

Universidade de Passo Fundo
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil e Ambiental

Abby Daniela Ortega Sandoval

MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUAS DE CHUVA COLETADAS EM
SOLO

Passo Fundo

2016

Abby Daniela Ortega Sandoval

MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUAS DE CHUVA COLETADAS EM
SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião, e coorientação da Prof^a. Dr^a. Vera Maria Cartana Fernandes.

Passo Fundo

2016

ABBY DANIELA ORTEGA SANDOVAL

**MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUAS DE CHUVA COLETADAS EM
SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião, e coorientação da Prof^a. Dr^a. Vera Maria Cartana Fernandes.

Data de Aprovação: Passo Fundo, 01 de dezembro de 2016.

Professor Doutor Vandré Barbosa Brião
Orientador

Professora Doutora Vera Maria Cartana Fernandes
Coorientadora

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Jeferson Steffanello Piccin
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Krishna R. Reddy
University of Illinois at Chicago

Passo Fundo

2016

“Uma viagem de mil milhas começa com um único passo.”
Lao-Tsé

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar todos os meus dias e me dar determinação e força de vontade.

Aos meus pais e minha irmã pelo amor e apoio na distância.

Ao meu parceiro de vida, Gali, pelo amor, a alegria de viver e os conhecimentos compartilhados diariamente.

Ao Prof. Vandré pela orientação, ensinamentos, confiança e disposição. Levo grandes contribuições para toda a vida.

À Prof. Vera pela gestão, as contribuições e a confiança.

Aos acadêmicos e funcionários do laboratório, Augusto, Ale, Brenda, João e Clarice pela dedicação, companheirismo e auxílio.

Aos funcionários da Engenharia Ambiental, Marilda e Cassiane, pela ajuda e a paciência.

Aos funcionários do CETEC pela disposição e ajuda.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, professores, colegas e administrativos, pela grande oportunidade de realização pessoal e profissional a mais de 4000 km longe de casa.

RESUMO

O gerenciamento dos escoamentos de água de chuva tem sido um tema de discussão pelos problemas que representam ao nível urbano e rural: inundações, falhas no sistema de drenagem e contaminação dos corpos de água. Como solução, a implantação dos sistemas de aproveitamento de água de chuva tem sido impulsionada, nas últimas décadas, para atingir necessidades que não precisam de potabilização tais como descarga de bacias sanitárias, rega de jardins, limpeza e climatização de espaços, mas também para o seu uso potável. As áreas de coleta comumente usadas são os telhados dos edifícios, aproveitando a sua inclinação e, em teoria, o menor grau de poluição. No entanto, há uma falta de pesquisa na possibilidade de utilizar áreas de coleta alternativas e tratamentos adequados para atingir os níveis de qualidade. No interesse do gerenciamento sustentável dos escoamentos de água de chuva, este trabalho aborda o aproveitamento dessas águas utilizando como área de coleta um estacionamento universitário, estudando processos de separação por membranas como técnicas de tratamento para adequar a sua qualidade. A água de chuva foi coletada através de um sistema colocado dentro da boca de lobo, aproveitando o escoamento por gravidade. Na primeira etapa de experimentação, foram avaliadas a variação do fluxo e as rejeições das membranas de MF e UF, com duas pressões de operação: 10 e 40 kPa. Com a pressão de 40 kPa foram observadas maiores eficiências na remoção de matéria orgânica, tanto na MF como na UF. Para a segunda etapa foram aplicados testes de operação contínua entre 4,5 e 8 horas, com os dois processos de separação por membranas. A água de chuva e o permeado foram caracterizados através de 27 parâmetros físico-químicos e microbiológicos, incluindo metais pesados, nutrientes, hidrocarbonetos e coliformes termotolerantes. As concentrações de cor, turbidez, metais tóxicos e óleos e graxas apresentaram concentrações acima das referidas na literatura. A eficiência de remoção da MF e UF esteve acima do 90% para sólidos suspensos e coliformes, mas para dureza, nitrato e sulfato as rejeições foram baixas. A membrana de UF apresentou um melhor desempenho no fluxo e na rejeição de Fe, Ni e sólidos totais. As perspectivas de aplicação foram determinadas através da avaliação da qualidade do permeado com diretrizes do Brasil, Estados Unidos, Austrália e Espanha. Também foi proposto um sistema de tratamento *in loco*. Logo, o gerenciamento dos escoamentos de água de chuva com o tratamento por micro e ultrafiltração é uma opção muito atraente para usos urbanos, redução de riscos locais e controle de poluição dos corpos de água.

Palavras-chave: escoamentos pluviais, metais pesados, PSM, solo, sustentabilidade.

ABSTRACT

The management of stormwater runoff has been a topic of discussion for problems at urban and rural level: floods, failure of drainage system and pollution of water bodies. As a solution, the implantation of rainwater harvesting systems has been driven in the last decades to reach needs that do not require purifying process such as flushing toilets, irrigation, cleaning and cooling spaces, but also for potable use. Catchment areas commonly used are the roofs of the buildings, taking advantage of its slope and, in theory, the lowest degree of pollution. However, there is a lack of research in modern rainwater harvesting systems, on the lookout for new areas of catchment and proper treatment to achieve the quality levels. In the interest of sustainable management of stormwater runoffs, this work addresses the stormwater harvesting using a university parking lot as catchment area, studying membrane technology as a treatment technique to suit this water. The stormwater was collected through a system placed inside the drain sewer, taking advantage of gravity flow. In the first experimental stage, the flux variation and rejections of the MF and UF were evaluated, working with two operating pressures: 10 and 40 kPa. With 40 kPa pressure greater efficiencies were observed in the removal of organic matter, both in MF and UF. For the second stage, continue operation tests were applied between 4,5 and 8 hours, with both membrane separation processes. The stormwater and the permeate were characterized by 27 physical, chemical and microbiological parameters, including heavy metals, nutrients, hydrocarbons and fecal coliforms. Color, turbidity, metals and oil and grease values presented concentrations above of similar studies. The removal efficiency in MF and UF was above 90% for suspended solids and coliforms, but for hardness, nitrate and sulfate, rejections were low. The UF membrane presented a better performance in flow behaviour and removal of Fe, Ni and total solids. The application prospects were determined by evaluating the permeate quality with guidelines of Brazil, United States, Australia and Spain. It had also been proposed a treatment system in situ. Therefore, the management of stormwater runoff by micro and ultrafiltration treatment is a very attractive option for urban uses, reducing local risks and pollution that reaches water bodies.

