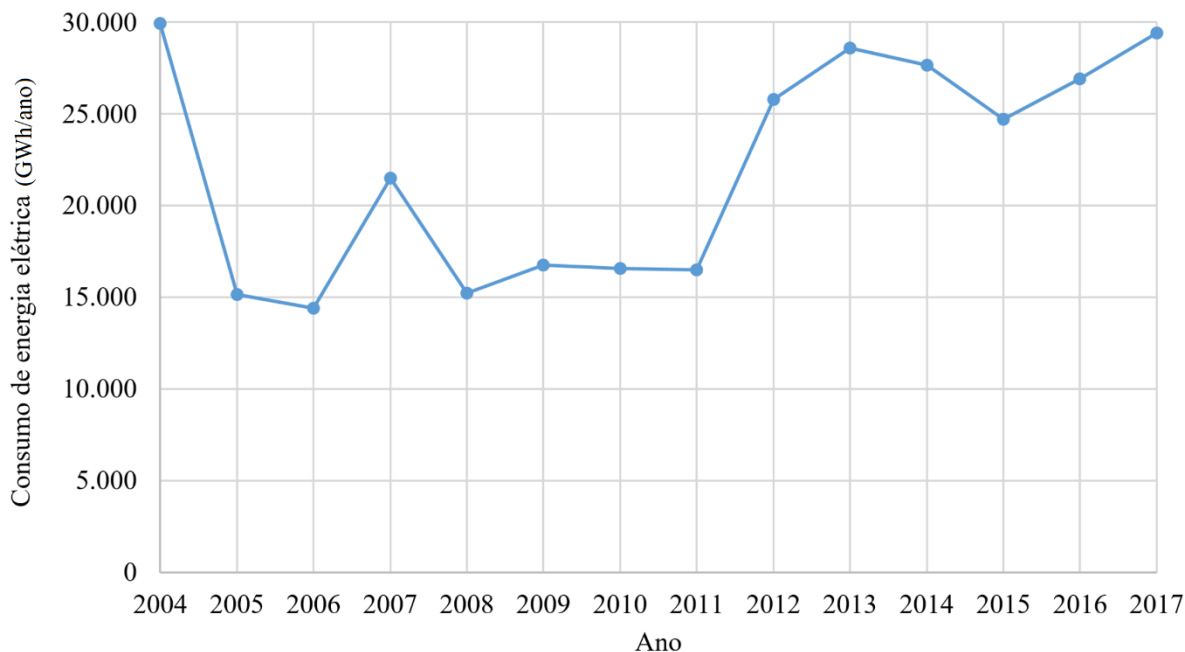
#### *4.1.6. Potencial de economia de energia para tratamento e abastecimento de água potável*

Segundo Cureau (2019), os consumos de água e energia estão diretamente ligados, com a necessidade do uso de energia para tratar e transportar água. Dessa forma, a conservação desses recursos também está relacionada. Em geral, o consumo de energia elétrica nesses processos é medido em termos do seu índice de consumo, ou seja, consumo de energia por unidade de volume de água ( $\text{kWh/m}^3$ ).

Conforme visto na seção 4.1.5, com a utilização de um reservatório inferior de 50.000 litros e reservatório superior de 8.000 litros, obteve-se potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial igual a  $5,26 \text{ m}^3/\text{dia}$  na edificação da Epagri. Os dados referentes ao consumo total de energia elétrica e ao índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água do município de Florianópolis foram obtidos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2018). A Figura 4.9 apresenta o consumo total de energia elétrica nos sistemas de água do município de Florianópolis entre 2004 e 2017, enquanto a Figura 4.10 mostra o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água para o mesmo período.



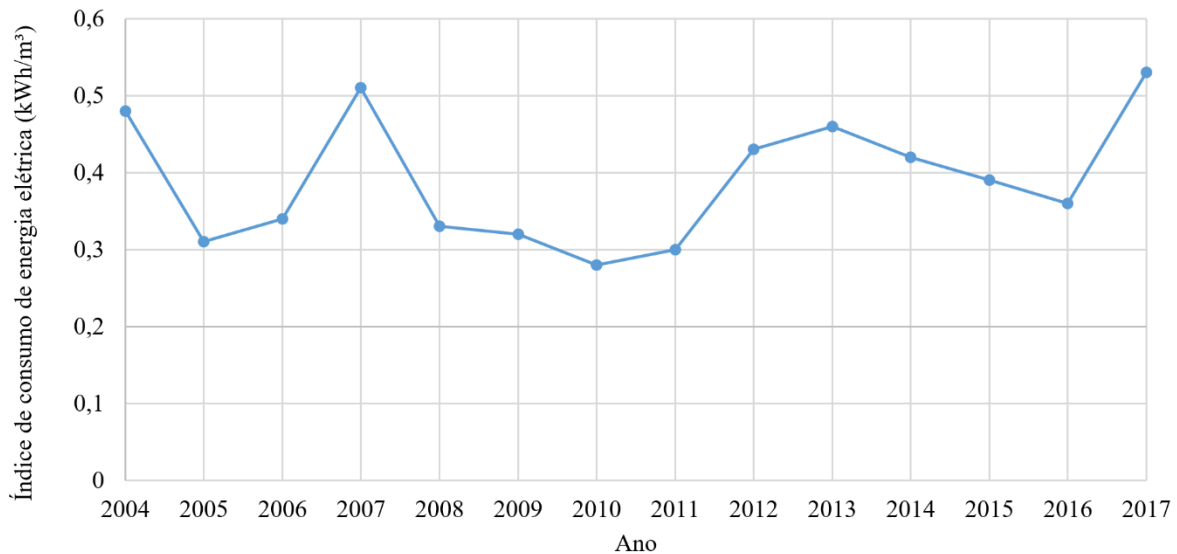
Figura 4.9. Consumo total de energia elétrica nos sistemas de água do município de Florianópolis entre 2004 e 2017.



Fonte: Adaptado de SNIS (2018).

A média do índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água no período averiguado foi igual a 0,39 kWh/m<sup>3</sup>. Por meio da Equação 3.2, tem-se que o potencial de economia de energia para o sistema é de 2,05 kWh/dia. Portanto, se a Epagri adotasse o aproveitamento de água pluvial captada pelo pavimento permeável, em 20 anos (vida útil do sistema), a redução do consumo de energia pela concessionária seria de 14,77 MWh. Entretanto, o sistema com o aproveitamento de água pluvial exigiria consumo maior de energia elétrica na edificação devido à motobomba extra utilizada para o bombeamento da água pluvial, conforme explicado na seção 4.4.2.2.

Figura 4.10. Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água no município de Florianópolis entre 2004 e 2017.



Fonte: Adaptado de SNIS (2018).

#### 4.1.7. Dimensionamento hidráulico do pavimento

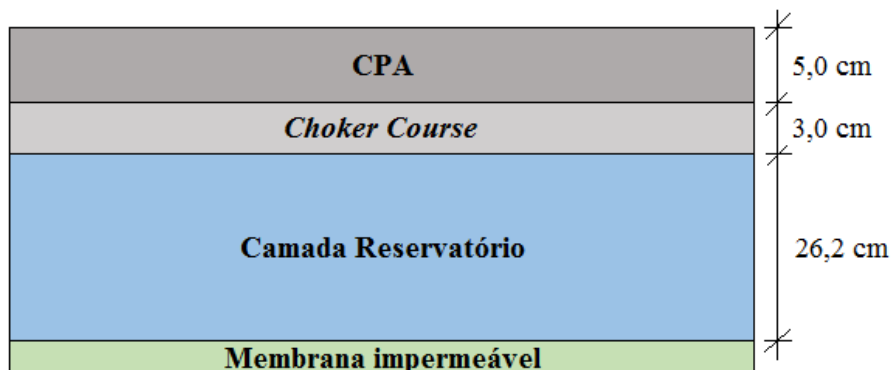
A espessura da camada reservatório, que serve como reservatório temporário para a água que infiltra no pavimento permeável, foi calculada por meio da Equação 3.3. A intensidade média de chuva de projeto foi calculada por meio da Equação 3.5, utilizando-se período de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos, valores mínimos recomendados pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Como resultado, obteve-se intensidade de chuva igual a 102,7 mm/h.

A vazão de saída constante ( $Q_s$ ) é igual a 24,81 m<sup>3</sup>/h, que corresponde ao valor da descarga do volume de 595,39 m<sup>3</sup> de água pluvial em 24 h. O volume de água pluvial foi calculado multiplicando a intensidade de chuva (102,7 mm/h) pela área de drenagem (5.800 m<sup>2</sup>). A área de drenagem efetiva ( $A_d$ ) é igual a 5.450 m<sup>2</sup>, conforme visto na seção 4.1.2. Dessa forma, por meio da equação 3.4, tem-se que a vazão de saída específica ( $q_s$ ) é de 4,55 mm/h.

O valor de  $R$ , relação entre a área de contribuição (5.800 m<sup>2</sup>) e a área de pavimento permeável (5.450 m<sup>2</sup>), é igual a 1,06. Como mencionado anteriormente, o volume de vazios ( $V_r$ ) é igual a 40% (HAMMES et al., 2018). Por meio da Equação 3.3, tem-se que a

espessura da camada reservatório é igual a 26,2 cm. A Figura 4.11 ilustra o dimensionamento final obtido para o pavimento permeável deste estudo.

Figura 4.11. Espessuras das camadas do pavimento permeável.



#### 4.1.8. Dimensionamento dos drenos

O dimensionamento dos drenos, instalados na parte inferior da camada reservatório do pavimento, foi feito de acordo com a Equação 3.6. Conforme detalhado na seção 3.2.1, a camada reservatório é composta por brita nº 3 (granulometria de 2,5 a 5,0 cm). A permeabilidade da camada reservatório foi determinada com base no Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (DNIT, 2006), que aponta coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) igual a 45 cm/s (1.620.000 mm/h). Considerando a espessura igual a 0,262 m e a intensidade média máxima da chuva de projeto igual a 102,7 mm/h, obteve-se espaçamento entre drenos igual a 65,3 m.

Entretanto, o valor calculado para o espaçamento entre os drenos ultrapassa o limite de 6 m recomendado pela *TDEC* (2014). Portanto, deve-se atentar para a efetividade da tubulação, que deve atender a vazão requisitada. Tomaz (2009) define vazões atendidas por condutos circulares, de acordo com o diâmetro e considerando declividade igual a 0,005 m/m, conforme mostra a Tabela 4.2. A vazão de saída constante ( $Q_s$ ) para o presente caso é de 24,81 m<sup>3</sup>/h (6,89 l/s). Portanto, faz-se necessária a utilização de um dreno de fundo com diâmetro mínimo de 150 mm. Foi considerada também a existência de drenos ramificados de 100 mm de diâmetro nos locais onde o estacionamento possui distância maior que 6 m a partir do dreno de fundo, conforme mostra a Figura 4.12, visto que este é o espaçamento

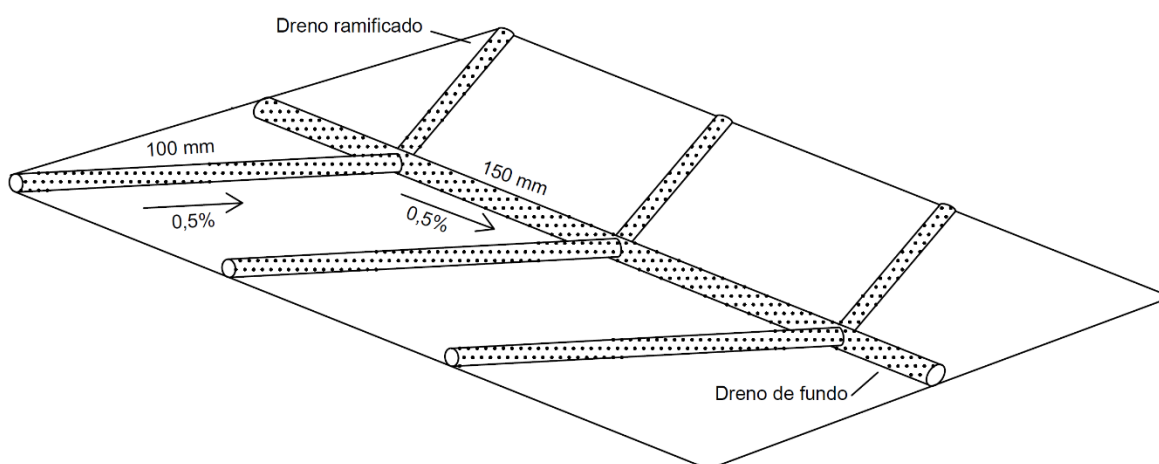
máximo recomendado entre os drenos (TDEC, 2014). A declividade adotada é de no mínimo 0,5%.

Tabela 4.2. Vazões atendidas por condutos circulares com declividade igual a 0,005 m/m.

Diâmetro (cm)	10	15	20	25	30	35
Vazão (l/s)	3	9	20	36	59	89

Fonte: Tomaz (2009).

Figura 4.12. Esquema dos drenos de fundo e drenos ramificados utilizados no pavimento.



#### 4.1.9. Dimensionamento do sistema hidráulico

O diâmetro da tubulação de recalque do sistema hidráulico do aproveitamento de água pluvial foi calculado por meio da Equação 3.9. A vazão de recalque é igual ao consumo máximo diário de água pluvial na edificação dividido pelo número de horas que a motobomba funciona por dia. O tempo diário de funcionamento da motobomba recomendado pela NBR 5626 (ABNT, 1998), para prédios de escritório, é igual a 4 h. O consumo máximo de água registrado na edificação nos últimos cinco anos foi de 402 m<sup>3</sup>, em novembro de 2014. Considerando que a demanda de água pluvial na edificação é igual a 82%, obtêm-se consumo diário máximo de água pluvial igual a 11 m<sup>3</sup>. Dessa forma, a vazão de recalque é de  $7,63 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s. O diâmetro da tubulação de recalque calculado é de 0,0287 m (28,7 mm). Considerou-se, então, diâmetro de recalque igual a 32 mm e diâmetro

de sucção igual a 40 mm (diâmetro comercialmente disponível imediatamente superior ao diâmetro de recalque).

Para o cálculo da altura manométrica, utilizou-se a Equação 3.7. A altura manométrica de recalque é igual à diferença entre cotas de níveis de onde está locada a motobomba e a cota da tubulação de alimentação do reservatório superior de água pluvial. A altura manométrica de sucção, por sua vez, é igual à diferença entre cotas de níveis da válvula de pé e crivo do reservatório inferior (localizada a 10 cm do fundo do reservatório), até a cota onde está locada a motobomba. Tais valores foram estimados por meio do projeto hidrossanitário da edificação. A altura manométrica de recalque é de 7,05 m, enquanto a altura manométrica de sucção é igual a 4,45 m. Considerando o fator de majoração ( $K$ ) igual a 1,2, tem-se que a altura manométrica total é igual a 13,8 m.

O cálculo da potência das motobombas foi feito por meio da Equação 3.8. Considerou-se o rendimento da motobomba ( $\eta$ ) igual a 50%. Dessa forma, a potência calculada é igual a 0,28 CV. Foram escolhidas motobombas com melhores rendimentos e potência superior ao valor calculado, comercialmente disponíveis no mercado. Optou-se por motobombas de  $\frac{1}{2}$  CV que atendessem a altura manométrica de 13,8 m.

#### **4.2. Cenário 2 – Pavimento tradicional, drenagem e abastecimento convencionais**

O segundo cenário considera um modelo de pavimento tradicional, com drenagem convencional e, portanto, sem aproveitamento de água pluvial. No dimensionamento do pavimento tradicional foram omitidos os dimensionamentos das calçadas e meios-fios, conforme explicado na seção 3.4.2.5, visto que esses são idênticos para os dois cenários e, portanto, possuem os mesmos processos.

O tráfego previsto para o estacionamento é leve. Portanto, foram adotadas base de 15 cm e camada de revestimento igual a 3 cm. O valor mínimo adotado para o Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) do subleito foi de 8%. Com relação à terraplenagem, os serviços devem preservar declividade mínima de 0,5% no sentido longitudinal e de 1% a 3% no sentido transversal.

As execuções da regularização do sub-leito e da base envolvem os seguintes serviços: escarificação e espalhamento dos materiais, homogeneização dos materiais secos, umedecimento e homogeneização da umidade, compactação e acabamento. A base é

composta de material granular, com ISC maior ou igual a 40% e expansão menor ou igual a 0,5%. Os equipamentos utilizados nestes serviços são: motoniveladora, grade de disco, caminhões pipa e rolos compactadores.

Para a imprimação do pavimento, a taxa de asfalto diluído utilizada é de 1,2 litros/m<sup>2</sup>. O ligante asfáltico indicado é o asfalto diluído do tipo CM-30. Os equipamentos utilizados para a execução da imprimação são: vassoura mecânica rotativa, caminhão espargidor e espargidor manual.

O revestimento de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), por sua vez, tem em sua composição os seguintes materiais: cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70), agregados graúdos (pedra britada, escória britada, seixo rolado) e agregados miúdos (areia e pó de pedra). Caminhões basculantes são usados para o transporte da mistura, e os equipamentos usados para compressão são os rolos metálicos lisos, tipo tandem ou rolos metálicos liso-vibratórios e rolos pneumáticos auto-propulsores.

Com relação à drenagem da água pluvial, são utilizadas tubulações com 150 mm de diâmetro, conforme Tabela 4.2, 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.

Como neste cenário não há o aproveitamento de água pluvial, todos os usos finais da edificação são atendidos por água potável proveniente da rede pública de abastecimento. Dessa forma, para atender à demanda diária média de 7.556 litros da edificação, são utilizados um reservatório inferior com capacidade de 10.000 litros, e reservatório superior com volume total também de 10.000 litros, dividido em quatro reservatórios de volume igual a 2.500 litros (um para cada setor da edificação). A motobomba utilizada para recalcar a água do reservatório inferior para o superior tem potência de ½ CV. Este é o sistema hidráulico encontrado atualmente na edificação em estudo.

### **4.3. Resumo do sistema hidráulico nos dois cenários**

A Tabela 4.3 apresenta um resumo das especificações e componentes utilizados no sistema hidráulico de cada um dos cenários dimensionados. Os demais componentes (tubulações, conexões, entre outros) e os tipos de material utilizado estão detalhados na seção 4.4.

Tabela 4.3. Resumo dos componentes e especificações utilizados em cada um dos cenários.

<b>Componentes / Especificações</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>
Demanda média de água potável (litros/dia)	2.296	7.556
Demanda média de água pluvial (litros/dia)	5.260	-
Reservatório inferior de água potável (litros)	5.000	10.000
Reservatório superior de água potável (litros)	4.000	10.000
Reservatório inferior de água pluvial (litros)	50.000	-
Reservatório superior de água pluvial (litros)	8.000	-
Potência motobomba água potável (CV)	1/4	1/2
Potência motobomba água pluvial (CV)	1/2	-
Tempo de funcionamento das motobombas (h/dia)	4	4
Rendimento das motobombas (%)	50	50

#### **4.4. Comparação dos sistemas por meio da avaliação do ciclo de vida**

##### *4.4.1. Unidade funcional*

Com os resultados obtidos nas seções 4.1.2 e 4.1.3, foi calculada a unidade funcional – drenagem da área do estacionamento (em m<sup>2</sup>) e fornecimento de água (em m<sup>3</sup>) para a edificação durante o horizonte de tempo de 20 anos – que totalizou 5.800 m<sup>2</sup> de área drenada e 54.404 m<sup>3</sup> de água fornecida.

A quantificação das entradas utilizadas nas simulações da avaliação do ciclo de vida dos sistemas no programa *SimaPro* foi realizada considerando a unidade funcional definida.

##### *4.4.2. Inventário do ciclo de vida*

Nesta etapa foram compilados e quantificados todos os dados de entrada e saída dos sistemas estudados nas etapas do ciclo de vida (desde a extração da matéria-prima até a disposição final). O Apêndice II mostra as especificações e os quantitativos dos componentes dos sistemas. As massas dos equipamentos e componentes constituintes foram obtidas por meio de especificações técnicas de fabricantes ou, em alguns casos, revisão de literatura (TIGRE, 2019; 3P TECHNIK, 2019; CMBAQUA, 2019;

SCHNEIDER, 2019; FORTLEV, 2019; DE MATTIA; STEINER, 2017; RIBEIRO, 2015; TAVARES, 2006).

#### 4.4.2.1. Vida útil dos componentes dos sistemas

A vida útil dos componentes também foi obtida por meio de especificações técnicas de fabricantes ou revisão de literatura. A Tabela 4.4 apresenta o tempo de vida útil adotado para cada componente dos sistemas, a referência utilizada e a relação entre a vida útil do sistema e a vida útil de cada componente. Essa relação é utilizada para determinar a contribuição que cada componente gera sobre o impacto de seu respectivo sistema. Por exemplo, se um reservatório em PEAD causa determinado potencial de impacto ambiental, o valor deste potencial impacto deve ser multiplicado por 0,31, que é a relação entre a vida útil do sistema (20 anos) e a vida útil do reservatório (65 anos).

Este cálculo é feito para evitar que o sistema seja responsabilizado por impactos ambientais de componentes cuja vida útil extrapola o seu horizonte de tempo. Para tal consideração, assume-se que os componentes com vida útil maior que o horizonte de tempo são reutilizados em caso de reforma no sistema de pavimentação e/ou sistema hidráulico predial.

Os tempos de vida útil das motobombas, tubulações/conexões e reservatórios em PEAD (polietileno de alta densidade) foram estimados em 12, 50 e 65 anos, respectivamente, conforme estudo conduzido por Roebuck et al. (2011). Os componentes necessários para a instalação do sistema de aproveitamento de água pluvial têm vida útil variando de 3 a 50 anos, de acordo com informações dos fabricantes (CMBAQUA, 2019; 3P TECHNIK, 2019). O reservatório de concreto armado, assim como a estrutura do sistema de drenagem, tiveram sua vida útil estimada considerando a durabilidade do concreto (BS 7543, 2003).

Com relação aos pavimentos, Mello et al. (2016) afirmam que a maioria dos projetos de pavimentação no Brasil é baseada nas metodologias tradicionais de dimensionamento e que a prática usualmente adotada pelos projetistas de pavimentos flexíveis está fortemente associada ao período de projeto de 10 anos. Porém, os autores constatarem que, visando racionalizar e otimizar serviços de conservação e restauração, projetos de pavimentos flexíveis deveriam utilizar horizontes de projeto de no mínimo 20



anos. Em países desenvolvidos como os Estados Unidos e Inglaterra, utiliza-se 20 anos como período mínimo de projeto para pavimentos flexíveis, podendo este valor ser aumentado dependendo do volume de tráfego (TXDOT, 2011; HIDOT, 2002; KCC, 2001). O pavimento permeável, por sua vez, tem sua vida útil estimada em 20 a 30 anos (UNIVERSITY OF MARYLAND, 2016). Yong et al. (2013) conduziram um estudo experimental na Austrália e verificaram que o pavimento de concreto permeável testado manteve seu funcionamento, sem entupir, mesmo após 26 anos de operação. Considerando o tráfego leve e os dimensionamentos adotados para os pavimentos flexível e permeável, foi considerada vida útil igual a 20 anos para ambos.

Tabela 4.4. Vida útil dos componentes dos sistemas e relação vida útil sistema/componente.

<b>Componentes</b>	<b>Vida útil (anos)</b>	<b>Vida útil sistema/componente</b>	<b>Referência</b>
Reservatórios em PEAD	65	0,31	Roebuck et al. (2011)
Reservatório em concreto armado	60	0,33	BS 7543 (2003)
Tubulações/conexões	50	0,40	Roebuck et al. (2011)
Freio d'água	50	0,40	3P Technik (2019)
Sifão extravasor	50	0,40	3P Technik (2019)
Conjunto mangueira boia	25	0,80	3P Technik (2019)
Realimentador	15	1,33	3P Technik (2019)
Motobombas	12	1,67	Roebuck et al. (2011)
Clorador flutuante	3	6,67	CMBAQUA (2019)
Pavimento flexível	20	1,00	Mello et al. (2016)
Pavimento permeável	20	1,00	Yong et al. (2013)
Sistema de drenagem	60	0,33	BS 7543 (2003)

#### 4.4.2.2. Consumo de energia para operação

Conforme visto na seção 4.1.6, o potencial de economia de energia utilizada no tratamento e abastecimento de água potável obtida pelo sistema de aproveitamento de água pluvial é de 2,05 kWh/dia e de 14,77 MWh se considerada toda a vida útil do sistema (20 anos).

Para estimar o consumo de energia na operação das motobombas para o recalque de água potável e água pluvial, foram utilizadas as Equações 3.17 e 3.18. As motobombas

operam uma vez ao dia. No cenário 1, utiliza-se uma motobomba de  $\frac{1}{4}$  CV para recalcar em média 2.296 litros de água potável por dia e outra motobomba de  $\frac{1}{2}$  CV para recalcar uma média diária de 5.260 litros de água pluvial. No cenário 2 é utilizada uma motobomba de  $\frac{1}{2}$  CV para recalcar em média 7.556 litros de água potável por dia.

A Tabela 4.5 apresenta o consumo de energia para a operação dos sistemas nos dois cenários analisados. Considerando que o cenário 1 necessita do funcionamento de duas motobombas (para recalque de água potável e água pluvial), percebe-se que há consumo de energia maior desse cenário na operação das motobombas. Porém, considerando a economia de água potável obtida pelo sistema, e considerando a economia de energia no tratamento e abastecimento de água potável, nota-se que o cenário 1 consome menos energia que o cenário 2, sendo essa diferença igual a 0,54 kWh/dia e 3,86 MWh no horizonte de tempo de 20 anos, representando economia de energia igual a 8,9% na fase de operação.

Tabela 4.5. 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
<b>Diferença entre os cenários</b>				<b>0,54</b>	<b>3.859</b>

#### 4.4.2.3. Transporte de materiais e componentes dos sistemas

As distâncias de transporte entre o local de fabricação dos materiais e componentes dos sistemas e a edificação em estudo foram determinadas considerando o fabricante localizado mais próximo da edificação. A Tabela 4.6 apresenta as distâncias consideradas na análise do ciclo de vida.

Tabela 4.6. Distância de transporte entre o local de fabricação e a edificação em estudo.

<b>Componentes</b>	<b>Endereço do fabricante</b>	<b>Distância (km)</b>
Reservatórios de água em PEAD	Rod BR 101 Km 64,7 - S/N. Galpão 1, Corveta CEP: 89245-000. Araquari/SC	162
Realimentador		
Conjunto mangueira boia	Rod. Virgílio Várzea, 259, CEP: 88032-000. Florianópolis/SC	4,3
Freio d'água		
Sifão extravasor		
Clorador flutuante	Est. Municipal Prefeito Geraldo Ramos Gonçalves, 236 - Bairro Tanque Preto. CEP: 12960-000. Nazaré Paulista/SP	787
Motobombas	Rua Hans Dieter Schmidt, 1501 - Distrito Industrial. CEP: 89219-504. Joinville/SC	190
Tubos e conexões	Rua Barra Velha, 100. Floresta, Joinville/SC	179
Concreto	R. Gov. José Boabaid, s/n - Distrito Industrial, São José - SC, 88104-750	20,2
Formas de madeira	Rod. José Carlos Daux, 1327 - João Paulo, Florianópolis - SC, 88030-000	6,2
Barras de aço	BR-101, 140, Tijucas - SC, 88200-000	57
Manta impermeabilizante	R. Francisco Severino de Souza, 520 - Distrito Industrial, São José - SC, 88104-760	22,5
Ligante asfáltico modificado	R. João Bettega, 3500 - Fazendinha/Portão, Curitiba - PR, 81350-000	312
Asfalto diluído, CAP		
Britas, pó de pedra, areia	Rod. Dr. Antônio Luiz Moura Gonzaga, 2146 - Rio Tavares, Florianópolis/SC, 88048-300	12,3
Tijolo cerâmico	Rua Antero José Dias, s/n - Galera, Canelinha - SC, 88230-000	76,1
Cimento	R. Raulina Angélica Weingartner, 287 - Centro, Palhoça - SC, 88131-460	27,9
Concreto betuminoso usinado a quente	Rua Treze de Maio, 2.900 KM 03 - Encruzilhada - Biguaçu - SC, 88165-270	32,4

#### 4.4.2.4. Destinação final dos componentes dos sistemas

Considerou-se que os resíduos gerados ao longo do ciclo de vida pelos sistemas são encaminhados para um aterro com licença ambiental, exclusivo para receber entulhos da construção civil, localizado em Alto Aririú, Palhoça/SC, a aproximadamente 32 km da edificação em estudo.

#### 4.4.3. Processos adotados na base de dados

Com base nos dados dos materiais utilizados em ambos os cenários, definidos na seção 4.4.2, foram feitas as correlações destes componentes com seus respectivos processos dentro do banco de dados *Ecoinvent*. O Apêndice III mostra a base de dados utilizada, apresentando o subsistema da qual o processo faz parte, a sua função, os componentes e suas respectivas quantidades. Para os componentes cujos processos não se encontravam disponíveis, foram adotados materiais com características semelhantes, a fim de possibilitar a realização da avaliação do ciclo de vida.

#### 4.4.4. Impactos ambientais

A avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida foi realizada utilizando o método de avaliação de impacto *ReCiPe*, gerenciado pelo programa computacional *SimaPro*. Por meio dos dados do inventário inseridos no programa, foram gerados gráficos e tabelas com os valores de impacto nas categorias avaliadas nas fases do ciclo de vida. Foram realizadas duas simulações para cada cenário: primeiramente utilizando o método de análise de impacto de ciclo de vida *ReCiPe midpoint*, e, por fim, utilizando o método *ReCiPe endpoint*. A nível *midpoint* as categorias de impacto são relatadas em função de unidades individuais, enquanto a nível *endpoint* é implementada uma pontuação geral única.

Para cada método de avaliação de impacto utilizado, foram analisados os resultados de forma individual, com levantamento dos processos mais impactantes e as categorias de impacto mais relevantes. Além disso, foi verificado também o *hotspot* de cada cenário, ou seja, o ponto de um determinado sistema onde se observa a melhor oportunidade de

melhoria ambiental. Os resultados foram analisados de acordo com os efeitos ambientais verificados em cada fase do ciclo de vida dos sistemas.

#### 4.4.4.1. Categorias de impacto em nível *midpoint*

Os resultados do impacto ambiental potencial total e por fase do ciclo de vida nas categorias *midpoint* selecionadas para a análise dos cenários em estudo são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7. Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida para o Cenário 1 – Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial – pelo método *ReCiPe midpoint*.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>EI</b>	<b>EO</b>	<b>EM</b>	<b>EF</b>	<b>ET</b>
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	6,48E+04	1,13E+04	6,44E+01	4,95E+04	1,26E+05
Depleção de ozônio na estratosfera	kg CFC11 eq	3,94E-02	2,95E-02	1,85E-05	2,40E-02	9,29E-02
Formação de ozônio, Saúde humana	kg NOx eq	2,24E+02	1,66E+01	1,92E-01	3,79E+02	6,20E+02
Formação de partículas finas	kg PM <sub>2,5</sub> eq	1,32E+02	1,81E+01	1,72E-01	1,41E+02	2,91E+02
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	2,34E+02	1,69E+01	2,02E-01	3,86E+02	6,37E+02
Acidificação dos solos	kg SO <sub>2</sub> eq	3,02E+02	3,86E+01	3,52E-01	2,19E+02	5,60E+02
Ecotoxicidade dos solos	kg 1,4-DCB	2,10E+05	2,74E+04	1,36E+03	3,14E+05	5,53E+05
Ecotoxicidade das águas potáveis	kg 1,4-DCB	1,54E+03	9,71E+02	9,56E+00	1,29E+03	3,81E+03
Ecotoxicidade das águas marinhas	kg 1,4-DCB	2,25E+03	1,21E+03	1,40E+01	1,93E+03	5,41E+03
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DCB	3,83E+03	3,43E+02	5,63E+01	1,16E+03	5,39E+03
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	4,58E+04	6,71E+03	3,23E+02	2,31E+04	7,59E+04
Uso do solo	m <sup>2</sup> a <i>crop</i> eq	3,68E+03	6,66E+01	1,00E+00	3,16E+03	6,91E+03
Depleção de recursos minerais	kg Cu eq	3,54E+02	1,68E+01	2,28E+00	9,01E+01	4,63E+02
Depleção de recursos fósseis	kg <i>oil</i> eq	4,74E+04	2,61E+03	1,81E+01	2,04E+04	7,03E+04
Consumo de água	m <sup>3</sup>	1,45E+03	1,03E+03	3,86E-01	5,18E+02	2,99E+03

*EI = Efeitos incorporados iniciais; EO = Efeitos de operação; EM = Efeitos de manutenção; EF = Efeitos de final de vida; ET = Efeitos ambientais totais*

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os resultados dos impactos ambientais normalizados de acordo com os efeitos ambientais verificados nas fases do ciclo de vida de

cada cenário em estudo. Estes resultados estão normalizados pelo método *ReCiPe midpoint* em relação ao efeitos provocados em um cidadão em um ano (ano de referência: 2010).