Keywords: Ground, heavy metals, MSP, stormwater runoff, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema típico de aproveitamento de água de chuva em telhados.....	18
Figura 2 - Fluxograma da planta de água de chuva em Lankwitz, Berlim.....	23
Figura 3 - Desempenho de seis superfícies para coleta de água de chuva numa região semiárida da China.	23
Figura 4 - Perfil de geração de água de cinza e água negra em um apartamento típico na cidade de Passo Fundo.....	30
Figura 5 - Esquema geral de uma <i>Bioswale</i>	36
Figura 6 - <i>Wetland</i> construída em Portland, Oregon, Estados Unidos.....	36
Figura 7 - Sistema de biorretenção, implantado em Auckland, Nova Zelândia.....	37
Figura 8 - Esquema geral da operação dos processos de separação por membrana.....	38
Figura 9 - Capacidade de separação das membranas de Microfiltração.....	40
Figura 10 - Capacidade de separação das membranas de Ultrafiltração.	42
Figura 11 - Fotomicrografia da seção transversal de uma membrana de UF anisotrópica.	43
Figura 12 - Membrana de Ultrafiltração usada para tratamento de água de chuva.	45
Figura 13 - Localização da área de coleta de água de chuva.....	46
Figura 14 - Estacionamento da Faculdade de Direito da UPF.	47
Figura 15 - Esquema da área de coleta.	47
Figura 16 - Diagrama do sistema de coleta situado na boca de lobo.....	48
Figura 17 - Instalação do sistema para a coleta de água de chuva no estacionamento.	48
Figura 18 - Unidade piloto para Microfiltração e Ultrafiltração com membrana submersa. ...	49
Figura 19 - Peneiramento preliminar ao processo de MF e UF.....	50
Figura 20 - Esquema geral de unidade para filtração submersa.....	51
Figura 21 - Variação do fluxo por tipo de membrana e pressão.	55
Figura 22 - Aparência das amostras em estado bruto.....	60
Figura 23 - Perfis cromatográficos dos padrões e as amostras em estado bruto.	62
Figura 24 - Desempenho do fluxo nas membranas de a) MF e b) UF.	64
Figura 25 - Aparência do permeado após da aplicação dos PSM de MF e UF.....	67
Figura 26 - Distribuição das concentrações para o bruto e permeado, a) turbidez; b) cor.	68
Figura 27 - Distribuição das concentrações para o bruto e permeado, a) sólidos totais; b) sólidos suspensos totais.....	69
Figura 28 - Diagrama do sistema de tratamento por UF de água de chuva coletada em solo..	75
Figura 29 - Seção transversal do sistema de tratamento por UF de água de chuva coletada em solo	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade de água de chuva coletada em áreas de tráfego urbano utilizados no Estado de São Francisco, Estados Unidos.	32
Tabela 2 - Valor máximo, mínimo e médio de parâmetros físico-químicos e microbiológicos trabalhados na Alemanha.....	32
Tabela 3 - Qualidade das amostras em estado bruto e do permeado.....	57
Tabela 4 - Rejeições calculadas para turbidez, cor e matéria orgânica.	57
Tabela 5 - Caracterização das amostras de água de chuva em estado bruto.	59
Tabela 6 - Condições de operação para os ensaios de longo período.....	63
Tabela 7 - Qualidade do permeado pelo tratamento por membranas de MF e UF.....	66
Tabela 8 - Avaliação da qualidade do permeado da MF e UF.	71
Tabela 9 - Características de precipitação e volume estimado para cada coleta.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de aproveitamento de água de chuva no Brasil.....	21
Quadro 2 - Parâmetros de interesse para coletas de água de chuva feitas ao nível de solo.....	26
Quadro 3 - Processos de separação por membranas comerciais.	39
Quadro 4 - Parâmetros de avaliação e testes para caracterização da água de chuva.	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	American Public Health Association - Associação Americana de Saúde Pública
AWWA	American Water Works Association - Associação Americana de Obras de Água
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
BMP	Best management practices - Melhores práticas de gestão
Cd	Cádmio
CE	Condutividade Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEC-NSW	Department of Environment and Conservation - Departamento de Ambiente e Conservação da Nova Gales do Sul, Austrália
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmenta Protection Agency - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
Fe	Ferro
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
HAPs	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
kDa	Kilodaltons
kPa	Kilopascal
MARM	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Espanha
MF	Microfiltração
NF	Nanofiltração
NH ₃ -N	Nitrogênio Amoniacal
Ni	Níquel
NO ₂ -N	Nitrito
NO ₃ -N	Nitrato
OMS	Organização Mundial da Saúde
OR	Osmose Reversa
Pb	Chumbo
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PSM	Processos de Separação por Membranas
SO ₄ ²⁻	Sulfato
SS	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
TP	Fósforo Total
NTK	Nitrogênio Kjeldahl
UF	Ultrafiltração
UFC	Unidade de Formação de Colônias

uH	Unidad de Hazen
$\mu\text{S.cm}^{-1}$	Microsiemen por centímetro
uT	Unidad de Turbidez
WEF	Water Environment Federation - Federação de Ambiente de Água
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Aproveitamento da água de chuva	17
2.1.1	Sistemas de aproveitamento de água de chuva	18
2.1.2	Desenvolvimento de sistemas de aproveitamento de água de chuva no mundo.....	19
2.1.3	Aproveitamento de água de chuva coletada no solo	22
2.1.3.1	Caracterização das águas de chuva coletadas em superfícies de solo	24
2.1.3.2	Benefícios do aproveitamento de água de chuva captada em solo	28
2.1.4	Diretrizes de avaliação da qualidade de água de chuva	30
2.1.5	Legislação para a coleta da água de chuva	33
2.2	Técnicas para o tratamento de escoamentos de água de chuva.....	35
2.3	Processos de separação por membranas	38
2.3.1	Microfiltração	40
2.3.2	Ultrafiltração	42
3	MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1	Local de estudo.....	46
3.2	Coleta, amostragem e transporte da água de chuva	48
3.3	Tratamento da água de chuva por MF e UF	49
3.4	Delineamento experimental para a aplicação dos tratamentos de MF e UF	51
3.5	Caracterização da água de chuva para os ensaios de longo período	52
3.6	Determinação dos possíveis usos da água de chuva tratada.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Determinação da membrana e a pressão de trabalho	55
4.1.1	Influência da pressão de operação no desempenho do fluxo.....	55
4.1.2	Rejeição de contaminantes na MF e UF em relação à variação da pressão.....	56
4.2	Ensaio de longo período	58
4.2.1	Caracterização da água de chuva em estado bruto.....	58
4.2.2	Fluxo permeado da MF e UF	63
4.2.3	Qualidade do permeado	66
4.3	Perspectivas de aplicação	71
4.4	Proposta para a aplicação de um sistema de aproveitamento de água de chuva coletada em pavimento asfáltico	74

5	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento adequado da água de chuva é incentivado pela distribuição irregular dos volumes de água, a poluição das fontes naturais de água e os riscos que podem gerar na infraestrutura urbana e rural.

O Brasil detém 12% da água de superfície mundial, mas no seu território há um grande contraste entre oferta e demanda. Segundo Tomaz (2005), a região Norte contém apenas 8,32 % da população nacional e 68,5 % da disponibilidade hídrica brasileira. Por sua vez, outras regiões, como o nordeste brasileiro, apresentam endêmicos períodos de seca. De acordo com Barnett et al. (2004) as consequências relacionadas com a mudança climática, tais como a redução da neve de montanha e do armazenamento de água natural, também colocam em risco a estabilidade do fornecimento da água potável em muitas comunidades. Logo, é necessária a busca de fontes alternativas de água para suprir a demanda da população.

A possibilidade de utilizar a água de chuva permite diminuir e preservar a água tratada proveniente do abastecimento público. Segundo Nolde (2007) as atividades que não necessitam de purificação tais como limpeza, descarga de bacias sanitárias, climatização ou irrigação poderiam ser realizadas com águas de menor qualidade. Assim, não só se economiza água tratada, mas também energia e outros insumos utilizados para o tratamento e transporte. Isto representa menores custos para as empresas envolvidas ao longo do ciclo de fornecimento e para o usuário.

A poluição das fontes de água é gerada principalmente pela ação do homem, devido ao despejo não controlado de resíduos sólidos e líquidos, a destruição dos habitats naturais e a redução do fluxo de água, entre outros fatores relatados por Ureña (2002). Além disso, para autores como Brown e Peake (2006), Sun et al. (2015), Vogel e Moore (2016), os escoamentos de água de chuva podem prejudicar a qualidade de solos, corpos de água superficiais e aquíferos subterrâneos, pelas cargas poluidoras transportadas ao longo do crescente número de áreas impermeáveis.