Tabela 4.8. Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida para o Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional – pelo método *ReCiPe midpoint*.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>EI</b>	<b>EO</b>	<b>EM</b>	<b>EF</b>	<b>ET</b>
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	1,87E+05	1,20E+04	3,64E+01	4,38E+04	2,43E+05
Depleção de ozônio na estratosfera	kg CFC11 eq	8,13E-02	3,12E-02	8,86E-06	2,10E-02	1,33E-01
Formação de ozônio, Saúde humana	kg NOx eq	6,45E+02	1,75E+01	1,04E-01	3,23E+02	9,86E+02
Formação de partículas finas	kg PM <sub>2,5</sub> eq	3,84E+02	1,89E+01	7,68E-02	1,16E+02	5,19E+02
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	6,68E+02	1,77E+01	1,10E-01	3,29E+02	1,02E+03
Acidificação dos solos	kg SO <sub>2</sub> eq	9,66E+02	4,01E+01	1,23E-01	1,91E+02	1,20E+03
Ecotoxicidade dos solos	kg 1,4-DCB	5,89E+05	2,42E+04	1,86E+02	2,68E+05	8,81E+05
Ecotoxicidade das águas potáveis	kg 1,4-DCB	2,90E+03	7,47E+02	1,43E+00	1,08E+03	4,73E+03
Ecotoxicidade das águas marinhas	kg 1,4-DCB	4,32E+03	9,38E+02	2,11E+00	1,61E+03	6,88E+03
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DCB	5,25E+03	3,20E+02	3,70E+01	1,08E+03	6,69E+03
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	9,21E+04	5,85E+03	2,89E+01	1,85E+04	1,17E+05
Uso do solo	m <sup>2</sup> a <i>crop</i> eq	7,74E+03	6,79E+01	5,24E-01	3,66E+03	1,15E+04
Depleção de recursos minerais	kg Cu eq	2,98E+02	1,48E+01	1,12E+00	8,53E+01	3,99E+02
Depleção de recursos fósseis	kg <i>oil</i> eq	8,97E+04	2,75E+03	9,28E+00	1,82E+04	1,11E+05
Consumo de água	m <sup>3</sup>	1,90E+03	1,08E+03	1,67E-01	5,03E+02	3,48E+03

*EI = Efeitos incorporados iniciais; EO = Efeitos de operação; EM = Efeitos de manutenção; EF = Efeitos de final de vida; ET = Efeitos ambientais totais*

Diferente da classificação e caracterização, que são etapas obrigatórias na avaliação do ciclo de vida, a normalização é opcional, e serve para calcular a magnitude dos resultados do indicador de categoria em relação às informações de referência (ABNT, 2009a). Segundo Pizzol et al. (2017), a normalização facilita a interpretação e comunicação dos resultados do impacto. Ou seja, comparar os resultados do impacto medindo-os por meio de contribuições anuais em uma pessoa pode ser menos abstrato do que lidar com um resultado caracterizado expresso em, por exemplo, kg de 1,4-dicloro-benzeno equivalente.

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.

Bhatt et al. (2019) avaliaram o ciclo de vida de infraestruturas verdes (bacias de biorretenção e pavimentos permeáveis). O estudo mostrou 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. Tal resultado é semelhante ao encontrado neste estudo.

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. Vale ressaltar que tais resultados são dependentes das condições locais de modelagem adotadas, não sendo, necessariamente, válidos para outros cenários.

A fase de operação foi responsável por considerável parcela dos impactos (no Cenário 1 de 1,0% na categoria uso do solo a 34,2% na categoria consumo de água; e no Cenário 2 de 0,6% na categoria uso do solo a 31,1% na categoria consumo de água). 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.

Figura 4.13. Efeitos ambientais normalizados das fases do ciclo de vida do Cenário 1 – Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial – pelo método *ReCiPe midpoint*

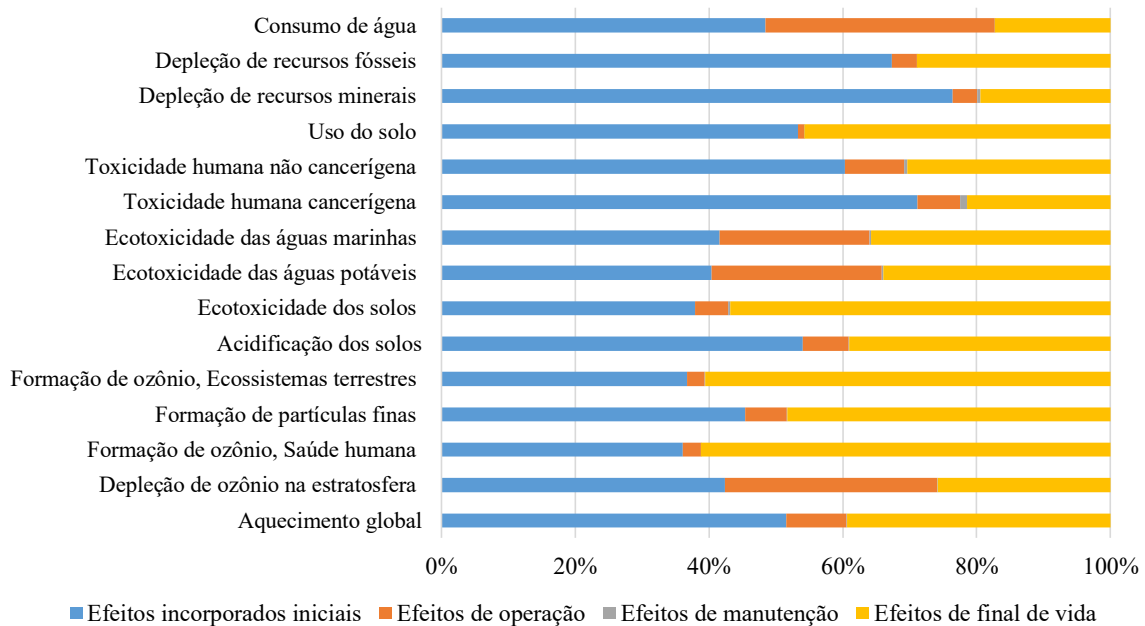
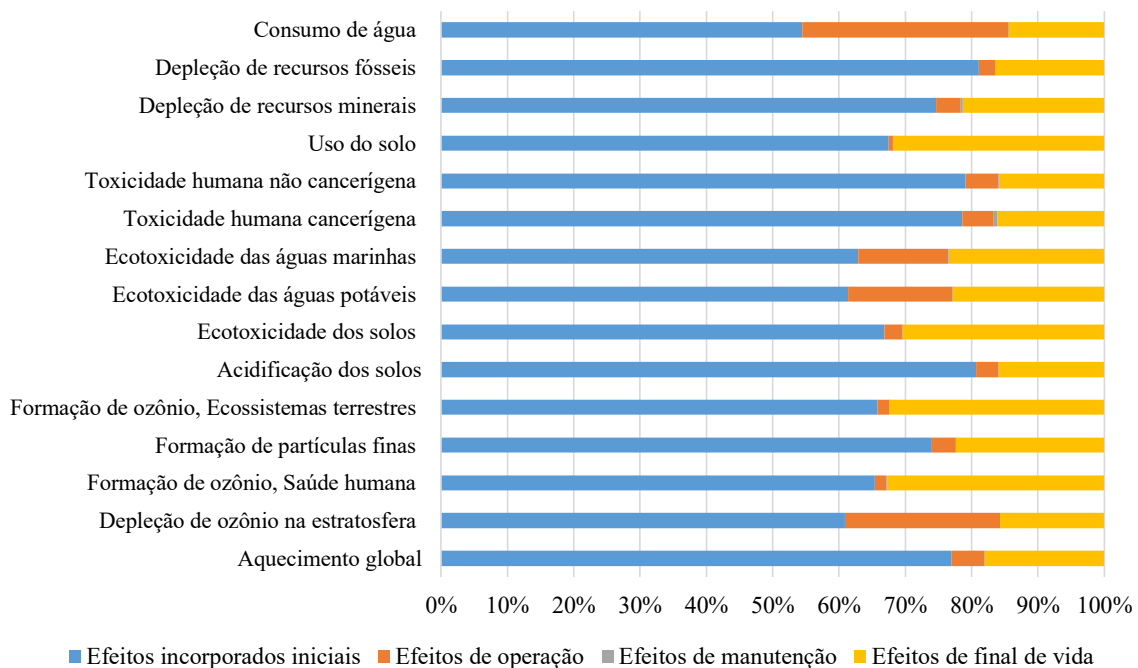


Figura 4.14. Efeitos ambientais normalizados das fases do ciclo de vida do Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional – pelo método *ReCiPe midpoint*.





Wang et al. (2018) compararam a utilização de um pavimento permeável com a utilização de um pavimento convencional em 10 km de uma rodovia. Com o uso do pavimento permeável, obteve-se a redução de 49 TJ de consumo de energia, 6.700 toneladas de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>, 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.

Marinoski e Ghisi (2019) avaliaram o ciclo de vida de uma residência unifamiliar com um sistema híbrido descentralizado de água pluvial e água cinza em comparação com a mesma residência com um sistema convencional de abastecimento de água centralizado. No estudo, obteve-se como resultado redução no consumo de energia igual a 36,1%. Notou-se que os impactos ambientais mais significativos na avaliação do ciclo de vida foram relacionados à fase operacional. Segundo os autores, a economia de energia na fase de operação é essencial para minimizar os impactos observados e maximizar a sustentabilidade e os benefícios potenciais.

A Figura 4.15 apresenta uma comparação dos impactos ambientais totais caracterizados por categoria de impacto para cada cenário avaliado, pelo método *ReCiPe midpoint*. Os valores não estão apresentados de forma absoluta, pois possuem diferentes unidades. Com exceção da categoria depleção de recursos minerais, todas as demais categorias tiveram impacto maior no Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional.

Na categoria depleção de recursos minerais, a única categoria em que o cenário com pavimento permeável teve impacto maior que o cenário convencional, obteve-se impacto 13,8% maior para o Cenário 1. O processo de extração de ferro (*iron mine, operation*) 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*), conforme explicado na seção 4.4.4.2.

Com relação à categoria aquecimento global, o cenário com pavimento permeável e aproveitamento da água pluvial apresentou redução de 48,2% nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente em comparação ao cenário convencional. O processo “*diesel, burned in building machine*” foi o que obteve maior contribuição do Cenário 1 para essa categoria, com emissão de 1,74E+04 kg CO<sub>2</sub> 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 “*heat production, at hard coal industrial furnace*” como o mais impactante para a categoria aquecimento global, com 6,52E+04 kg CO<sub>2</sub> 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.

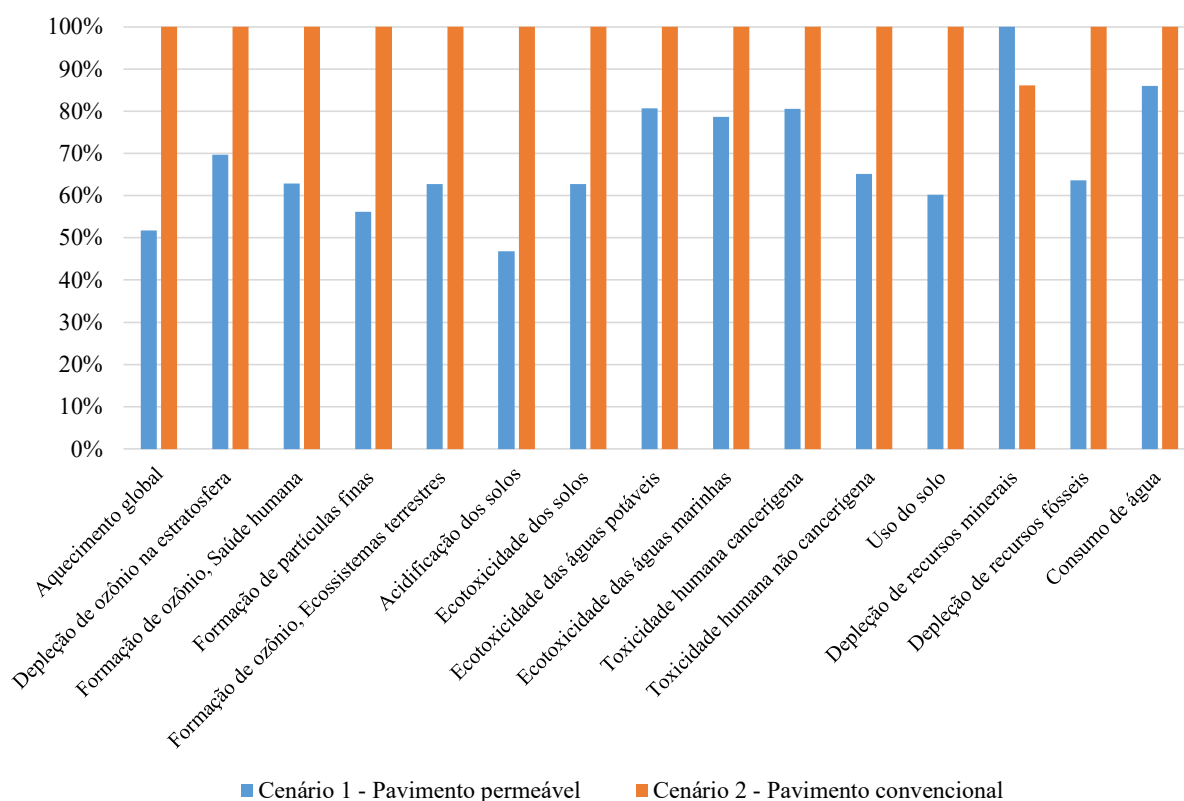
Anastasiou et al. (2017) avaliaram o ciclo de vida de um pavimento com blocos permeáveis em comparação com um pavimento convencional de concreto e concluíram que a emissão total de CO<sub>2</sub> do pavimento com blocos permeáveis foi de apenas 17,7% da produção do pavimento convencional. O pavimento 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 o estudo relatado considerou apenas os pavimentos, não levando em consideração o aproveitamento da água pluvial.

Entretanto, no estudo conduzido por Lu et al. (2019), no qual os autores avaliaram o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa durante ciclo de vida de diferentes tipos de pavimento, não foi notada diferença significativa entre o pavimento impermeável e o pavimento asfáltico permeável testados. Tais resultados podem ser explicados, pois, durante a produção dos pavimentos, apenas a gradação dos agregados teve diferença, enquanto os outros procedimentos durante a pavimentação foram similares para os dois tipos de pavimento.

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<sub>2,5</sub> equivalente (17,4%). No Cenário 2, o processo de

produção de calor (*heat production*) novamente causou o maior impacto, com 132 kg de PM<sub>2,5</sub> 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<sub>2,5</sub> equivalente, ou seja, partículas finas (*particulate matter*) com diâmetro inferior a 2,5 µm.

Figura 4.15. Comparação dos impactos ambientais (caracterização) dos cenários pelo método *ReCiPe midpoint*.



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), seguido da produção de polietileno. O petróleo é largamente utilizado nos dois cenários, como produto base para diversos materiais como ligante asfáltico, manta asfáltica, asfalto diluído, cimento asfáltico de petróleo (CAP), entre outros. O polietileno é

o componente principal dos reservatórios integrantes dos sistemas hidráulicos dos dois cenários.

Na categoria depleção de ozônio na estratosfera, medida em kg de CFC-11 equivalente, o processo de produção e distribuição de eletricidade foi o responsável pelos maiores impactos em ambos os cenários. Na categoria formação de ozônio (saúde humana e ecossistema terrestre), 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 SO<sub>2</sub> equivalente para essa categoria, em comparação com o cenário convencional. Na categoria ecotoxicidade terrestre, o processo “*brake wear emissions, lorry*”, relacionado ao 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 rejeito sulfídrico (*sulfidic tailing*), relacionado aos rejeitos da disposição final depositados no aterro sanitário. Os impactos para as categorias de ecotoxicidade são avaliados em kg de 1,4-dicloro-benzeno (DCB) equivalente.

Com relação à categoria toxicidade humana cancerígena, o processo “*slag, unalloyed electric arc furnace steel*” apresenta o maior impacto em ambos os cenários. Tal processo é relacionado à disposição final de escórias dos sistemas no aterro sanitário. Na categoria toxicidade humana não-cancerígena, o rejeito sulfídrico (*sulfidic tailing*) foi novamente o componente mais impactante nos dois cenários. As categorias de toxicidade humana também são avaliadas em kg de 1,4-dicloro-benzeno (DCB) equivalente.

Na categoria uso do solo, o processo “*road construction*”, relacionado à 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.

#### 4.4.4.2. Categorias de impacto em nível *endpoint*

A nível *endpoint*, as categorias de impacto *midpoint* são multiplicadas por fatores de dano e agregadas em três categorias de ponto final: danos à saúde humana, danos à diversidade dos ecossistemas, e danos à disponibilidade de recursos. Os fatores de dano adotados neste estudo referem-se ao método ReCiPe 2016 com perspectiva hierárquica e dados de referência global média (HUIJBREGTS et al., 2016). A Tabela 4.9 mostra a comparação entre os cenários em relação às categorias de impacto *midpoint* com sua contribuição nas categorias *endpoint*.

A categoria danos à saúde humana é expressa como o número de anos perdidos e o número de anos vividos com invalidez. 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).

Novamente, percebe-se que a única categoria que teve impacto maior no Cenário 1 – Pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial – foi a categoria depleção de recursos minerais. Todas as outras tiveram maior impacto no cenário convencional.

A Figura 4.16 ilustra os impactos ambientais normalizados causados pelos dois cenários, possibilitando a análise da contribuição das entradas e saídas de cada categoria para os determinados potenciais de impacto. Observa-se que as categorias de impacto mais

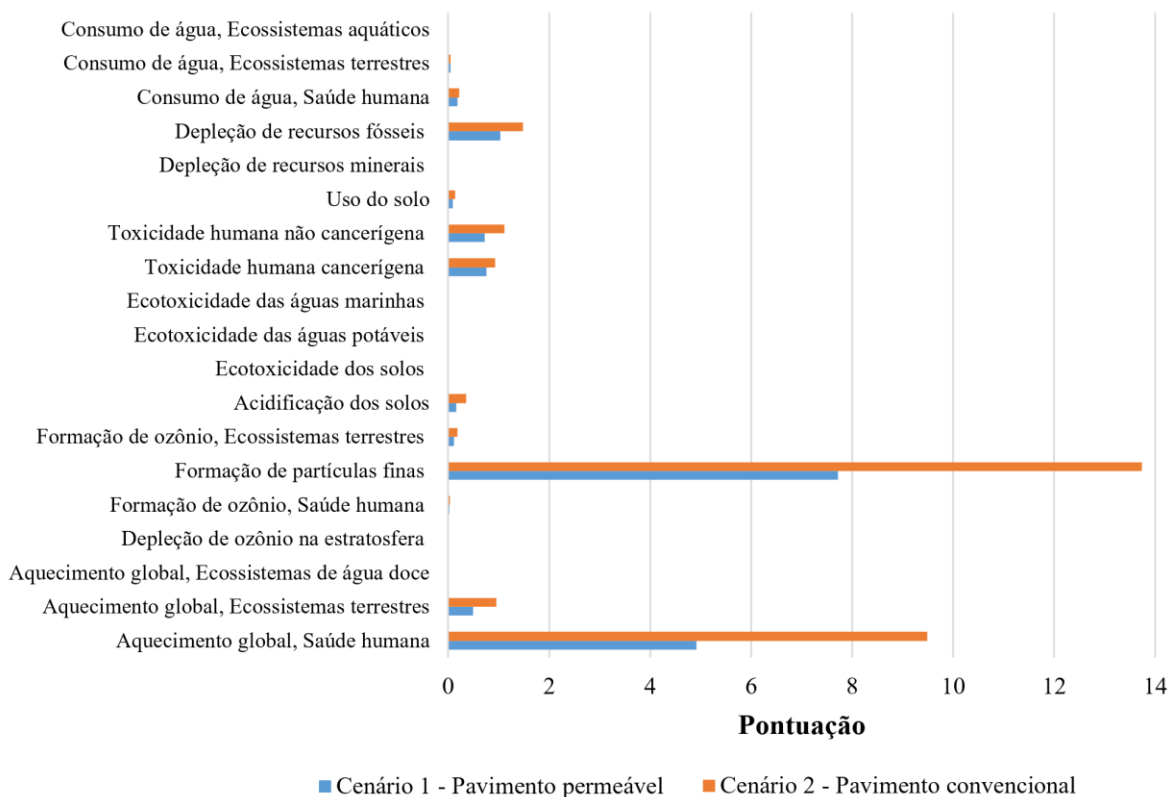
significativas para ambos os cenários avaliados foram: formação de partículas finas, aquecimento global (danos à saúde humana) e depleção de recursos fósseis.

Tabela 4.9. Comparação entre os cenários em relação às categorias de impacto *midpoint* com sua contribuição nas categorias *endpoint*.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Cenário 1 - Pavimento permeável</b>	<b>Cenário 2 - Pavimento convencional</b>
Aquecimento global, Saúde humana	DALY	1,17E-01	2,25E-01
Depleção de ozônio na estratosfera	DALY	4,93E-05	7,08E-05
Formação de ozônio, Saúde humana	DALY	5,64E-04	8,98E-04
Formação de partículas finas	DALY	1,83E-01	3,26E-01
Toxicidade humana cancerígena	DALY	1,79E-02	2,22E-02
Toxicidade humana não cancerígena	DALY	1,73E-02	2,66E-02
Consumo de água, Saúde humana	DALY	4,39E-03	5,11E-03
Aquecimento global, Ecossistemas terrestres	species.yr	3,52E-04	6,80E-04
Aquecimento global, Ecossistemas de água doce	species.yr	9,62E-09	1,86E-08
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	species.yr	8,22E-05	1,31E-04
Acidificação dos solos	species.yr	1,19E-04	2,54E-04
Ecotoxicidade dos solos	species.yr	6,31E-06	1,01E-05
Ecotoxicidade das águas potáveis	species.yr	2,64E-06	3,28E-06
Ecotoxicidade das águas marinhas	species.yr	5,68E-07	7,22E-07
Uso do solo	species.yr	6,13E-05	1,02E-04
Consumo de água, Ecossistemas terrestres	species.yr	2,85E-05	3,30E-05
Consumo de água, Ecossistemas aquáticos	species.yr	3,48E-09	3,93E-09
Depleção de recursos minerais	USD2013	1,07E+02	9,22E+01
Depleção de recursos fósseis	USD2013	2,88E+04	4,16E+04

*DALY = deficiência ajustada de anos de vida; species.yr = potencial de desaparecimento de espécies pela área; USD2013 = aumento do custo da extração dos recursos (em dólares americanos, ano de referência 2013).*

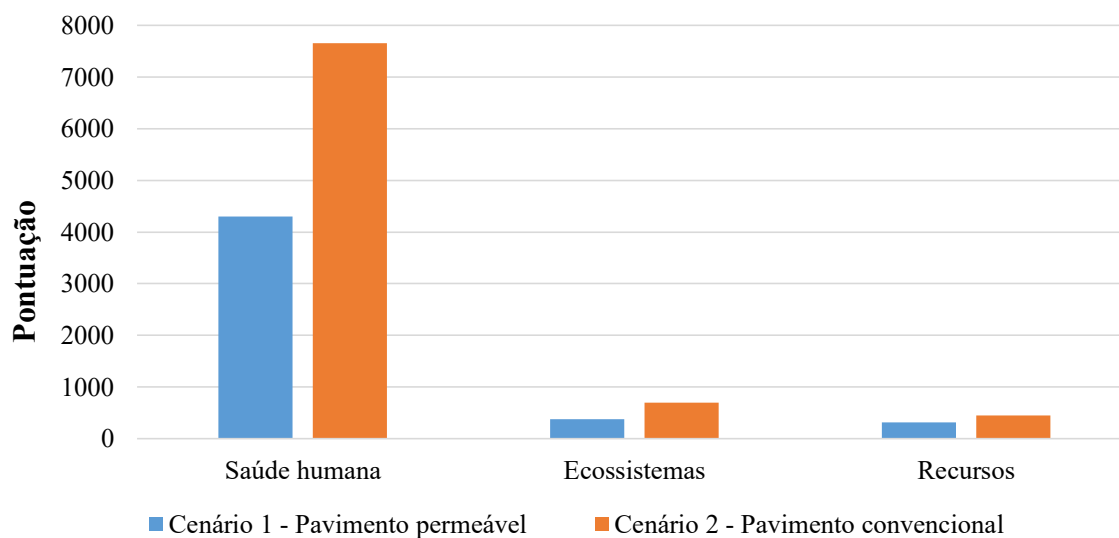
Figura 4.16. Comparação dos cenários pelo método *ReCiPe endpoint* (dados normalizados).



A Figura 4.17 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.

O método *ReCiPe endpoint* ainda calcula um indicador de pontuação total, que é um valor único de impacto considerando diferentes pesos para cada categoria *midpoint* e *endpoint*. Tal pontuação não se refere apenas às três categorias finais, mas também leva em consideração as contribuições das categorias intermediárias que possuem participação na respectiva categoria de dano (HUIJBREGTS et al., 2016).

Figura 4.17. Comparação dos cenários pelo método *ReCiPe endpoint* (dados agregados).



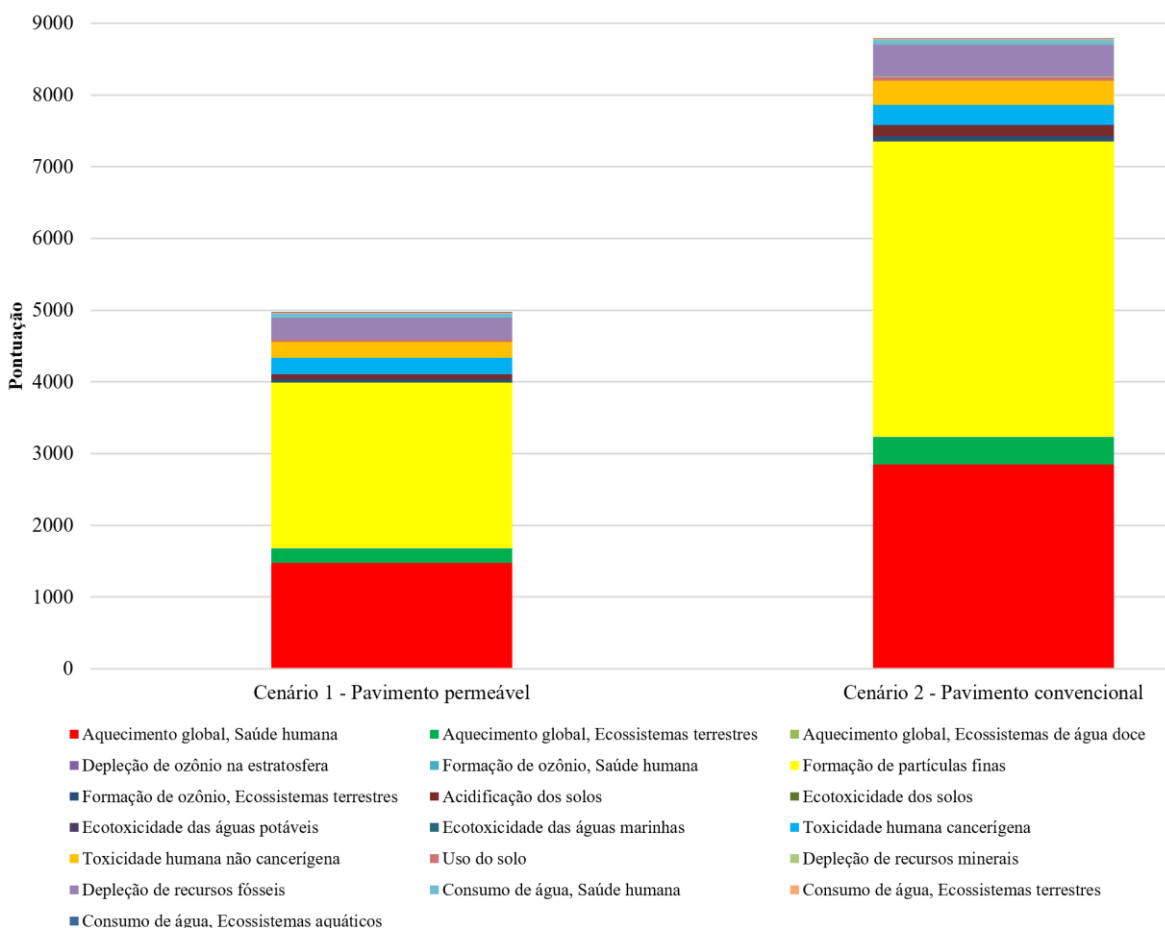
A Figura 4.18 apresenta a comparação dos dois cenários em pontuação única. O resultado é a soma dos dados ponderados das categorias de impacto, cujo objetivo é definir qual cenário possui o ciclo de vida com maior potencial de impacto ambiental.

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 (danos à saúde humana).



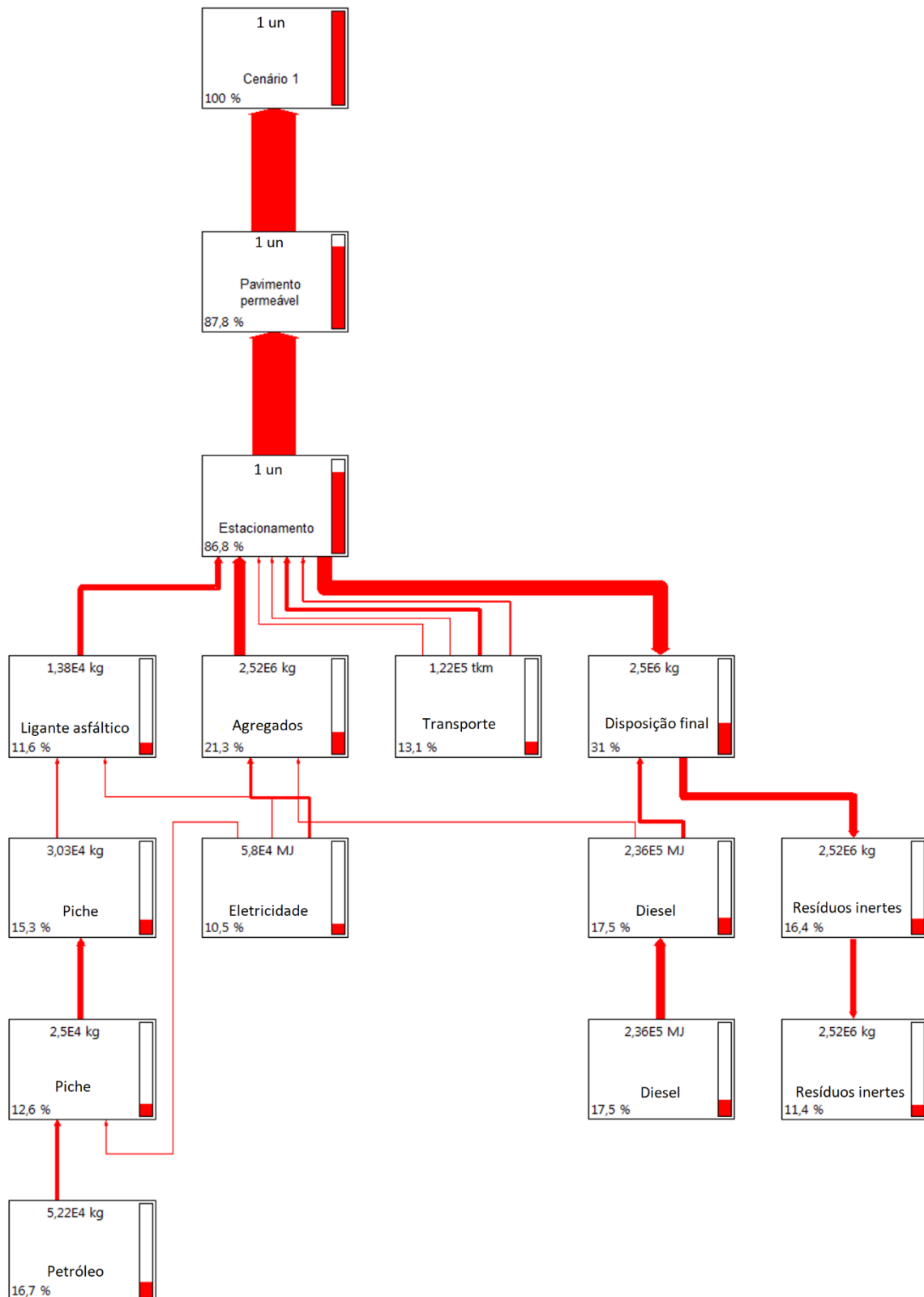
Figura 4.18. Comparação dos cenários pelo método *ReCiPe endpoint* (pontuação única).