De acordo à Comissão Europeia (2014), o uso de fontes alternativas de água fornece grandes benefícios ao nível social, econômico e ambiental. O aproveitamento de água de chuva permite uma maior eficiência nas estações de tratamento de esgoto em cidades que reúnem a coleta de esgoto doméstico, pluvial e industrial num sistema unitário, basicamente pela redução dos volumes a serem tratados. Por sua vez, em cidades que utilizam um sistema separado, como o adotado pelo Brasil, o uso dessa água melhora a qualidade dos escoamentos que atingem os corpos de água superficiais e subterrâneos.

De acordo com Furumai (2008), Herrmann e Schmida (2000) e Mohammed et al. (2007), o gerenciamento dos escoamentos de água de chuva é importante para o controle de enchentes, regular vazamentos, falhas e rupturas na tubulação permitindo um trabalho mais eficaz de toda a rede de águas pluviais. Tal gerenciamento pode ser através do aproveitamento dessas águas ou do tratamento antes de atingir os corpos de água.

Os sistemas de aproveitamento de água de chuva tornaram-se um dos mais utilizados por causa de sua conveniência e eficiência. Existem muitos exemplos de aplicação em diferentes polos de desenvolvimento americanos, europeus e asiáticos, com projetos de inovação sustentável ao nível urbano e rural (NOLDE, 2007; ABDULLA, AL-SHAREEF, 2009; CHIU, LIAW, CHEN, 2009; NADDEO, SCANNAPIECO, BELGIORNO, 2013).

Segundo Chiu, Liaw e Chen (2009), o desempenho na maioria dos sistemas de aproveitamento de água de chuva depende de quatro variáveis: precipitação, área de coleta, volume do tanque e demanda de água. De acordo com Sturm et al. (2009) os sistemas que utilizam telhados como áreas de coleta têm uma produtividade limitada pela sua dimensão, enquanto a principal vantagem de utilizar o piso para tal fim reside simplesmente na possibilidade de utilizar uma área maior, principalmente em regiões onde a precipitação é baixa. No entanto, a pesquisa voltada a otimizar esses sistemas com novas áreas ou tratamentos, ainda é limitada.

A inovação de novas áreas de coleta para os sistemas de aproveitamento de água de chuva, devem ir conjugados com a caracterização completa da água e com a pesquisa de tratamentos adequados para não representar um risco latente na comunidade.

Além dos contaminantes arrastados ao longo da atmosfera, deve-se considerar outros fatores relacionados à superfície de coleta. Para Zhu et al. (2004) e Aryal et al. (2010), quando são utilizadas áreas ao nível de solo e que têm incidência de trânsito urbano, é importante caracterizar outros materiais poluentes tais como nutrientes, metais pesados e hidrocarbonetos de petróleo, substâncias derivadas dos processos de combustão e presentes em óleos e combustíveis. As concentrações desses materiais podem afetar a qualidade dos corpos de água superficiais e subterrâneos, colocando em risco a vida dos usuários e de todas as espécies no ambiente que têm contato com essa água (BAEK et al., 2015; REDDY, XIE, DASTGHEIBI, 2014a; ZHANG et al., 2010).

O uso da tecnologia de membranas é amplamente conhecido não só na indústria química e de alimentos, mas também no tratamento de águas de esgoto, água cinza, águas de processo e produção de água ultrapura. De acordo com Fane (1996), as membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, são altamente competitivas em termos de

qualidade e custos para tratamento de água de abastecimento público, em comparação com os procedimentos convencionais.

Nas diretrizes para água potável da Organização Mundial da Saúde - OMS (2011), o tratamento por membranas está no topo do ranking de complexidade técnica de processos para tratamento de água. Um dos grandes benefícios do uso da MF ou UF é que podem ser consideradas como técnicas alternativas para a desinfecção química, reduzindo os custos totais no processo de adequação para consumo.

Segundo Habert, Borges e Nobrega (2006) as vantagens dos processos de separação por membranas residem no baixo consumo energético, o uso de processos combinados para maior eficiência, a operação à temperatura ambiente e a simplicidade de operação. A microfiltração (MF) pode remover impurezas tais como material suspenso, bactérias e microsolutos que permeiam livremente a membrana. Dentro de aplicações típicas estão a produção de água pura e tratamento de esgoto. Em larga escala, a Ultrafiltração (UF) é usada para tratar águas residuais industriais e água de processo. Também é utilizado na produção de água ultrapura porque pode remover sólidos suspensos e coloidais, macromoléculas, bactérias e vírus (SCOTT, 1998; STRATHMANN, 1981; ARYAL et al., 2010; LECHEVALLIER, AU, 2004).

Dentro das linhas de pesquisa que tem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, o presente trabalho faz uma contribuição na área de Infraestrutura Sustentável, que aborda não só novas alternativas para a conservação da água, mas também práticas que podem ser aplicadas em qualquer nível de infraestrutura. Com o objetivo de buscar uma alternativa de produção de água potável, Miorando (2015) utilizou membranas de ultrafiltração para tratamento de água de chuva coletada em telhado. Observando a possibilidade de atingir os padrões brasileiros para consumo humano, este trabalho aborda a aplicação de processos de separação por membranas para tratar água de chuva coletada em superfícies de tráfego urbano.

O objetivo principal do trabalho foi o gerenciamento dos escoamentos de água de chuva urbanos, estudando processos de separação por membranas como técnicas de tratamento para adequar esta água. Os objetivos específicos foram coletar e caracterizar a água da chuva coletada ao nível do solo, física, química e microbiologicamente; realizar o tratamento dessa água por membranas de microfiltração e ultrafiltração na busca de padrões de qualidade para diferentes fins; e avaliar os possíveis usos da água de chuva tratada em diversos cenários.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aproveitamento da água de chuva

Os primeiros registros que se tem de sistemas que usam a água da chuva, datam das primeiras civilizações do Oriente Médio e Ásia, de 3000 a.C. As populações localizadas no deserto de Negev, em Israel e na Jordânia 2000 anos a.C., coletavam o escoamento nas encostas para usos domésticos e agrícolas. No entanto, encerrando o primeiro milênio a.C., os romanos desenvolveram tecnologias avançadas e suas cidades foram projetadas para que a água da chuva fosse a principal fonte de uso doméstico e potável. Na China, há mais de 6000 anos atrás são conhecidos sistemas onde a coleta de água foi feita nos telhados de antigas pousadas e, após, destinada a tanques em formato de garrafa com uma capacidade entre 20 e 30 m³. No Japão, esse tipo de sistema foi a opção mais viável para as pessoas que habitavam as muitas ilhas que compõem o país, onde faltavam outras fontes alternativas para o abastecimento de água (GOULD; NISSEN-PETERSEN, 1999).

Nas Américas são conhecidos reservatórios feitos pelos maias na Península de Iucatã, chamados *chultunes*, onde a água era coletada através de grandes canais rebocados, que datam de antes da chegada de Cristóvão Colombo. Enquanto isso, com a chegada do Império Português, em algumas áreas do nordeste brasileiro começou-se a construção dos poços de escavação manual feitos com argamassa e tijolos (TOMAZ, 2005; GOULD, NISSEN-PETERSEN, 1999).

Ao longo da história, as superfícies de coleta foram basicamente as mesmas: Os telhados e o solo. No entanto, a forma de seus reservatórios variou de acordo com as suas tradições e disponibilidade de materiais. De acordo com Crow, Bardill e Bayliss (2008), o volume pode variar entre 200 e 2000 m³ nas regiões do Norte da África e no Mediterrâneo, até 80.000 m³, exemplo da maior cisterna conhecida até a data em Istambul, Turquia, chamada Cisterna Basílica.