As Figuras 4.19 e 4.20 ilustram a rede dos processos elementares que mais contribuíram para a pontuação total dos impactos ambientais pelo método *ReCiPe endpoint*. As redes foram geradas pelo programa computacional *SimaPro* com as contribuições de cada processo nas categorias de impacto. Os termos são referentes aos processos utilizados na base *Ecoinvent® 3.5*.

Para a elaboração das redes de processos, foram representados apenas os fluxos com contribuição de impacto maior que 10%. As caixas mostram os processos principais envolvidos no ciclo de vida dos sistemas. A porcentagem apresentada em cada caixa refere-se à contribuição do processo no resultado da categoria de impacto. A espessura das setas representa a importância da contribuição de cada processo analisado. A barra vermelha posicionada do lado direito de cada caixa demonstra a porcentagem da contribuição de cada processo envolvido.

Figura 4.19. Rede de processos elementares para o Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial – pelo método *ReCiPe endpoint*.



No cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial, percebe-se que 87,8% dos impactos potenciais são gerados pelo pavimento permeável, sendo os 12,2% restantes gerados pelos sistemas de aproveitamento de água pluvial e abastecimento de água potável da edificação. Os processos mais impactantes no ciclo de vida do pavimento permeável são: disposição final (31,0%), agregados (21,3%), transporte (13,1%) e ligante asfáltico (11,6%).

A Figura 4.21 apresenta a contribuição de cada subsistema do Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial – nas categorias *endpoint*. Nota-se a grande contribuição do pavimento permeável nas três categorias, seguido pelas contribuições do sistema de aproveitamento de água pluvial e sistema de abastecimento de água potável, respectivamente.

No cenário convencional, foi verificado que o estacionamento (pavimento convencional e dispositivos de drenagem) é responsável por 95,7% do total de impactos gerados. Desse percentual, 51,8% é devido ao ciclo de vida do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). O processo de fabricação de CBUQ utiliza grande quantidade de calor, além de diversos derivados do petróleo, fazendo com que esse processo possua elevado impacto. O transporte (15,4%) e a disposição final (12,4%) também contribuem significativamente para os impactos potenciais do cenário.

A Figura 4.22 mostra a contribuição de cada subsistema do Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicionais, abastecimento convencional – pelo método *ReCiPe endpoint*. Percebe-se a elevada contribuição do pavimento tradicional em todas as categorias, seguido pelas contribuições do sistema de abastecimento de água potável e sistema de dispositivos de drenagem, respectivamente.

Figura 4.20. Rede de processos elementares para o Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicionais, abastecimento convencional – pelo método *ReCiPe endpoint*.

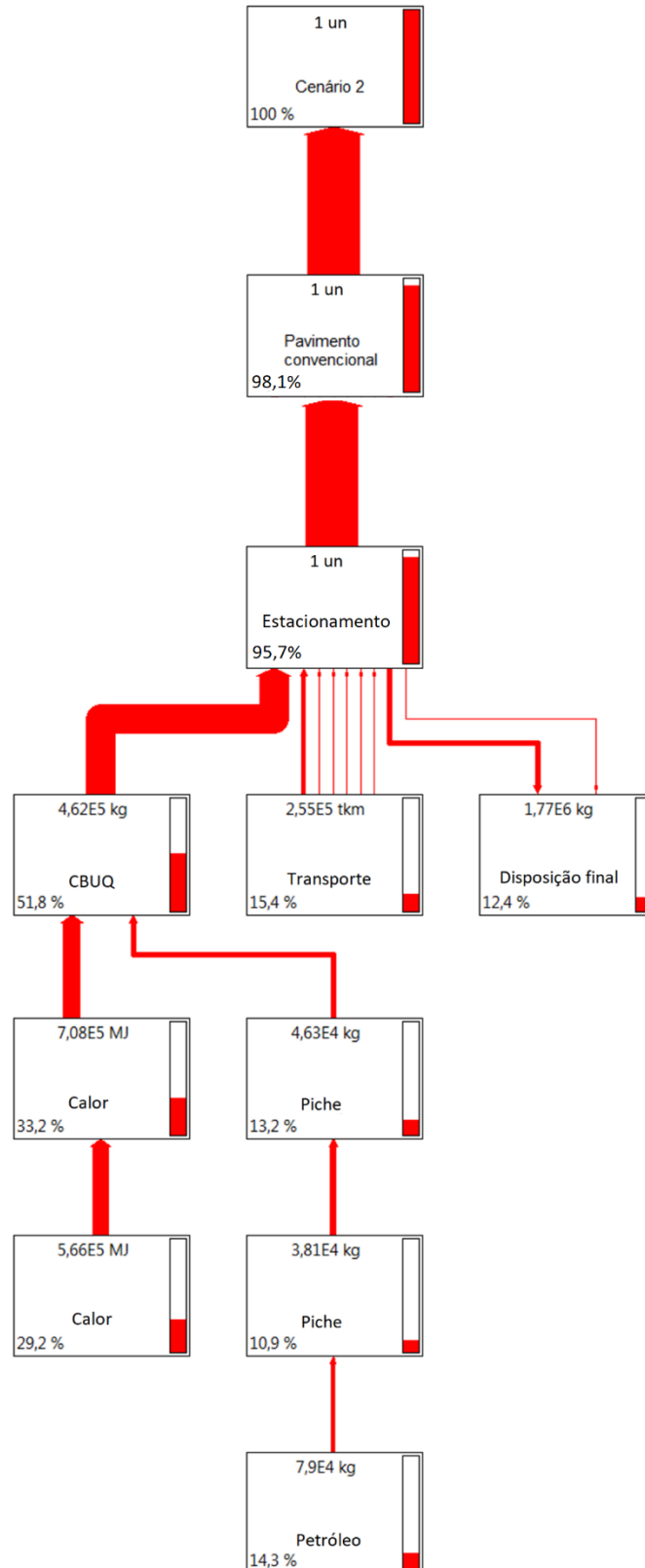


Figura 4.21. Contribuição de cada subsistema do Cenário 1 – Pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial – nas categorias *endpoint*.

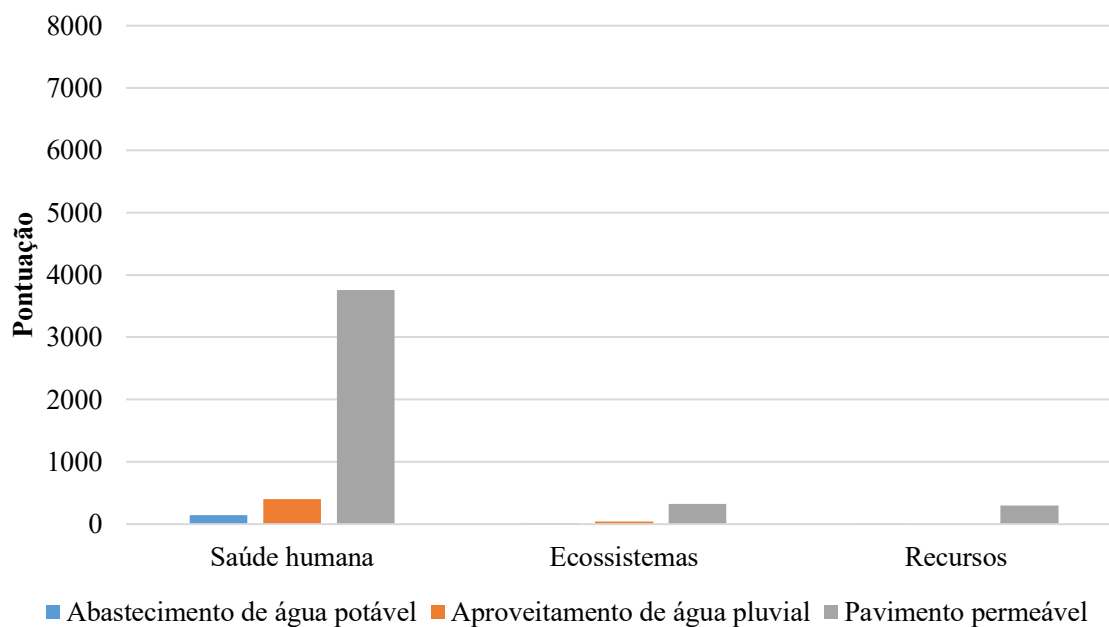
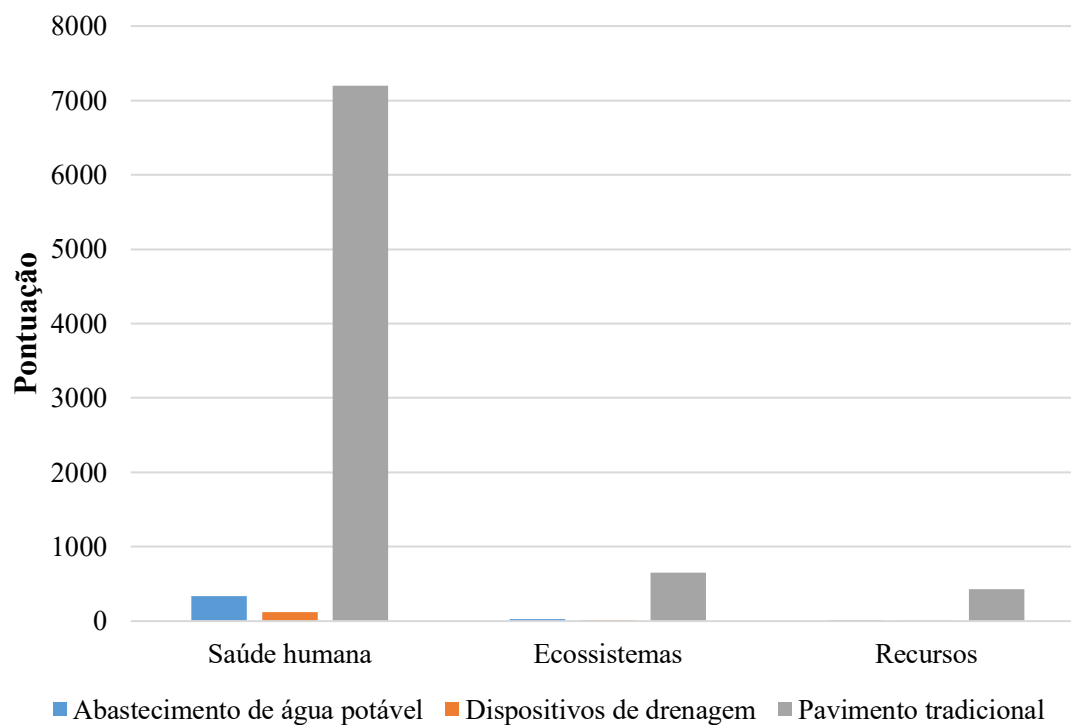


Figura 4.22. Contribuição de cada subsistema do Cenário 2 – Pavimento e drenagem tradicionais, abastecimento convencional – nas categorias *endpoint*.



#### 4.4.5. Interpretação dos impactos ambientais e recomendações

Na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida dos cenários estudados, foi verificado que, para ambos os cenários, os efeitos incorporados iniciais foram responsáveis pela maior parcela dos danos ambientais. Tais efeitos são relativos às etapas de extração das matérias-primas, fabricação e implantação dos componentes dos sistemas. Os elevados impactos observados para os efeitos iniciais e efeitos de final de vida 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 essas duas etapas sejam 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. Tal resultado mostra a dependência do país em relação à matriz energética hidroelétrica. Com isso, faz-se necessário o incentivo para a utilização de fontes energéticas mais sustentáveis, como, por exemplo, a matriz energética solar fotovoltaica.

Por meio do método *ReCiPe endpoint*, foi verificado que, em ambos os cenários, as categorias que tiveram maior impacto ambiental foram, em ordem decrescente: formação de partículas finas, aquecimento global (danos à saúde humana) e depleção de recursos fósseis. Com relação às categorias formação de partículas finas e aquecimento global (danos à saúde humana), o consumo de diesel foi o processo que mais contribuiu para os impactos no cenário com pavimento permeável, devido à grande contribuição do transporte dos materiais. No cenário convencional, a produção de calor relacionada ao processamento do concreto betuminoso usinado a quente foi o processo com maior impacto. Na categoria depleção de recursos fósseis, a produção de petróleo foi o processo mais impactante, com mais de 75% do impacto em ambos os cenários.

Portanto, considera-se como *hotspot*, ou seja, pontos com melhor oportunidade de melhorias ambientais, os três processos supracitados: 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, tal como a utilização de *pavers* ou outros tipos de blocos intertravados, que não utilizem asfalto como ligante.

Com relação ao aproveitamento de água pluvial captada pelo pavimento permeável, mesmo com a utilização de uma motobomba a mais e com a implantação de um reservatório inferior em concreto armado com volume de 50.000 litros, o cenário obteve menor impacto ambiental em quatorze das quinze categorias *midpoint* avaliadas em relação ao cenário convencional. Nas três categorias *endpoint* (danos à saúde humana, ecossistemas e recursos), o cenário com pavimento permeável também se mostrou menos impactante em todas as categorias.

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 convencional.

## 5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar e comparar ambientalmente, por meio da avaliação do ciclo de vida, dois sistemas de drenagem para um estacionamento: o primeiro composto de um sistema de pavimento permeável, com posterior aproveitamento da água pluvial captada na edificação; e o segundo composto por pavimento tradicional, sem o aproveitamento da água pluvial escoada e com abastecimento convencional de água na edificação.

No método, baseado nas normas NBR 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; 2009b), foram definidos a unidade funcional, horizonte de tempo, fronteiras dos sistemas na avaliação do ciclo de vida, assim como a definição dos cenários a serem comparados e a modelagem no inventário de ciclo de vida.

O desenvolvimento do trabalho se deu através de um estudo de caso envolvendo um edifício público com estacionamento próprio. A escolha de um edifício público foi feita por ser um tipo de edificação com elevado consumo de água em usos finais como mictórios, vasos sanitários, limpeza de pátios e regas de jardins, sendo atividades que não necessitam de água potável.

Verificou-se que no cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial o potencial de economia de água potável atingido foi de 69,6%, o que equivale a um consumo médio de água pluvial igual a 5.260 litros/dia na edificação. Com a economia de água potável atingida, gerou-se também economia de energia no tratamento e distribuição de água potável. O potencial de economia de energia, quando comparado ao cenário convencional, é de 0,54 kWh/dia e 3,86 MWh no horizonte de tempo de 20 anos, representando economia de energia igual a 8,9% na fase de operação.

A avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida dos dois cenários foi realizada utilizando os métodos *ReCiPe midpoint* e *endpoint*, gerenciados pelo programa computacional *SimaPro* versão 9.0. As categorias de impacto contempladas na avaliação foram categorias de danos relativas à saúde humana (aquecimento global, formação de partículas finas e depleção da camada de ozônio na estratosfera), à qualidade dos ecossistemas (acidificação, ecotoxicidade, toxicidade humana, uso do solo) e a recursos (depleção de recursos fósseis, minerais e mananciais).



O cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial obteve menor potencial de impacto ambiental em quatorze das quinze categorias *midpoint* avaliadas em comparação com o cenário convencional. Verificou-se, por meio do método *ReCiPe endpoint*, que em ambos os cenários as categorias que tiveram maior impacto ambiental foram, em ordem decrescente: formação de partículas finas, aquecimento global (danos à saúde humana) e depleção de recursos fósseis. Por meio da pontuação única calculada pelo método *ReCiPe endpoint*, ficou evidente que o ciclo de vida do cenário convencional possui impacto global maior que o cenário com pavimento permeável. Dessa forma, levando em consideração as condições e premissas adotadas no estudo, foi verificado que o cenário com pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial se mostra mais vantajoso ambientalmente.

Os resultados demonstraram que os efeitos incorporados iniciais (extração das matérias-primas, fabricação e implantação dos componentes dos sistemas) foram responsáveis pela maior parcela dos danos ambientais. Os efeitos de final de vida (destinação final em aterro sanitário) e efeitos de operação (consumo de energia elétrica necessário para operação das motobombas e também para o tratamento e distribuição de água potável pela concessionária) aparecem na sequência como fases com maior impacto.

A instalação de um sistema de pavimento permeável com aproveitamento de água pluvial requer equipamentos e componentes adicionais, como reservatórios, dispositivos e motobombas. Porém, tal sistema não necessita de dispositivos de drenagem, como no cenário convencional, e utiliza em sua composição menor quantidade de materiais derivados do petróleo, tais como materiais asfálticos, resultando em menor impacto potencial global. A comparação dos dois cenários por meio da avaliação do ciclo de vida se mostrou importante para possibilitar a proposição de melhorias com o intuito de minimizar os impactos ambientais potencialmente gerados.