A meados do século XX, os sistemas de aproveitamento de água de chuva foram substituídos pela extração intensiva de água subterrânea através de bombeamento ou perfurações. No Japão, com a rápida urbanização das cidades, as águas superficiais dos rios e diferentes ecossistemas aquáticos foram amplamente exploradas através de barragens para satisfazer as necessidades dos habitantes. No entanto, o governo aplicou medidas restritivas no uso excessivo dessa técnica, para controlar os problemas sociais, ambientais e econômicos

gerados, precisando novamente de fontes alternativas para atender a demanda de água (FURUMAI, 2008).

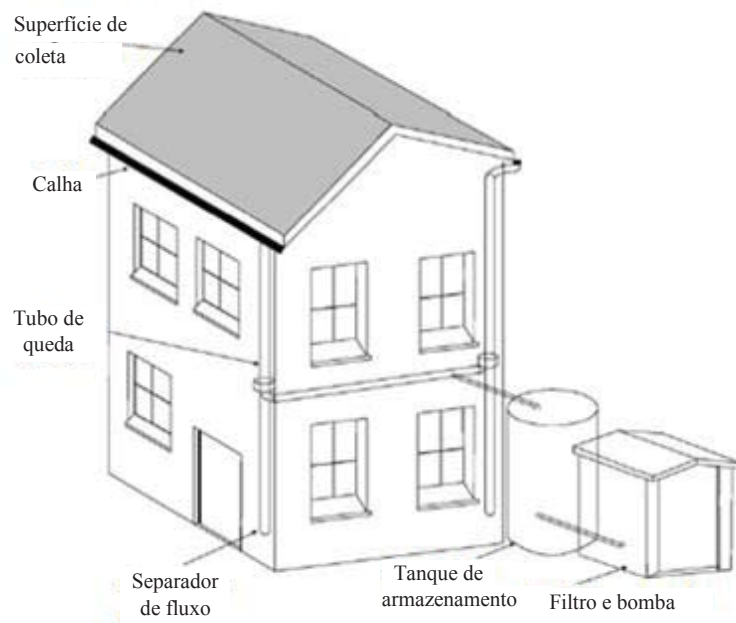
2.1.1 Sistemas de aproveitamento de água de chuva

Os sistemas que usam a água da chuva podem ser adaptados para atividades que não exigem água potável como irrigação, lavagem de carros, climatização, atividades de limpeza, descarga de bacias sanitárias, bem como para usos que requerem a sua purificação.

Existem três formatos principais de sistemas de aproveitamento de água de chuva: a) In situ, quando a coleta e armazenamento de água é no solo; b) sistema de captação externo, quando se coleta o escoamento proveniente da precipitação sobre qualquer superfície, armazenando-o para fins agrícolas; c) sistemas domésticos, quando a captação ocorre em telhados, ruas e jardins (HELMREICH; HORN, 2009).

De acordo com Li, Boyle e Reynolds (2010), os três elementos que compõem um sistema de aproveitamento de águas de chuva tipicamente são: área de captação, sistema de transporte do escoamento e tanque de armazenamento. A Figura 1 mostra o esquema de um sistema típico para a utilização da água de chuva em telhados da Irlanda, que também é comumente utilizado em todo o mundo.

Figura 1 - Sistema típico de aproveitamento de água de chuva em telhados.



Fonte: Adaptado de Li, Boyle, Reynolds (2010).

A eficiência destes três componentes depende de diversos fatores associados com o equipamento e instalação. No caso de telhados deve-se ter atenção que as superfícies lisas, com materiais impermeáveis captam mais água e com melhor qualidade. Atualmente, existem materiais concebidos para sistemas de coleta de água. O coeficiente de escoamento, definido como a relação entre o volume de água que se drena para a superfície de coleta e do volume de água que entra, é um dos fatores que define a eficiência no momento da aquisição (LI; BOYLE; REYNOLDS, 2010).

O sistema de transporte geralmente consiste de calhas e tubulações, que devem ser dimensionados e instalados corretamente para evitar incorrer em perdas previsíveis dentro do sistema (ABDULLA; AL-SHAREEF, 2009).

O tanque de armazenamento e a sua localização, são dois elementos importantes no momento da construção ou escolha. Uma vez que a água será armazenada nesse local por um tempo determinado, outro fator importante é o seu tamanho, que deve seguir um projeto de acordo com a oferta e a demanda do lugar, de modo que o líquido não seja contaminado. De acordo com Li, Boyle e Reynolds (2010) é o componente mais caro do sistema, cujo valor leva entre 50 e 70% dos custos.

2.1.2 Desenvolvimento de sistemas de aproveitamento de água de chuva no mundo

Os sistemas atuais de coleta de águas de chuva são enquadrados por preocupações globais de abastecimento de água. A sua inclusão nos sistemas convencionais foi impulsionada, em alguns casos, pelas políticas contra a mudança climática e escassez de água, e em outros, por iniciativa dos cidadãos.

De acordo com Tomaz (2005), os países que desenvolveram mais pesquisas sobre o aproveitamento de água da chuva são a Alemanha, os Estados Unidos e o Japão.

Na Alemanha, o uso de água da chuva em casas, edifícios públicos e indústria, iniciou o seu uso nos anos 80, através de sistemas ligados à rede de abastecimento, a fim de utilizar esta água para descarga de bacias sanitárias. Hamburgo foi o primeiro estado a instalar esses sistemas em 1988. Tanques de armazenamento de água da chuva têm sido usados em outros níveis comerciais, incluindo escolas, lavagens de carros e indústrias que requerem alta demanda de água (HERRMANN; SCHMIDA, 2000).

O papel do governo alemão tem sido fundamental para incentivar a utilização de fontes alternativas de abastecimento. Segundo Nolde (2007), qualquer novo projeto é exigido por lei para reter a água da chuva ou infiltrar no lugar. A iniciativa foi tão grande que desde os anos

90, cada ano são instaladas em Berlim 50.000 plantas para aproveitamento de águas de chuva, enquanto o governo oferece entre US \$ 1500 e US \$ 2.000, para quem desenvolva sistemas semelhantes. Além disso, uma das grandes vantagens da utilização deste tipo de água é que a sua utilização é regulada pelo Departamento de Desenvolvimento Urbano do Senado de Berlim, em colaboração com os departamentos de saúde locais e da Universidade Técnica de Berlim.

Nas Américas, o trabalho dos Estados Unidos em diferentes estados é realizado, com a implementação de sistemas de aproveitamento de água de chuva e legislação de uso. A Associação Americana de Sistemas de Coleta de Águas de Chuva (ARCSA por sua sigla em inglês), fundada em 1994, é responsável por promover o uso sustentável da coleta de águas de chuva. A associação reúne pessoas em 6 diferentes níveis de participação como profissionais, estudantes, projetistas, construtores, pesquisadores e consultores (THOMAS et al., 2014).

Califórnia, Texas, Arizona, Ohio e Carolina do Norte, fazem parte dos treze estados que têm leis e programas para incentivar sistemas de uso de água da chuva. A cidade de São Antônio, Texas, paga US \$ 200 por usuário, se economizar 1.230 m³ de água municipal utilizando a água da chuva, durante um período de 10 anos (NATIONAL CONFERENCE OF STATE LEGISLATURES, 2013; TOMAZ, 2005).

Assim como existem incentivos financeiros, existem também casos em que, através de regulamentos, o governo local incentiva os habitantes reduzir o consumo de água municipal ou utilizar outras fontes de água. De acordo com Jones e Hunt (2010), no verão de 2007 a cidade de Raleigh, Carolina do Norte, sofreu uma grande seca no seu território. Portanto, a partir desse período foram implementadas restrições sobre o uso da água para irrigação, forçando os cidadãos a encontrarem fontes alternativas, como a água da chuva.