Esta dissertação apresentou dados e métodos de avaliação atuais, contribuindo com importantes resultados para o estado da arte. Além de ser um estudo importante para guiar o planejamento e a tomada de decisões no manejo de infraestruturas hídricas nos centros urbanos, este trabalho apresentou o primeiro estudo de ACV envolvendo o aproveitamento de água pluvial infiltrada por pavimentos permeáveis em edificações. Dessa forma, a principal contribuição do trabalho foi a realização da ACV envolvendo o pavimento

permeável e todo o sistema hidráulico necessário para o uso da água pluvial em edificações, preenchendo uma lacuna existente na literatura e proporcionando avanço científico na área de estudo.

### **5.1. Limitações**

Dentre as limitações existentes no presente trabalho, destaca-se a utilização de bases de dados de origem estrangeira devido à inexistência de uma base de dados nacional consolidada no programa *SimaPro* para o inventário de ciclo de vida dos cenários avaliados. Dessa forma, foram feitas adaptações nos processos envolvidos no inventário. A justificativa da utilização da referida base de dados se dá pela confiabilidade das informações contidas no banco de dados *Ecoinvent*® 3.5, mesmo sendo este de origem estrangeira. Ressalta-se a importância da criação de uma base de dados brasileira para o inventário de ciclo de vida de materiais utilizados em pavimentação e sistemas hidráulicos prediais.

Outra limitação verificada no trabalho é a inexistência de um método de avaliação de impacto do ciclo de vida específico para as condições brasileiras, gerando, assim, incertezas nas avaliações. Os métodos utilizados (*ReCiPe midpoint* e *endpoint*) são desenvolvidos para escala global, não refletindo necessariamente a situação do Brasil, que ainda não possui métodos direcionados especificamente para as características ambientais do país.

Outras limitações também podem ser citadas, tais como:

- Desconsideração da variação da demanda de água de acordo com os meses do ano e com o tempo;
- Consideração das informações sobre o consumo de energia elétrica dos sistemas públicos de água apresentados pelo SNIS, apesar da grande incerteza desses dados.
- A qualidade da água pluvial após o tratamento com cloração não foi medida, pois trata-se de um estudo teórico. Tal qualidade pode estar abaixo dos padrões exigidos para usos não-potáveis, necessitando tratamento adicional.

### **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Realizar a análise do custo do ciclo de vida (*life-cycle cost analysis – LCAA*) para os dois cenários, a fim de verificar qual cenário possui ciclo de vida com maior viabilidade econômica;

- Adaptar e aplicar o método para outros sistemas de infraestruturas verdes, tais como jardins de chuva, telhados verdes, *wetlands* e pavimentos permeáveis com diferentes tipos de revestimento;

- Escolher outras tipologias de edificação para o estudo de caso, tais como edifícios residenciais, comerciais e industriais.

## Referências

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 16416/2015: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. 25 p., 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040/2009: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. 21 p., 2009a.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044/2009: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. 46 p., 2009b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15527/2019: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não-potáveis – Requisitos**. 10 p., 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5626/1998: Instalação predial de água fria**. 41 p., 1998.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Séries históricas**. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf). Acesso em: 08 mar. 2019.
- 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.
- ANGRILL, S.; FARRENY, R.; GASOL, M.; GABARRELL, C.; VIÑOLAS, X.; JOSA, B.; RIERADEVALL, A. J. Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 1, p. 25-42, 2011.
- 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, n. 4, p. 110, 2016.
- ANTUNES, L. N.; GHISI, E.; THIVES, L. P. Permeable pavements life cycle assessment: A literature review. **Water**, v. 10, n. 11, p. 1575, 2018.
- AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; AMOR, M. B. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of cleaner production**, v. 112, p. 2187-2197, 2016.
- BARE, J. C.; HOFSTETTER P.; PENNINGTON D. W.; DE HAES HA U. Life cycle impact assessment midpoints vs endpoints: the sacrifices and the benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, n. 5, 2000.

- BACK, Á. J. **Chuvas intensas e chuva para dimensionamento de estruturas de drenagem superficial para o Estado de Santa Catarina.** Epagri, Florianópolis, 2013.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.** 2 ed. 318p. Porto Alegre: ABRH, 2011.
- 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.
- BRATTEBO, B. O.; BOOTH, D. B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. **Water Research**, v. 37, n. 18, p. 4369-4376, 2003.
- BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; PIRO, P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1146-1161, 2016.
- BS 7543 – British Standards Institution. **Guide to durability of buildings and buildings elements, products and components.** 2003.
- CALTRANS (CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). **A framework for life-cycle cost analyses and environmental life-cycle assessments for fully permeable pavements.** Technical memorandum. 2010.
- CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647-658, 2013.
- CBSC. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Sustentabilidade na indústria de blocos e pavimento de concreto: avaliação de ciclo de vida modular.** 2014.
- CENTER FOR NEIGHBORHOOD TECHNOLOGY (CNT); AMERICAN RIVERS. **The value of green infrastructure, a guide to recognizing its economic, environmental and social benefits.** CNT: Chicago, IL, 2010.
- CHANDRAPP, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627-637, 2016.

- CHIU, C. T.; HSU, T. H.; YANG, W. F. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 52, p. 545-556, 2008.
- 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, n. 3, p. 492-498, 2009.
- CHUI, T. F. M.; LIU, X.; ZHAN, W. Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 353-364, 2016.
- CITY OF NEW YORK. **PlaNYC Sustainable Stormwater Management Plan 2008**. City of New York, New York, 2008. Disponível em:  
<[http://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/nyc\\_sustainable\\_storm\\_water\\_management\\_plan\\_final.pdf](http://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/nyc_sustainable_storm_water_management_plan_final.pdf)> Acesso em: 04 nov. 2019.
- CMBAQUA. **CMB indústria e comércio de artefatos plásticos LTDA**. Disponível em:  
<<http://www.cmbaqua.com.br/produto/acessorios/adaptadores-degraus-e-outros/clorador-flutuante>>. Acesso em: 18 jun. 2019.
- CUREAU, R. J. **Potencial de economia de energia elétrica decorrente da redução do consumo de água potável em Joinville-SC**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- DE MATTIA, J. C. V.; STEINER, L. R. **Análise do desempenho de misturas asfálticas quando preparadas com diferentes tipos de ligantes**. Artigo de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.
- DE SOUSA, M. R. C.; MONTALTO, F.; SPATARI, 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.
- DELETIC, A.; FLETCHER, T. D. Performance of grass filters used for stormwater treatment—a field and modelling study. **Journal of Hydrology**. v.317, n.3-4, p. 261–275, 2006.
- DNER (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM). **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 1981.

- DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES). **Manual de Drenagem de Rodovias**. 2ª edição, Rio de Janeiro, 2006.
- ECK, B. J.; WINSTON, R. J.; HUNT, W. F.; BARRETT, M. E. Water Quality of Drainage from Permeable Friction Course. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, n. 2, p. 174-181, 2012.
- ECOINVENT. **The Ecoinvent Database**. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/database/database.html>>. Acesso em: 08 mar. 2019.
- ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Water & Sustainability: U.S. electricity consumption for water supply & treatment e the next half century**, v. 4, Topical Report, 2002.
- ELLIS, J. B.; DEUTSCH, J. C.; MOUCHEL, J. M.; SCHOLES, L.; REVITT, M. D. Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. **Science of the Total Environment**. v. 334-335, p. 251-260, 2004.
- FINNEY, K.; GHARABAGHI, B.; MCBEAN, E.; RUDRA, R.; MACMILLA, G. Compost Biofilters For Highway Stormwater Runoff Treatment. **Water Quality Research**, v. 45, n. 4, p. 391-402, 2010.
- FORTLEV. **Catálogo técnico caixas d'água Fortlev**. Disponível em: <<https://www.fortlev.com.br/>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- FUERHACKER, M.; HAILE, T. M.; MONAI, B.; MENTLER A. Performance of a filtration system equipped with filter media for parking lot runoff treatment. **Desalination**, v. 275, n. 1-3, p. 118-125, 2011.
- GHIMIRE, S. R.; JOHNSTON, J. M.; INGWERSEN, W. W.; SOJKA, S. Life cycle assessment of a commercial rainwater harvesting system compared with a municipal water supply system. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, n. 10, p. 74-86, 2017.
- GHISI, E.; CORDOVA, M. M. **Netuno 4**. Programa computacional. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/>. 2014.

- GILBERT, J. K.; CLAUSEN, J. C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut. **Water Research**, v. 40, n. 4, p. 826-832, 2006.
- GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M.; FLINTSCH, G. Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17 (4), p. 409-419, 2012.
- GOOGLE. **Google Earth**. Versão 7.3.0. 2015. Nota (Florianópolis). Disponível em: <<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 11 dez. 2018.
- GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G. Life Cycle Assessment: Past, present, and future. **Environmental Science and Technology**, v. 45 (1), p. 90-96, 2011.
- 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.
- HIDOT. **Pavement Design Manual**. Highways Division, Hawaii Department of Transportation, 75 p. 2002.
- HILLIGES, R.; SCHRIEWER, A.; HELMREICH, B. A three-stage treatment system for highly polluted urban road runoff. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 306-312, 2013.
- HOLTZ, K.; EIGHMY, T. T. Scanning European advances in the use of recycled materials in highway construction. **Public Roads** v. 64, p. 34-40, 2000.
- HOU, L.; FENG, S.; DING, Y.; ZHANG, S.; HUO, Z. Experimental study on rainfall-runoff relation for porous pavement. **Hydrology Research**, v. 39, n. 3, p. 181-190, 2008.
- HUANG, Y.; BIRD, R.; HEIDRICH, O. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. **Journal of cleaner production**, v. 17, p. 283-296, 2009.
- HUIJBREGTS, M. A. J. et al. **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. RIVM, Holanda, 2016.



- ISLAM, S.; PONNAMBALAM, S. G.; LAM, H. L. Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 266-278, 2016.
- JAMES, E. **A Literature Review on the Effect of Porous Asphalt Roads on Water Pollution**. Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control. Silvia Project Report. European Commission. 2003.
- JIA, H.; LU, Y.; YU, S. L.; SHEN, Y. Planning of LID–BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. **Separation and Purification Technology**. v. 84, p. 112-119, 2012.
- JIANG, Q.; LI, T.; LIU, Z.; ZHANG, H.; REN, K. Life cycle assessment of an engine with input-output based hybrid analysis method. **Journal of Cleaner Production**. v. 78, p. 131-138, 2014.
- KALBUSCH, A. **Método para avaliação do impacto ambiental da substituição de equipamentos convencionais por equipamentos economizadores de água a partir da avaliação do ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- KALBUSCH, A.; GHISI, E. Método para quantificação do consumo energético no ciclo de vida de equipamentos hidrossanitários. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 57-73, 2012.
- KAMMERS, P. C.; GHISI, E. Usos finais de água em edifícios públicos localizados em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 75-90, 2005.
- KCC. **Road Pavement Design Guide**. Kent County Concl, 54 p. 2001.
- KLUCK, E.; VEN, M. V.; BAGGEN, J.; WEE, B. V.; HOFMAN, R. Environmental life cycle cost for durable porous surface layers with synthetic binders. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 3 (3), p. 142-148, 2010.
- KNAPPENBERGER, T.; JAYAKARAN, A. D.; STARK, J. D.; HINMAN, C. H. Monitoring porous asphalt stormwater infiltration and outflow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143 (8), 2017.
- LEGRET, M.; COLANDINI, V. Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: water quality and fate of heavy metals. **Water Science and Technology**, v. 39, n. 2, p. 111-117, 1999.

- LI, Y.; HUANG, Y.; QUANLIANG, Y.; ZHANG, W.; MENG, F.; ZHANG, S. Multi-objective optimization integrated with life cycle assessment for rainwater harvesting systems. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 659-666, 2018.
- LU, G.; WANG, Y.; LI, H.; WANG, D.; OESER, M. The environmental impact evaluation on the application of permeable pavement based on life cycle analysis. **International Journal of Transportation Science and Technology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.05.006>
- MAIOLO, M.; CARINI, M.; CAPANO, G.; PIRO, P. Synthetic sustainability index (SSI) based on life cycle assessment approach of low impact development in the Mediterranean area. **Cogent Engineering**, v. 4: 1410272, 2017.
- MARINOSKI, A. K.; GHISI, E. Avaliação de viabilidade ambiental e econômica de sistemas de aproveitamento de água pluvial em habitação de baixo padrão: estudo de caso em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 423-443, 2018.
- MARINOSKI, A. K.; GHISI, E. Environmental performance of hybrid rainwater-greywater systems in residential buildings. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 144, p. 100-114, 2019.
- MEI, C.; LIU, J.; WANG, H.; YANG, Z.; DING, X.; SHAO, W. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 1394-1407, 2018.
- 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, n. 4, p. 64-74, 2016.
- MIN, S. K.; ZHANG, X.; ZWIERS, F. W.; HEGERL, G. C. Human contribution to more-intense precipitation extremes. **Nature**, v. 470, p. 378-381, 2011.
- MORALES-PINZÓN, T.; LURUEÑA, R.; RIERADEVALL, J.; GASOL, C. M.; GABARREL, X. Financial feasibility and environmental analysis of potential rainwater harvesting systems: A case study in Spain. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 69, p. 130-140, 2012.

- MORIGUCHI, Y.; KONDO, Y.; SHIMIZU, H. Analysing the life cycle impacts of cars: the case of CO<sub>2</sub>. **Industry and Environment**, v. 16 (1/2), p. 42-47, 1993.
- 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, n. 18, p. 4446-4454, 2000.
- PARK, D. G.; SANDOVAL, N.; LIN, W.; KIM, H.; CHO, Y. H. A case study: Evaluation of water storage capacity in permeable block pavement. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18 (2), p. 514-520, 2014.
- PIZZOL, M.; LAURENT, A.; SALA, S.; WEIDEMA, B. P.; VERONES, F.; KOFFLER, C. Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 6, p. 853-866, 2017.
- PRATICÒ, F. G.; AMMENDOLA, R.; MORO, A. Factors affecting the environmental impact of pavement wear. **Transportation Research Part D**, v. 15, p. 127 – 133, 2010.
- PRATT, C. J. Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use. **Water Science and Technology**, v. 39, n. 5, p. 145-151, 1999.
- PROENÇA, L. C.; GHISI, E.; TAVARES, D. DA F.; COELHO, G. M. Potential for electricity savings by reducing potable water consumption in a city scale. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 960-965, 2011.
- RAMSEY-WASHINGTON METRO WATERSHED DISTRICT. **Porous Asphalt Parking Lot**. Little Canada, 2006. Disponível em: <<http://rwmetrowatershed.govoffice.com/vertical/Sites/%7BBAB493DE7-F6CB-4A58-AFE0-56D80D38CD24%7D/uploads/%7B495C857D-FED3-409E-B58A-E6A16D827DEA%7D.PDF>>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- RETAMAL, M.; GLASSMIRE, J.; ABEYSURIYA, K.; TURNER, A.; WHITE, S. **The Water-Energy Nexus: Investigation into the Energy Implications of Household Rainwater System**. Prepared for CSIRO, Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney, Austrália, 2009.
- 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 (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- ROEBUCK, R.; OLTEAN-DUMBRAVA, C.; TAIT, S. Whole life cost performance of domestic RWH systems in the United Kingdom. **Water Environment Journal**, v. 25, p. 355-365, 2011.
- SANSALONE, J.; KUANG, X.; YING, G.; RANIERI, V. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. **Water Research**, v. 46, p. 6763-6774, 2012.
- SANTERO, N. J.; HORVATH, A. Global warming potential of pavements. **Environmental Research Letters**, v. 4: 034011, 2009.
- SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 801-809, 2010.
- SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. A life cycle assessment model for pavement management: road pavement construction and management in Portugal. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, p. 315-336, 2014.
- SCHNEIDER. **Tabela de seleção de bombas e motobombas.** Disponível em: <<https://schneider.ind.br/>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- SCHOLZ, M. Water Quality Improvement Performance of Geotextiles Within Permeable Pavement Systems: A Critical Review. **Water**, v. 5, n. 2, p. 462-479, 2013.
- SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3830-3836, 2007.
- SIMAPRO. **Licences.** Disponível em: <<https://simapro.com/licences/#/education>>. Acesso em: 08 mar. 2019.
- SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **SNIS - Série Histórica.** 2018. Disponível em: <<http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>>. Acesso em: 13 mai. 2019.
- SPATARI, S.; YU, Z.; MONTALTO, F. A. Life cycle implications of urban green infrastructure. **Environmental Pollution**, v.159, p. 2174-2179, 2011.