O Sudeste da Ásia e o Japão, são regiões que experimentaram grandes mudanças demográficas que têm impulsionado a exploração crescente dos recursos hídricos. No caso de Tóquio, os níveis de água subterrânea e o fluxo dos rios sofreram um grande declínio depois da Segunda Guerra Mundial, de modo que o governo impôs severas restrições para a extração de água, a fim de controlar um problema adicional: afundamento de terras (FURUMAI, 2008).

Embora Tóquio tenha uma boa provisão de água, há cidades como Sumida, que apesar de ter uma precipitação anual de 1.400 mm, capta água da chuva para suprimentos de emergência e atender sua demanda local entre 20 e 60% de água. Armazenamento de água de chuva tem sido uma prática de grande recepção em torno da área metropolitana, para a descarga de sanitários e água de refrigeração, tanto em residências individuais como em grande escala. Assim, em março de 2002, em Tóquio haviam 850 instalações com sistemas de captação de

águas de chuva, dos quais 566 foram para o serviço público e 284 para edifícios privados (TOMAZ, 2005; FURUMAI, 2008).

Várias regiões da Índia optaram pelo uso frequente de água da chuva, na sequência do declínio nos níveis de águas subterrâneas e o afundamento da terra, como resultado da sua sobreexploração. Em Punjab é comum usar essa água para irrigar as lavouras de arroz, beneficiando a recarga aquíferos subterrâneos. Enquanto isso, em Rajastão e Gujarate, o interesse em técnicas domésticas de aproveitamento da água de chuva reviveu, aplicando práticas tradicionais e novas, que usam as coberturas de edificações como áreas principais de coleta (SHAH et al., 2003).

Segundo Tomaz (2005), entre 1997 e 1999, no Nordeste do Brasil foram construídos cerca de 20.000 novos reservatórios para a captação da água de chuva, mas não há nenhuma tecnologia adicional para tornar o sistema eficiente ou mesmo para melhorar a qualidade da água. Ao nível comercial há um exemplo de aproveitamento de água de chuva no município de Guarulhos (Região Metropolitana de São Paulo), onde uma indústria de tingimento de tecido aproveita a água através de uma área de telhado de 1.500 m², e tem um reservatório subterrâneo de 370 m³. No Quadro 1 se apresentam alguns exemplos do aproveitamento de água de chuva no Brasil, na sua maioria do setor privado, em múltiplos cenários que coletam a água desde o telhado. Existem outros exemplos desenvolvidos informalmente, só que não são referenciados.

Quadro 1 - Exemplos de aproveitamento de água de chuva no Brasil.

Companhia	Local	Volume	Uso	Referência
Estádio Nilton Santos (Antes Estádio João Havelange)	Rio de Janeiro (RJ)	11.000 m ³ / ano	Irrigação do gramado, áreas de aquecimento, descarga de vasos sanitários, sistema de combate a incêndio.	Revista Fator Brasil (2007)
Loja Aquitaine Veículos (da rede autorizada Peugeot)	São Paulo (SP)	Economia de água de até 60% em época de chuva	Descarga de bacias sanitárias, lavagem de ambientes internos e externos	Revista Meio Filtrante (2009)
Departamento de Transportes - Prefeitura de Guarulhos	Guarulhos (SP)	45.000 litros/semana	Lavar frota de quase 700 veículos da Prefeitura.	Revista TAE (2010)
Whirlpool América Latina	Manaus (SP)	1,14 mil m ³ / ano 2014	Planta	Revista meio ambiente industrial e Sustentabilidade (2015)
	Joinville (SP)	11,91 m ³ / ano 2014	Planta	

Uma das grandes contribuições para o incentivo dos sistemas de aproveitamento de águas de chuva no Brasil, é a norma NBR 15527. Nela, são descritos os requisitos básicos para a implementação de um sistema de aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis (ABNT, 2007).

No entanto, de acordo com Li, Boyle e Reynolds (2010) as informações para implementar tais sistemas, devem vir do setor público responsável pela área de saneamento, para ajudar os habitantes a aceitar e avaliar a prática de novos sistemas domésticos de aproveitamento ou reúso de água.

2.1.3 Aproveitamento de água de chuva coletada no solo

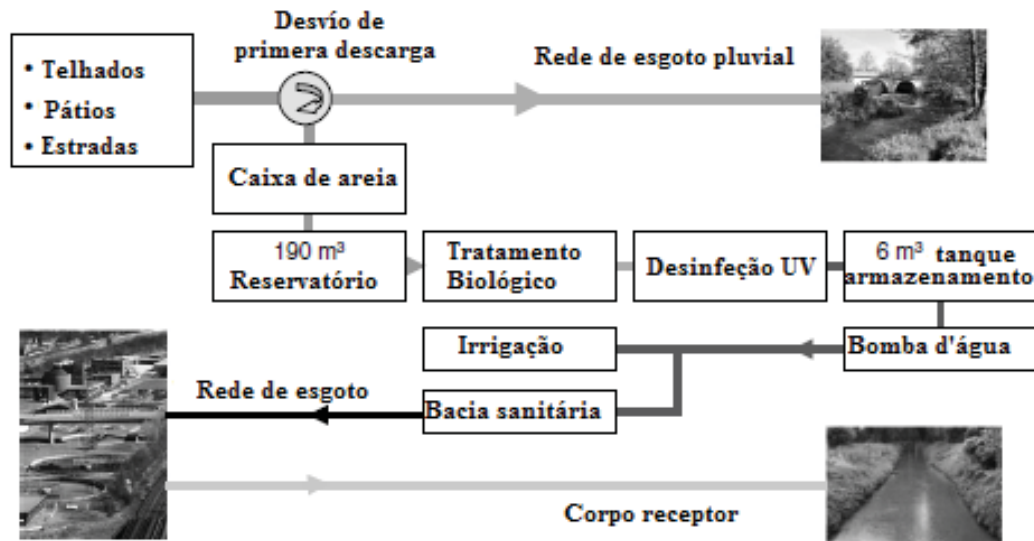
Entre os sistemas que utilizam a água da chuva, uma das variáveis mais importantes é a área de captação. A publicação de Tecnologias Ambientalmente Racionais pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (2008), sugere além de superfícies convencionais tais como os telhados, o uso de ruas, superfícies pavimentadas e áreas verdes, como uma alternativa emergente dentro destes sistemas, para reduzir o consumo de água potável e fornecer outra fonte para uso doméstico.

Na literatura, as pesquisas sobre sistemas que coletam água de superfícies diferentes das superfícies convencionais, são muito poucas e polarizadas. A Alemanha é o líder na inclusão de sistemas utilizando áreas de trânsito urbano para coletar água e também na caracterização dessas águas (STOTZ, 1987; MUSCHACK, 1990; DANNECKER, AU, STECHMANN, 1990; NOLDE, 2007; GÖBEL, DIERKES, COLDEWEY; 2007).

Um dos exemplos mais proeminentes é a planta de água de chuva em Lankwitz, Berlim. Nolde (2007) realizou uma pesquisa nessa planta para determinar se a água coletada em áreas poluídas poderia ser facilmente tratada para seu abastecimento. Foram utilizadas superfícies de telhado (63%), jardins (35%) e calçadas junto com áreas de tráfego (12%). O diagrama de fluxo apresentado na Figura 2 mostra o funcionamento geral do sistema.

A água coletada é descarregada para a rede de água de chuva e para um tanque de 190 m³ capacidade. A linha de tratamento começa com uma câmara de sedimentação antes de entrar no tanque, depois há um filtro biológico e, finalmente, ocorre uma desinfecção ultravioleta. Desde que o sistema trate efetivamente a água em termos físico-químicos e microbiológicos, esta é usada para a descarga de bacias sanitárias, atividades de irrigação e de limpeza. Como assunto adicional, o autor enfatiza que a energia requerida pela planta para o tratamento e distribuição de água é baixa.

Figura 2 - Fluxograma da planta de água de chuva em Lankwitz, Berlim.



Fonte: Adaptado de Nolde (2007).

Em uma forma menos desenvolvida, as famílias rurais das regiões semiáridas da China, utilizam superfícies como jardins, terra e estradas pavimentadas para a captação de água com fins domésticos e agrícolas. Devido aos padrões de baixa precipitação, a eficiência do sistema está diretamente ligada ao comportamento do escoamento superficial. Li, Xie e Yan (2004) avaliaram seis diferentes revestimentos na superfície de coleta: Concreto, plástico filme, brita sobre plástico filme, pavimento em fibra de vidro, terreno natural sem vegetação e terreno natural, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Desempenho de seis superfícies para coleta de água de chuva numa região semiárida da China.



Fonte: Li, Xie, Yan (2004).

O balanço final foi feito para alcançar a sustentabilidade econômica de acordo com o tipo de cultivo a ser irrigado através da água de chuva coletada. O estudo conclui que a seleção do material depende das variações de precipitação, tipo de solo e profundidade, topografia, disponibilidade do material e fatores socioeconômicos locais. O terreno natural pode ser a opção mais simples, mas não tem uma alta eficiência de escoamento (0,60), enquanto o concreto pode ter melhores desempenhos no escoamento (0,80 – 0,99), mas custos elevados de implantação.

Para Chiu, Liaw e Chen (2009) a eficiência dos sistemas de aproveitamento de água de chuva depende de diferentes variáveis incluindo, evidentemente, a quantidade de chuva. Além disso, a qualidade da água coletada pode ser altamente influenciada pela intensidade da chuva, a antecedência de períodos de seca e o tempo entre o evento e a coleta da água. Com isso, a OMS (2011) recomenda o descarte da primeira descarga ou *first flush* a fim de reduzir as elevadas concentrações microbianas encontradas nesses milímetros.

Melo (2007) e Andrade (2013) desenvolveram um trabalho na cidade de Natal, Rio de Janeiro, sobre a caracterização da água da chuva durante os primeiros milímetros de coleta. Eles concluíram que há uma grande variação na qualidade da água de chuva nos primeiros 5 mm de precipitação, mas, principalmente após o primeiro milímetro em variáveis como pH, condutividade elétrica e turbidez.

Na cidade chinesa de Zhengzhou, Zhang et al. (2009) foram caracterizados os primeiros escoamentos de água de chuva em diferentes superfícies, incluindo áreas de tráfego urbano. Os autores observaram que em áreas residenciais, o descarte dos primeiros 4 mm de chuva poderia remover a maioria dos poluentes, incluindo SST e DBO.

No caso das coletadas feitas nas superfícies dos telhados, outros autores como Helmreich e Horn (2009) e Zhu et al. (2004) sugerem como um tratamento básico e preliminar, o descarte dos primeiros milímetros de chuva através de separadores de fluxo antes da água atingir os tanques de armazenamento.

2.1.3.1 Caracterização das águas de chuva coletadas em superfícies de solo

A principal fonte de poluição ambiental em áreas urbanas e suburbanas são as atividades humanas. A rápida urbanização das cidades trouxe a impermeabilização de várias áreas ao nível do solo, de modo que a drenagem natural criada por plantas nativas locais, diminuiu (BOTELHO, 2011).

A água tem diferentes fontes de poluição quando ocorre um evento de chuva, mesmo sem tocar a superfície da terra. Indiscutivelmente os primeiros agentes estão no ar, tais como

gases e substâncias químicas. O grau de poluição depende da atividade doméstica ou industrial que está sendo desenvolvida na área. Além destes agentes, as partículas de maior diâmetro e de maior densidade são carregadas pela chuva à superfície de coleta, acrescentando contaminação a esta água (GÖBEL; DIERKES; COLDEWEY, 2007).

Na atmosfera são introduzidos vários compostos orgânicos, como resultado da combustão de combustíveis fósseis, evaporação de terras e as emissões de plantas industriais, o que pode ser transportado pela chuva através de longas distâncias. Além disso, ao utilizar estradas como áreas de coleta, a água pode dissolver gasolina derramada, pesticidas e outros produtos químicos encontrados nestas áreas, adicionando mais poluentes orgânicos (ZHU et al., 2004)

Existem duas fontes de poluição nas ruas além das partículas encontradas na atmosfera: Aquelas que não têm relação ao tráfego e aquelas que têm. As primeiras consistem em substâncias relacionadas com as estações climáticas entre verão e outono que consomem grandes quantidades de oxigênio, além das substâncias orgânicas e patogênicas, como fezes de animais. As fontes poluidoras do próprio tráfego na área, acolhem partículas de abrasão dos pneus, dos freios e da superfície da rua, além dos vazamentos não só de combustível, como também de óleos, graxas, fluido de freio e líquido de arrefecimento, os quais podem ser agentes corrosivos (MUSCHACK, 1990; GÖBEL, DIERKES, COLDEWEY, 2007; ARYAL et al., 2010).

Um ponto comum em trabalhos de caracterização de águas de chuva coletadas em áreas de tráfego urbano, é a amostragem considerando períodos anteriores de seca. A primeira descarga realizada no sistema terá uma maior carga contaminante, afetando a qualidade da água de serviço e a eficiência do escoamento (MUSCHACK, 1990; LI, XIE, YAN, 2004; NOLDE, 2007).

Um dos trabalhos com maior impacto ao nível da caracterização de escoamento foi o realizado por Göbel, Dierkes e Coldewey (2007) quando foram avaliadas mais de setenta publicações nas que se trabalharam amostras de múltiplas superfícies, incluindo 5 áreas de tráfego urbano: Ciclovias, estacionamentos, ruas de acesso, rua principal e autoestrada. As maiores concentrações dos parâmetros avaliados não foram encontradas em sua totalidade nas autoestradas, destacando-se os valores de DBO e DQO para essa área. Enquanto isso, as ruas principais tiveram as maiores concentrações em parâmetros como SST, fósforo total, nitrito e nitrato. As ruas secundárias apresentaram valores mais elevados em hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs).

De acordo com Aryal et al. (2010), as águas pluviais urbanas contêm vários poluentes divididos em quatro grandes categorias: SST, metais pesados, HAPs e nutrientes. EPA (1999) destaca sete grupos de poluentes associados com escoamento urbano potencialmente prejudicial: sólidos, substâncias que demandam oxigênio, nitrogênio e fósforo, patogênicos, hidrocarbonetos de petróleo, metais e produtos orgânicos sintéticos. No Quadro 2 estão relacionados os parâmetros principais a serem avaliados quando o sistema de aproveitamento de água de chuva utiliza o solo como área de coleta. Destacam-se a importância da análise considerando usos potáveis e não potáveis, junto com as possíveis fontes no ambiente.

Quadro 2 - Parâmetros de interesse para coletas de água de chuva feitas ao nível de solo.