- STAGGE, J. H.; DAVIS, A. P.; JAMIL, E.; KIM, H. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. **Water Research**, v.46, n.20, p. 6731-6742, 2012.
- STOTZ, G. Decontamination of highway surface runoff in the FRG. **Science of the Total Environment**, v.93, p. 507-514, 1990.
- SUH, S.; HUPPES, G. Methods for life cycle inventory of a product. **Journal of Cleaner Production**, v.13, p. 687-697, 2005.
- TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese de Doutorado. Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- TAYLOR, G.; PATTEN, J. **Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption**. Centre for Surface Transportation Technology (CSTT), National Research Council of Canada (NRC), 2002.
- TDEC (TENNESSEE DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND CONSERVATION). **Tennessee Permanent Stormwater Management and Design Guidance Manual**. v.1, 2014.
- TERHELL, S. L.; CAI, K.; CHIU, D.; MURPHY, J. **Cost and benefit analysis of permeable pavements in water sustainability**. University of California Agriculture and Natural Resources: Davis, CA, USA, 2015.
- THIVES, L. P.; GHISI, E.; BRECHT, D. G.; PIRES, D. M. Filtering capability of porous asphalt pavements. **Water**, v. 10, p. 206, 2018.
- TIGRE. **Tigre S/A**. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- TOMAZ, P. **Poluição Difusa: Pavimento poroso**. Curso de Manejo de águas pluviais. 2009. Disponível em: <<http://pliniotomaz.com.br/livros-digitais/>>. Acesso em: 17 dez. 2018.
- TRELOAR, G. J. Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method. **Economic Systems Research**, v. 9, p. 375-391, 1997.
- TXDOT. **Pavement Design Guide**. Texas Department of Transportation, 428 p. 2011.
- UNIVERSITY OF MARYLAND. **Permeable Pavement Fact Sheet - Information for Howard County, Maryland Homeowners**. 2016. Disponível em:

<[https://extension.umd.edu/sites/extension.umd.edu/files/\\_docs/programs/master-gardeners/Howardcounty/Baywise/PermeablePavingHowardCountyMasterGardeners10\\_5\\_11%20Final.pdf](https://extension.umd.edu/sites/extension.umd.edu/files/_docs/programs/master-gardeners/Howardcounty/Baywise/PermeablePavingHowardCountyMasterGardeners10_5_11%20Final.pdf)>. Acesso em 21 jun. 2019.

- VIEIRA, A. S. **Uso racional de água em habitações de interesse social como estratégia para a conservação de energia em Florianópolis, Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- WADA, Y.; MIURA, H.; TADA, R.; KODAKA, Y. Evaluation of an improvement in runoff control by means of a construction of an infiltration sewer pipe under a porous asphalt pavement. **Water Science and Technology**, v.36, n.8-9, p. 397-402, 1997.
- WANG, T.; HARVEY, J. T.; JONES, D. **A framework for life-cycle cost analyses and environmental life-cycle assessments for fully permeable pavements**. Technical memorandum, Institute of Transportation Studies, Caltrans document No.: CTSW-TM-09-249.03 UCPRC document No.: UCPRC-TM-2010-05. 2010.
- 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 and Technology**, v. 47, p. 11189-11198, 2013.
- 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**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2018.07.002>.
- WASKO, C.; SHARMA, A. Steeper temporal distribution of rain intensity at higher temperatures within Australian storms. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 527-529, 2015.
- XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1605-1621, 2019.
- 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.
- YUAN, X.; TANG, Y.; LI, Y.; WANG, Q.; ZUO, J. Environmental and economic impacts assessment of concrete pavement brick and permeable brick production process - A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 198-208, 2018.

**ZOCHE, L. Identificação das limitações da ACV sob a ótica de pesquisas acadêmicas.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

**3P TECHNIK. 3P Technik Filtersysteme GmbH.** Disponível em:  
<<https://www.3ptechnik.de/>> Acesso em: 18 jun. 2019.

## Apêndice I

### **Descrição das categorias intermediárias (*midpoint*) selecionadas no estudo**

A categoria **aquecimento global** leva em consideração os efeitos que causam o aumento da temperatura média do planeta devido a emissões antrópicas de gases de efeito estufa (tais como CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O). Estes gases são contabilizados em kg de CO<sub>2</sub> equivalente e podem afetar a saúde humana e os ecossistemas. Trata-se de um impacto global: o derretimento de geleiras, aumento dos níveis dos oceanos e mudanças dos eventos climáticos estão relacionados a esta categoria de impacto.

A **depleção de ozônio na estratosfera** refere-se à conversão do ozônio em oxigênio pela reação com moléculas de origem antrópica, tais como CFC, CH<sub>3</sub>Cl, CH<sub>3</sub>Br, N<sub>2</sub>O, entre outras. Nesta categoria, que também é de impacto global, são avaliadas as emissões de gases que contribuem para a redução da camada de ozônio, em kg de CFC-11 equivalente. Esse aumento na destruição da camada de ozônio leva a uma diminuição na concentração estratosférica de ozônio, que, por sua vez, faz com que uma porção maior da radiação UVB atinja a Terra. Esse aumento da radiação afeta negativamente a saúde humana, aumentando a incidência de câncer de pele.

As categorias de impacto **formação de ozônio – danos à saúde humana e danos ao ecossistema terrestre** – são medidas em kg de NO<sub>x</sub> equivalente. O ozônio não é emitido diretamente na atmosfera, mas é formado como resultado de reações fotoquímicas de NO<sub>x</sub> e compostos orgânicos voláteis não metânicos. O ozônio é um risco à saúde dos seres humanos, pois pode inflamar as vias aéreas e danificar os pulmões. As concentrações de ozônio levam a um aumento da frequência e gravidade do desconforto respiratório em humanos, como asma e doenças pulmonares obstrutivas crônicas. Além disso, o ozônio pode ter um impacto negativo na vegetação, incluindo redução do crescimento e produção de sementes, aceleração do envelhecimento das folhas e capacidade reduzida de suportar estressores. A formação de ozônio é um processo não linear que depende das condições meteorológicas e das concentrações de NO<sub>x</sub> e de compostos orgânicos voláteis não metânicos.

A categoria **formação de partículas finas** está relacionada à poluição do ar, medida em kg de PM<sub>2,5</sub> equivalente. Essa poluição pode ter um impacto negativo substancial na



saúde humana, variando de sintomas respiratórios a internações e óbitos. Partículas finas com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) representam uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas, causando problemas de saúde humana, uma vez que atinge a parte superior das vias aéreas e pulmões quando inalada. Aerossóis secundários de PM<sub>2,5</sub> são formados no ar a partir de emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), entre outros elementos.

A **acidificação dos solos** é um fenômeno ligado à precipitação de três tipos de compostos poluentes: óxidos de amônia, nitrogênio e enxofre (NH<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>). É uma categoria considerada de impacto local/regional, associada à degradação de florestas, lagos, construções, etc. A avaliação é feita em kg de SO<sub>2</sub> equivalente.

As categorias **ecotoxicidade terrestre**, **ecotoxicidade de água potável** e **ecotoxicidade marinha**, avaliadas em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente, abrangem os efeitos químicos e biológicos realizados pela liberação de substâncias tóxicas para a água, solo e ar sobre os ecossistemas aquáticos e terrestres. A contaminação é resultado do uso de pesticidas, herbicidas, poluição atmosférica, entre outros.

Nas categorias **toxicidade humana cancerígena** e **toxicidade humana não cancerígena** são verificadas as emissões de substâncias tóxicas (metais pesados, dioxinas, solventes, pesticidas, etc.) na água, ar e solo. Tais substâncias afetam a saúde humana e de outras espécies e ecossistemas. A categoria é considerada de impacto local/regional/global. Entre os efeitos da categoria estão problemas respiratórios, oculares, contaminação de águas, etc. A avaliação também é feita em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente.

A **depleção de recursos minerais** é medida em kg de cobre equivalente e refere-se ao decréscimo das reservas minerais de ferro, alumínio, cobre, manganês, urânio, mercúrio, níquel, entre outros. A **depleção de recursos fósseis** trata da utilização de recursos não renováveis (petróleo, carvão mineral, gás combustível, urânio), medida em kg de petróleo equivalente, enquanto a categoria **consumo de água** compreende a depleção de recursos hídricos (em m<sup>3</sup>).

Por fim, a categoria **uso do solo** descreve o dano causado aos ecossistemas devido à transformação do ambiente natural (em m<sup>2</sup>a *crop* eq). Nesta categoria, calculam-se os danos de acordo com o tempo necessário para restaurar a área transformada para um tipo de uso da terra com diversidade similar.

## Apêndice II

Tabela II.1. Quantitativos dos componentes utilizados no Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial).

Item	Descrição	Qtd.	Un.	Peso (kg/un)	Peso total (kg)
<b>1</b>	<b>Abastecimento de água potável</b>				
1.1	torneira boia pvc 20 mm	4	un.	0,15	0,60
1.2	adapt. p/ cx água 25x20 mm	8	un.	0,05	0,40
1.3	adapt. p/ cx água 32x25 mm	8	un.	0,06	0,48
1.4	registro esfera vs pvc soldável 25 mm	8	un.	0,20	1,60
1.5	registro esfera vs pvc soldável 32 mm	4	un.	0,23	0,92
1.6	tubo pvc soldável para água 25 mm	312	m	0,19	59,28
1.7	tubo pvc soldável para água 32 mm	243	m	0,30	72,90
1.8	tubo pvc soldável para água 40 mm	1,5	m	0,42	0,63
1.9	joelho 90 pvc soldável 25 mm	142	un.	0,024	3,41
1.10	joelho 90 pvc soldável 32 mm	16	un.	0,043	0,69
1.11	joelho 90 pvc soldável 40 mm	2	un.	0,070	0,14
1.12	joelho 45 pvc soldável 32 mm	4	un.	0,043	0,17
1.13	te 90 pvc soldável 25 mm	87	un.	0,031	2,70
1.14	te 90 pvc soldável 32 mm	2	un.	0,061	0,12
1.15	te 90 pvc soldável 40 mm	1	un.	0,090	0,09
1.16	adapt. sold. curto p/ registro 25x20 mm	8	un.	0,05	0,40
1.17	joelho red. 90 pvc c/ bucha latão 25x20 mm	8	un.	0,10	0,80
1.18	joelho 90 pvc c/bucha latão 25x20 mm	4	un.	0,10	0,40
1.19	luva pvc sold. c/ bucha latão 25x20 mm	12	un.	0,10	1,20
1.20	motobomba 1/4 cv	2	un.	7,00	14,00
1.21	válvula de retenção 25 mm	1	un.	0,15	0,15
1.22	registro de gaveta 25 mm	1	un.	0,20	0,20
1.23	curva 90 longa 32 mm	1	un.	0,10	0,10
1.24	redução excêntrica 32x25 mm	1	un.	0,04	0,04
1.25	válvula de pé com crivo 40 mm	1	un.	0,17	0,17
1.26	redução 40x32 mm	1	un.	0,05	0,05
1.27	reserv. sup. água potável em PEAD 1000 L	4	un.	17,30	69,20
1.28	reserv. inf. água potável em PEAD 5000 L	1	un.	113,40	113,40

Tabela II.1. Quantitativos dos componentes utilizados no Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial) - Continuação.

Item	Descrição	Qtd.	Un.	Peso (kg/un)	Peso total (kg)
<b>2</b>	<b>Aproveitamento de água pluvial</b>				
2.1	adapt. p/ cx água 32x25 mm	16	un.	0,06	0,96
2.2	adapt. p/ cx água 40x32 mm	16	un.	0,07	1,12
2.3	registro esfera vs pvc soldável 32 mm	8	un.	0,228	1,82
2.4	registro esfera vs pvc soldável 40 mm	8	un.	0,26	2,08
2.5	tubo pvc soldável para água 25 mm	238	m	0,19	45,22
2.6	tubo pvc soldável para água 32 mm	254	m	0,30	76,20
2.7	tubo pvc soldável para água 40 mm	2,5	m	0,42	1,05
2.8	tubo pvc rígido para água 150 mm	1,5	m	0,86	1,29
2.9	joelho 90 pvc soldável 25 mm	107	un.	0,024	2,57
2.10	joelho 90 pvc soldável 32 mm	16	un.	0,043	0,69
2.11	joelho 90 pvc soldável 40 mm	2	un.	0,070	0,14
2.12	joelho 90 pvc rígido 150 mm	2	un.	0,20	0,40
2.13	joelho 45 pvc rígido 32 mm	2	un.	0,04	0,09
2.14	te 90 pvc soldável 25 mm	64	un.	0,031	1,98
2.15	te 90 pvc soldável 32 mm	2	un.	0,061	0,12
2.16	te 90 pvc soldável 40 mm	2	un.	0,090	0,18
2.17	te 90 pvc rígido 150 mm	1	un.	0,24	0,24
2.18	adapt. sold. curto p/ registro 32x25 mm	8	un.	0,07	0,56
2.19	joelho red. 90 pvc c/ bucha latão 32x25 mm	8	un.	0,13	1,04
2.20	joelho 90 pvc c/bucha latão 32x25 mm	4	un.	0,13	0,52
2.21	luva pvc sold. c/ bucha latão 32x25 mm	12	un.	0,13	1,56
2.22	motobomba 1/2 cv	2	un.	14,00	28,00
2.23	válvula de retenção 32 mm	1	un.	0,18	0,18
2.24	realimentador	1	un.	2,60	2,60
2.25	conjunto mangueira boia	1	un.	3,20	3,20
2.26	freio d'água 150 mm	1	un.	0,50	0,50
2.27	sifão extravasor 150 mm	1	un.	2,50	2,50
2.28	clorador flutuante	1	un.	0,30	0,30
2.29	reservatório superior em PEAD 2000 L	4	un.	34,89	140
2.30	concreto p/ reserv. inf. conc. armado 50000 L	22,5	m <sup>3</sup>	2400	54000
2.31	formas de madeira p/ reserv. inf.	3,6	m <sup>3</sup>	520,00	1872
2.32	barras de aço p/ reserv. inf.	3488	kg	-	3488
2.33	manta asfáltica impermeável p/ reserv. inf.	65	m <sup>2</sup>	3,00	195

Tabela II.1. Quantitativos dos componentes utilizados no Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial) - Continuação.

Item	Descrição	Qtd.	Un.	Peso (kg/un)	Peso total (kg)
<b>3</b>	<b>Pavimento permeável</b>				
3.1	manta asfáltica impermeabilizante	5450	m <sup>2</sup>	3,00	16350
3.2	pó de pedra (camada CPA)	117,18	m <sup>3</sup>	1400	164045
3.3	brita zero (camada CPA)	155,33	m <sup>3</sup>	1200	186390
3.4	brita 2 (choker course)	163,5	m <sup>3</sup>	1330	217455
3.5	brita 3 (camada reservatório)	1427,9	m <sup>3</sup>	1350	1927665
3.6	ligante asfáltico TYREFLEX AB8	13,63	m <sup>3</sup>	1011	13775
3.7	dreno de fundo PEAD diâmetro 150 mm	486	m	1,479	719
3.8	dreno ramificado PEAD diâmetro 100 mm	245	m	0,843	207

Tabela II.2. Quantitativos dos componentes utilizados no Cenário 2 (pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional).

Item	Descrição	Qtd.	Un.	Peso (kg/un)	Peso total (kg)
<b>1</b>	<b>Abastecimento de água potável</b>				
1.1	torneira boia pvc 25 mm	4	un.	0,18	0,72
1.2	adapt. p/ cx água 32x25 mm	8	un.	0,06	0,48
1.3	adapt. p/ cx água 40x32 mm	8	un.	0,07	0,56
1.4	registro esfera vs pvc soldável 32 mm	8	un.	0,228	1,82
1.5	registro esfera vs pvc soldável 40 mm	4	un.	0,26	1,04
1.6	tubo pvc soldável para água 25 mm	361	m	0,19	68,59
1.7	tubo pvc soldável para água 32 mm	243	m	0,30	72,90
1.8	tubo pvc soldável para água 40 mm	1,5	m	0,42	0,63
1.9	joelho 90 pvc soldável 25 mm	176	un.	0,024	4,22
1.10	joelho 90 pvc soldável 32 mm	16	un.	0,043	0,69
1.11	joelho 90 pvc soldável 40 mm	2	un.	0,07	0,14
1.12	joelho 45 pvc soldável 32 mm	4	un.	0,043	0,17
1.13	te 90 pvc soldável 25 mm	129	un.	0,031	4,00
1.14	te 90 pvc soldável 32 mm	2	un.	0,061	0,12
1.15	te 90 pvc soldável 40 mm	1	un.	0,09	0,09
1.16	adapt. sold. curto p/ registro 32x25 mm	8	un.	0,07	0,56
1.17	joelho red. 90 pvc c/ bucha latão 32x25 mm	8	un.	0,13	1,04
1.18	joelho 90 pvc c/bucha latão 32x25 mm	4	un.	0,13	0,52

Tabela II.2. Quantitativos dos componentes utilizados no Cenário 2 (pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional) - Continuação.