(continua)

Parâmetro	Importância da análise	Possíveis fontes	Referências
pH	Valores de pH inferiores a 6,5 aumentam os riscos de corrosão no sistema de tratamento. Se o pH é superior a 8 pode diminuir a eficácia da desinfecção. Seu valor tem efeitos na toxicidade dos metais pesados.	Propriedade físico-química das águas. Seu valor pode ser alterado pela presença de metais, íons, material particulado.	EPA (2004); DEC-NSW (2006); OMS (2011)
Condutividade	Avaliação do conteúdo de sais solúveis na água e a concentração total de íons para o equilíbrio químico, efeito fisiológico em plantas ou animais.	De forma natural na água, sólidos dissolvidos.	DEC-NSW (2006); APHA, AWWA, WEF (1999)
Cor	Valores elevados de cor provocam rejeição por parte do consumidor.	Matéria orgânica (substâncias húmicas, taninos), metais (ferro, manganês).	FUNASA (2004)
Turbidez	Alta turbidez pode proteger certas substâncias patogênicas da desinfecção e reduzir a sua eficiência.	Materiais sólidos em suspensão. Presença de matéria orgânica, zinco, ferro. Erosão dos solos, despejos domésticos e industriais.	FUNASA (2004); Zhu et al. (2004); EPA (2004)
Dureza	Altas concentrações podem causar resistência aos sabões e provocar a formação de incrustações.	Íons de cálcio e magnésio nas águas, de forma natural.	FUNASA (2004); APHA, AWWA, WEF (1999); Sautchuk (2005)
Nitrogênio	O seu controle visa evitar a proliferação de algas e filmes biológicos o que pode formar depósitos em tubulações e reservatórios, além de microrganismos adversos à saúde.	Fertilizantes químicos, musgos e líquenes (excrementos de pássaros).	FUNASA (2004); EPA (2004); Sautchuk (2005); Göbel, Dierkes, Coldewey (2007); Aryal et al. (2010); OMS (2011)
Fósforo total			

Quadro 2 - Parâmetros de interesse para coletas de água de chuva feitas ao nível de solo.

(continuação)

Parâmetro		Importância da análise	Possíveis fontes	Referências
Sólidos totais		Desgaste excessivo e entupimento de bombas, filtros e equipamentos de controle. Sedimentação. Aumento da turbidez e, por conseguinte, da demanda de oxigênio.	Erosão de solos ou pavimentos, veículos (gás de escape, tráfego), despejos animais e humanos.	DEC-NSW (2006); Aryal et al. (2010)
	Sólidos suspensos			
Nitrito		Proteção contra a metahemoglobinemia infantil.	Redução microbiana do nitrato. Tubos de aço galvanizado quando se tem água pobre em oxigênio.	OMS (2011)
Nitrato		Elevadas concentrações podem causar metahemoglobinemia infantil, uma doença letal.	Atividades agrícolas (excesso de fertilizantes nitrogenados). Despejo de águas residuais (tanques sépticos).	OMS (2011); Sautchuk (2005)
Sulfatos		Ainda não existem concentrações alarmantes para a saúde, mas pode afetar a aceitabilidade da água.	Despejos industriais e deposição atmosférica. Os maiores níveis se encontram em águas subterrâneas, de forma natural.	OMS (2011)
Óleos e graxas		Conteúdo de substâncias inorgânicas tais como HAPs, possíveis causas de carcinogenicidade e mutagenicidade.	Gotejamento de óleo (veículos), processos industriais, tintas e conservantes, produtos químicos domésticos.	Zhu et al. (2004); Göbel, Dierkes, Coldewey (2007); Aryal et al. (2010)
DBO - Matéria orgânica		Geração de odores e sabores desagradáveis. O seu controle visa inibir o crescimento de bactérias em sistemas de distribuição e incrustação microbiana. Pode reduzir a eficiência da desinfecção.	Sedimentos, musgo, líquenes, decomposição bacteriana de matéria orgânica.	EPA (2004); Sautchuk (2005); DEC-NSW (2006); EPA (2012)
Metais Pesados	Chumbo	Efeitos no desenvolvimento neurológico, mortalidade, insuficiência renal, hipertensão.	Em autoestradas, da combustão de gasolina com chumbo e abrasão de pneus e freios.	Muschack (1989); Aryal et al. (2010); OMS (2011)
	Cádmio	Em concentrações baixas pode ser tóxico em plantas, animais e até humanos.	Pneus, atividades industriais, plásticos, baterias. Fertilizantes e poluição local. Fumar é uma fonte adicional significativa de exposição ao cádmio.	EPA (2004); Aryal et al. (2010); OMS (2011)
	Cromo	Não tem índice de toxicidade.	Abrasão de pneus e freios, superfície dos veículos.	Muschack (1989); Aryal et al. (2010)

Quadro 2 - Parâmetros de interesse para coletas de água de chuva feitas ao nível de solo.

(continuação)

Parâmetro	Importância da análise	Possíveis fontes	Referências	
Metais Pesados	Níquel	Pode ser tóxico em plantas e animais.	Abrasão de pneus e freios, superfície dos veículos, áreas industriais.	Muschack (1989); EPA (2004); Aryal et al. (2010)
	Zinco	Pode ser tóxico em plantas e animais.	Abrasão de pneus e freios, áreas industriais.	Muschack (1989); EPA (2004); Aryal et al. (2010)
	Cobre	Pode ser tóxico em plantas e animais em concentrações baixas. Coloração de louças sanitárias e lavanderia.	Abrasão de pneus e freios, superfície de veículos.	Muschack (1989); EPA (2004); Aryal et al. (2010); OMS (2011)
	Ferro	Coloração marrom-avermelhada da água provocando rejeição por parte do usuário. Pode manchar acessórios de lavanderia e tubulação.	Abrasão de pneus e freios, superfície de veículos. Nos solos, de forma natural.	Göbel, Dierkes, Coldewey (2007); Aryal et al. (2010); OMS (2011)
Coliformes (totais e termotolerantes)	Indicadores de contaminação fecal e da presença de bactérias. A sua presença torna a água não potável. Resistentes à ação dos agentes desinfetantes.	Fezes de animais de sangue quente, inclusive os seres humanos. Espécies heterotróficas que se reproduzem em água e solos.	FUNASA (2004); EPA (2004); OMS (2011).	

Os hidrocarbonetos de petróleo podem ser aromáticos ou alifáticos e têm recebido atenção especial devido ao seu potencial tóxico em óleos e graxas, compostos BETEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) e uma grande variedade de HAPs. Suas principais fontes incluem estacionamentos e estradas, emissões de automóveis, disposição inadequada de resíduos de óleo e concentrações ao longo de corredores de transporte (EPA, 1999).

Os HAPs são gerados pela perda de combustível e lubrificantes. Também pela combustão ineficiente do motor, sendo transportados no estado gasoso à atmosfera e depois lavados pela chuva tornando-se poluentes no escoamento de águas pluviais. Uma vez que os HAPs apresentam uma baixa degradabilidade e uma possível carcinogenicidade e mutagenicidade, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA por sua sigla em inglês) identificou 16 classes prioritárias para sua avaliação (GÖBEL, DIERKES, COLDEWEY, 2007; ZHU et al., 2004; ARYAL et al., 2010).

2.1.3.2 Benefícios do aproveitamento de água de chuva captada em solo

As vantagens obtidas pelos sistemas de aproveitamento de águas de chuva, em áreas de tráfego como estradas e estacionamentos, são observadas em níveis urbanos e particulares.

De acordo com Botelho (2011), a concepção de um assentamento urbano deve levar em consideração quatro aspectos principais: A topografia da área, sua geologia, o traçado das ruas e o sistema pluvial. Quando as cidades não são devidamente planejadas, a água de chuva, infelizmente, representa problemas em toda a cidade. Surgem problemas de erosão nos terrenos, inundações, fissuras no pavimento, além de todo o custo social para a comunidade. Ainda, em muitos casos, se deve retificar o curso dos rios, espalhando-se rapidamente superfícies impermeáveis.

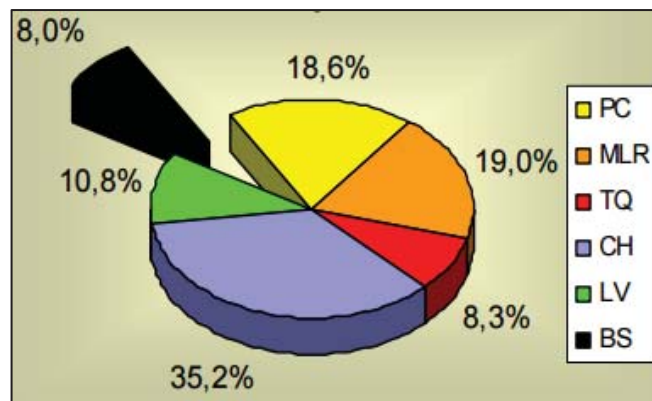
A implementação de sistemas de aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas pode controlar os problemas acima mencionados, proporcionando maior segurança à população. Uma vez que estas superfícies são facilmente encontradas dentro da cidade, há mais oportunidades para coletar volumes elevados, o que representa maior oferta de água.