Item	Descrição	Qtd.	Un.	Peso (kg/un)	Peso total (kg)
1.19	luva pvc sold. c/ bucha latão 32x25 mm	12	un.	0,13	1,56
1.20	motobomba 1/2 cv	2	un.	14,00	28,00
1.21	válvula de retenção 32 mm	1	un.	0,18	0,18
1.22	curva 90 40 mm	1	un.	0,11	0,11
1.23	redução excêntrica 40x32 mm	1	un.	0,05	0,05
1.24	válvula de pé com crivo 50 mm	1	un.	0,19	0,19
1.25	redução 50x40 mm	1	un.	0,06	0,06
1.26	registro de gaveta 32 mm	1	un.	0,23	0,23
1.27	res. sup. água potável PEAD 2500 L	4	un.	48,00	192,00
1.28	res. inf. água potável PEAD 10000 L	1	un.	145,00	145,00
<b>2</b>	<b>Pavimento tradicional</b>				
2.1	asfalto diluído CM-30	6540	kg	-	6540
2.2	cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70)	26122	kg	-	26122
2.3	concreto betuminoso usinado a quente	181	m <sup>3</sup>	2400	435380
2.4	agregado graúdo para revestimento	164	m <sup>3</sup>	1800	294300
2.5	brita granítica p/ base	818	m <sup>3</sup>	1800	1471500
<b>3</b>	<b>Dispositivos de drenagem</b>				
3.1	concreto usinado bombeável C20 p/ sarjeta 30x15 cm	2,69	m <sup>3</sup>	2400	6451
3.2	tábua madeira 2,5x30 cm p/ sarj. 30x15cm	6,00	m	3,9	23,40
3.3	sarrafo p/ forma 2,5x7cm p/ sarj. 30x15cm	9,60	m	0,91	8,74
3.4	areia média p/ sarjeta 30x15 cm	0,48	m <sup>3</sup>	1600	768
3.5	cx p/ boca de lobo em concreto pré-moldado 0,6x1x1 m	48	un.	1440	69120
3.6	guia de concreto pré-moldado do tipo chapéu p/ boca de lobo 1,2x0,15x0,3 m	48	un.	129,6	6221
3.7	peça retangular pré-moldada	2,96	m <sup>3</sup>	2400	7096
3.8	lastro com preparo de fundo	2,81	m <sup>3</sup>	2400	6739
3.9	areia para argamassa 1:3	0,55	m <sup>3</sup>	1600	883
3.10	cimento para argamassa 1:3	0,55	m <sup>3</sup>	400	221
3.11	areia para argamassa 1:4	0,02	m <sup>3</sup>	1712	32,87
3.12	cimento para argamassa 1:4	0,02	m <sup>3</sup>	320	6,14
3.13	tijolo cerâmico maciço 5x10x20 cm	2419	un.	2,00	4838
3.14	tubulação concreto pré-moldado 150 mm	960	m	42,0	40320

## Apêndice III

Tabela III.1. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial).

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent	
Abastecimento de água potável	Tratamento de água na concessionária	--	Operação	6552	kWh	<i>Electricity, medium voltage {BR}   market for   Cut-off, U</i>	
			Fabricação	0,021	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>	
	Armazenamento de água potável	Reservatório superior 4 x 1000 L - PEAD	Fabricação	3,45	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
			Disposição final	0,021	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			Fabricação	0,68	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
			Fabricação	0,035	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>	
			Fabricação	5,65	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
			Disposição final	0,035	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
	Distribuição de água potável	Recalque de água potável	Motobombas - ferro fundido	Fabricação	1,12	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
				Fabricação	0,023	ton.	<i>Cast iron {RoW}   production   Cut-off, U</i>
				Fabricação	4,43	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
				Operação	10993	kWh	<i>Electricity, low voltage {BR}   market for   Cut-off, U</i>
				Disposição final	0,023	ton.	<i>Waste bulk iron, excluding reinforcement {RoW}   treatment of, sorting plant   Cut-off, U</i>
				Disposição final	0,75	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
				Fabricação	0,053	ton.	<i>Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}   Cut-off, U</i>
				Fabricação	9,51	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
Disposição final				0,053	ton.	<i>Waste polyvinylchloride {RoW}   treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
Disposição final				1,70	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
Distribuição de água potável	Conexões - PVC	Conexões - PVC	Fabricação	0,0059	ton.	<i>Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}   Cut-off, U</i>	
			Fabricação	1,06	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
			Disposição final	0,0059	ton.	<i>Waste polyvinylchloride {RoW}   treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			Disposição final	0,19	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	

Tabela III.1. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial) – Continuação.

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent
Aproveitamento de água pluvial	Armazenamento de água pluvial	Reservatório superior 4 x 2000 L - PEAD	Fabricação	0,047	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>
				7,54	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,047	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>
				1,49	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
		Reservatório inferior 50000 L - concreto	Fabricação	7,50	m³	<i>Concrete, normal {RoW}   unreinforced concrete production, with cement CEM III/A   Cut-off, U</i>
				363,60	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Disposição final	18,00	ton.	<i>Waste concrete {RoW}   Treatment of, inert material landfill   Cut-off, U</i>
				576,00	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
		Reservatório inferior 50000 L - formas de madeira	Fabricação	1,20	m³	<i>Plywood, for outdoor use {RoW}   production   Cut-off, U</i>
				3,87	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
	Disposição final		0,62	ton.	<i>Waste wood, untreated {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			19,97	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
	Reservatório inferior 50000 L - barras de aço	Fabricação	1,16	ton.	<i>Reinforcing steel {RoW}   production   Cut-off, U</i>	
			66,26	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Disposição final	1,16	ton.	<i>Waste reinforcement steel {RoW}   treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal   Cut-off, U</i>	
			37,20	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Fabricação	0,07	ton.	<i>Bitumen adhesive compound, hot {RoW}   production   Cut-off, U</i>	
			1,46	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
	Reservatório inferior 50000 L - manta asfáltica impermeável	Disposição final	0,07	ton.	<i>Waste bitumen {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			2,08	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
Tratamento de água pluvial	Freio d'água - polietileno	Fabricação	0,0002	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>	
			0,0009	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Disposição final	0,0002	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			0,0064	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
	Sifão extravasor - polietileno	Fabricação	0,0010	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>	
			0,0043	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Disposição final	0,0010	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			0,032	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	

Tabela III.1. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial) – Continuação.

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent
Aproveitamento de água pluvial	Tratamento de água pluvial	Conjunto mangueira boia - boia PEAD	Fabricação	0,000048	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>
				0,00021	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,000048	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>
				0,0015	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Fabricação	0,00016	ton.	<i>Brass {RoW}   production   Cut-off, U</i>
				0,00069	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
		Disposição final	0,00016	ton.	<i>Inert waste {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			0,0051	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Conjunto mangueira boia - mangueira de silicone	Fabricação	0,0017	ton.	<i>Silicone product {RoW}   production   Cut-off, U</i>
				0,0072	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,0017	ton.	<i>Inert waste {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>
		0,053		tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Conjunto mangueira boia - braçadeiras e anel em aço inox	Fabricação	0,000032	ton.	<i>Steel, chromium steel 18/8 {RoW}   steel production, electric, chromium steel 18/8   Cut-off, U</i>
				0,00014	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,000032	ton.	<i>Inert waste {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>
				0,0010	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Fabricação	0,00066	ton.	<i>Brass {RoW}   production   Cut-off, U</i>
				0,00282	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
		Disposição final	0,00066	ton.	<i>Inert waste {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			0,021	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Clorador flutuante - poliestireno	Fabricação	0,0020	ton.	<i>Polystyrene, general purpose {RoW}   production   Cut-off, U</i>
				1,57	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,0020	ton.	<i>Waste polystyrene {RoW}   treatment of waste polystyrene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>
				0,064	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
Recalque de água pluvial	Eletroboia de nível - PEAD	Fabricação	0,0008	ton.	<i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U</i>	
			0,0034	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	
		Disposição final	0,0008	ton.	<i>Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U</i>	
			0,026	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>	



Tabela III.1. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial) – Continuação.

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent		
Aproveitamento de água pluvial	Recalque de água pluvial	Válvula solenoide - latão	Fabricação	0,0017	ton.	Brass {RoW}  production   Cut-off, U		
				0,0075	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
			Disposição final	0,0017	ton.	Inert waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U		
				0,055	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
		Registro - latão	Fabricação	0,00093	ton.	Brass {RoW}  production   Cut-off, U		
				0,0040	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
			Disposição final	0,00093	ton.	Inert waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U		
				0,030	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
		Motobombas - ferro fundido	Fabricação	0,047	ton.	Cast iron {RoW}  production   Cut-off, U		
				8,87	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
			Operação	21767	kWh	Electricity, low voltage {BR}  market for   Cut-off, U		
				Disposição final	0,047	ton.	Waste bulk iron, excluding reinforcement {RoW}  treatment of, sorting plant   Cut-off, U	
	Distribuição de água pluvial	Tubulações - PVC	Fabricação		0,050	ton.	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}  Cut-off, U	
				8,86	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
			Disposição final	0,050	ton.	Waste polyvinylchloride {RoW}  treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill   Cut-off, U		
				1,58	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
		Conexões - PVC	Fabricação	0,007	ton.	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}  Cut-off, U		
				1,16	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
			Disposição final	0,007	ton.	Waste polyvinylchloride {RoW}  treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill   Cut-off, U		
				0,21	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U		
		Pavimento permeável	Estacionamento - infiltração da água pluvial	Manta asfáltica impermeabilizante	Fabricação	16,35	ton.	Bitumen adhesive compound, hot {RoW}  production   Cut-off, U
						367,88	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U
				Disposição final	16,35	ton.	Waste bitumen {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	
					523,20	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U	
Ligante asfáltico	Fabricação		13,77	ton.	Bitumen seal {RoW}  production   Cut-off, U			
			4297,76	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U			
	Disposição final		13,77	ton.	Waste bitumen {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U			
			440,80	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U			

Tabela III.1. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 1 (pavimento permeável e aproveitamento de água pluvial) – Continuação.

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent
Pavimento permeável	Estacionamento - infiltração da água pluvial	Pedra britada	Fabricação	2495,6	ton.	Gravel, crushed {RoW}   production   Cut-off, U
				30695	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U
			Disposição final	2495,6	ton.	Waste concrete gravel {RoW}   treatment of waste concrete gravel, collection for final disposal   Cut-off, U
				79858	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U
	Encaminha-mento da água pluvial ao reservatório	Drenos - PEAD	Fabricação	0,925	ton.	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U
				165,63	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U
			Disposição final	0,925	ton.	Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U
				29,61	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U

Tabela III.2. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 2 (pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional).

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent	
Abasteci-mento de água potável	Tratamento de água na concessio-nária	--	Operação	21476	kWh	Electricity, medium voltage {BR}   market for   Cut-off, U	
				0,059	ton.	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U	
	Armazena-mento de água potável	Reservatório superior 4 x 2500 L - PEAD	Fabricação	9,57	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U	
				0,059	ton.	Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U	
			Disposição final	1,89	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U	
				0,045	ton.	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U	
			Reservatório inferior 10000 L - PEAD	Fabricação	7,23	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U
					0,045	ton.	Waste polyethylene {RoW}   treatment of waste polyethylene, sanitary landfill   Cut-off, U
	Recalque de água potável	Motobombas - ferro fundido	Fabricação	0,047	ton.	Cast iron {RoW}   production   Cut-off, U	
				8,87	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U	
			Operação	21767	kWh	Electricity, low voltage {BR}   market for   Cut-off, U	
				0,047	ton.	Waste bulk iron, excluding reinforcement {RoW}   treatment of, sorting plant   Cut-off, U	
			Disposição final	1,43	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U	
				0,047	ton.	Cast iron {RoW}   production   Cut-off, U	
				1,49	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U	

Tabela III.2. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 2 (pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional) -

Continuação.

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent			
Abastecimento de água potável	Distribuição de água potável	Tubulações - PVC	Fabricação	0,057	ton.	<i>Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}   Cut-off, U</i>			
				10,18	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
			Disposição final	0,057	ton.	<i>Waste polyvinylchloride {RoW}   treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill   Cut-off, U</i>			
				1,82	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
		Conexões - PVC	Fabricação	0,0074	ton.	<i>Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}   Cut-off, U</i>			
				1,33	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
			Disposição final	0,0074	ton.	<i>Waste polyvinylchloride {RoW}   treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill   Cut-off, U</i>			
				0,24	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
			Pavimento tradicional	Estacionamento - drenagem da água pluvial	Imprimação - asfalto diluído	Fabricação	6,54	ton.	<i>Bitumen seal {RoW}   production   Cut-off, U</i>
							2040,48	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>
Disposição final	6,54	ton.				<i>Waste bitumen {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>			
	209,28	tkm				<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
CBUQ - CAP e agregado miúdo	Fabricação	461,50			ton.	<i>Mastic asphalt {RoW}   production   Cut-off, U</i>			
		143988,46			tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
	Disposição final	461,50			ton.	<i>Waste asphalt {RoW}   treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>			
		14768,05			tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
CBUQ - agregado graúdo	Fabricação	294,30			ton.	<i>Gravel, crushed {RoW}   production   Cut-off, U</i>			
		9535,32			tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
	Disposição final	294,30	ton.	<i>Waste concrete gravel {RoW}   treatment of waste concrete gravel, collection for final disposal   Cut-off, U</i>					
		9417,60	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>					
	Base - brita granítica	Fabricação	1471,50	ton.	<i>Gravel, crushed {RoW}   production   Cut-off, U</i>				
			18099	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>				
Disposição final		1471,50	ton.	<i>Waste concrete gravel {RoW}   treatment of waste concrete gravel, collection for final disposal   Cut-off, U</i>					
		47088	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>					
Dispositivos de drenagem	Encaminhamento da água pluvial ao sistema público de drenagem	Concreto	Fabricação	1,83	m³	<i>Concrete, 35MPa {RoW}   concrete production 35MPa, RNA only   Cut-off, U</i>			
				88,82	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			
			Disposição final	4,40	ton.	<i>Waste concrete {RoW}   treatment of, inert material landfill   Cut-off, U</i>			
				140,70	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}   Cut-off, U</i>			

Tabela III.2. Quantitativos e processos envolvidos na implantação, operação e disposição final do Cenário 2 (pavimento e drenagem tradicional, abastecimento convencional) -

Continuação.

Subsistema	Função	Componente	Etapa no ciclo de vida	Qtde. Total	Un.	Processo na base Ecoinvent
Dispositivos de drenagem	Encaminhamento da água pluvial ao sistema público de drenagem	Formas de madeira	Fabricação	0,021	m <sup>3</sup>	<i>Plywood, for outdoor use {RoW}  production   Cut-off, U</i>
				0,066	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,011	ton.	<i>Waste wood, untreated {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U</i>
				0,34	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
		Concreto pré moldado	Fabricação	40,92	ton.	<i>Pre-cast concrete, min. reinf., prod. Mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER S</i>
				826,56	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
			Disposição final	40,92	ton.	<i>Waste concrete {RoW}  treatment of, inert material landfill   Cut-off, U</i>
				1309,41	tkm	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
		Areia	Fabricação	0,56	ton.	<i>Silica sand {RoW}  production   Cut-off, U</i>
				83,08	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,56	ton.	<i>Inert waste, for final disposal {RoW}  treatment of inert waste, inert material landfill   Cut-off, U</i>
				17,96	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
		Cimento	Fabricação	0,076	ton.	<i>Cement, Portland {RoW}  production   Cut-off, U</i>
				2,11	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
			Disposição final	0,076	ton.	<i>Waste cement, hydrated {RoW}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U</i>
				2,42	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
		Tijolo cerâmico	Fabricação	1,61	ton.	<i>Clay brick {RoW}  production   Cut-off, U</i>
				122,73	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>
			Disposição final	1,61	ton.	<i>Waste brick {RoW}  treatment of waste brick, collection for final disposal   Cut-off, U</i>
				51,61	tkm	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}  Cut-off, U</i>