O gerenciamento integral das águas de chuva é relativamente fácil em climas moderados, mas pode ser ainda mais importante em climas áridos. Ao nível de abastecimento, os sistemas de aproveitamento de água de chuva são uma fonte acessível e de baixo custo. Ao nível urbano, o tratamento dessas águas simula uma técnica de controle de poluição das águas superficiais e melhora a qualidade das fontes de água potável (PNUMA, 2008).

Sem dúvida, um dos benefícios mais representativas da utilização da água da chuva, não importa qual seja a sua área de captação, é diminuir o consumo de água potável. O estudo proposto por Herrmann e Schmida (2000) na Alemanha, considera um consumo diário entre 100 e 145 litros por pessoa e uma capacidade do tanque de armazenamento de água da chuva entre 4 e 6 m³, com uma coleta feita no telhado de uma residência. Os seus resultados mostraram que a economia média da água potável pode estar compreendida entre 30 e 60%, dependendo dos hábitos de consumo e a área disponível para capturar a água. Enquanto isso, um estudo realizado por Ghisi, Montibeller e Schmidt (2006) em 62 cidades do Estado de Santa Catarina, Brasil, mostrou que a economia média de água pode variar de 34% a 92%, dependendo da demanda existente.

Dado que ao nível urbano se tem um maior número de áreas para a coleta de água de chuva, as suas vantagens podem ser mais elevadas. Fiori (2005) fez um perfil de geração de água cinza e água negra na cidade de Passo Fundo, com uma amostra final de 512 apartamentos. A Figura 4 apresenta o perfil para uma tipologia de apartamento frequente de acordo aos aparelhos achados no local de pesquisa.

Figura 4 - Perfil de geração de água de cinza e água negra em um apartamento típico na cidade de Passo Fundo



PC – Pia da cozinha; MLR – Máquina de lavar roupa; TQ – Tanque; CH – Chuveiro; LV – Lavatório; BS – Bacia Sanitária.

Fonte: Adaptado de Fiori (2005).

Embora o perfil seja de água cinza e negra, os dados mostram que adaptar um sistema de aproveitamento de águas de chuva com coleta em áreas urbanas representa uma opção muito atraente. Na descarga das bacias sanitárias, na lavagem de roupas e no tanque se poderia economizar cerca de 35,3% de água potável por dia, usando um tipo de água que não precisa de um tratamento sofisticado para ser utilizada. Assim, segundo Fiori (2005) só na descarga de bacias sanitárias poder-se-ia economizar 621 L durante uma semana em cada unidade habitacional.

2.1.4 Diretrizes de avaliação da qualidade de água de chuva

Para definir os critérios de qualidade da água que devem atingir os sistemas de aproveitamento de água de chuva, se deve começar por estabelecer se os usos têm fins potáveis ou não-potáveis.

A OMS (2011) considera a água de chuva como fonte alternativa de água potável, mas suas diretrizes estão focadas na utilização de coberturas como áreas de coleta, a fim de reduzir os riscos para a saúde por causa dos materiais que podem contaminar a superfície. Ao nível nacional, os padrões de potabilidade da água para consumo humano são descritos na Portaria Nº 2.914, de 12 de Dezembro de 2011 do Ministério de Saúde no artigo 27. A normativa traz quinze anexos nos quais são descritos os padrões organolépticos e microbiológicos a atingir, as concentrações máximas de substâncias químicas que representam risco à saúde (inorgânicas, orgânicas, agrotóxicos), a frequência de monitoramento e amostragem para determinar tais parâmetros, entre outros relativos aos processos utilizados para desinfecção.

No caso dos fins não potáveis, a NBR 15527 de 2007 fornece a regulamentação para a implementação de sistemas de aproveitamento de água de chuva. É importante ressaltar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007, p. 1) conceitua água de chuva como “a água resultante de precipitações atmosféricas coletada em coberturas, telhados, onde não haja circulação de pessoas, veículos ou animais”, por isso não poderia ser inteiramente aplicável às captações feitas no solo. No entanto, o PNUMA (2008) considera como fontes alternativas de água, os sistemas de aproveitamento de água de chuva cujos escoamentos são derivados de telhados, pavimentos, calçadas, estacionamentos e estradas, depois do tratamento com meios filtrantes, *bioswales* e *wetlands* construídas.

A NBR 15527 contém os parâmetros de qualidades da água de chuva para usos restritivos não potáveis, no entanto, estabelece que o projetista é quem define os padrões de qualidade a seguir, além dos tratamentos para desinfecção (ABNT, 2007).

Dentro do manual Conservação e reúso da água em edificações, feito pela Agência Nacional de Águas - ANA, o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo - SindusCon-SP e a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo – FIESP, Sautchuk et al. (2005, p. 12), definem a água pluvial em uma edificação como a “água que provém diretamente da chuva, captada após o escoamento por áreas de cobertura, telhados ou grandes superfícies impermeáveis”. Para água de reúso de classe 1, os usos preponderantes são a descarga de bacias sanitárias, atividades de lavagem, incluindo pisos, veículos e roupas, e fins ornamentais. Se devem avaliar os parâmetros de pH, turbidez, óleos e graxas, fósforo total, coliformes termotolerantes, entre outros.

Nos Estados Unidos, um dos estados de maior destaque na conservação dos recursos hídricos é o de São Francisco (2012) que projetou um guia para a coleta, tratamento e utilização da água, em empreendimentos residenciais multifamiliares, comerciais e de uso misto, cujas aplicações são:

- a) descarga de bacias sanitárias;
- b) irrigação;
- c) refrigeração ou aquecimento;
- d) água de processo;
- e) funções de controle de poeira e compactação do solo;
- f) fontes decorativas e
- g) lavagem de roupas (apenas no caso de utilizar a água da chuva coletada em telhados).

A Tabela 1 apresenta os limites de qualidade da água, quando a água de chuva é coletada em áreas de tráfego urbano.

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade de água de chuva coletada em áreas de tráfego urbano utilizados no Estado de São Francisco, Estados Unidos.

Parâmetro	Média
Coliformes (UFC.100 mL ⁻¹)	100 (<i>E. coli</i>)
Turbidez (uT)	10
DBOC ₅ (mg.L ⁻¹)	n/a
SST (mg.L ⁻¹)	n/a
pH	n/a
Cloro residual (mg.L ⁻¹)	0,5 – 2,5
Odor	Não desagradável
É necessário o teste de COV?	Sim

UFC: Unidade de formação de colônias. uT: Unidades Nefelométricas de Turbidez. DBOC: Demanda bioquímica de oxigênio carbonáceo. SST: Sólidos suspensos totais. COV: Compostos orgânicos voláteis. n/a: Não aplicável.

Fonte: São Francisco (2012).

Nolde (2007) comparou seus resultados de caracterização de águas de chuva com as regras alemãs de utilização dessas águas, determinadas pelo Instituto Alemão de Normalização (DIN por sua sigla em alemão), que prioriza o uso de áreas de captação, tais como telhados, mas não exclui as outras possíveis áreas. A Tabela 2 apresenta alguns dos parâmetros físico-químicos e higiênico-microbiológicos avaliados pelo autor, com padrões de referência da normativa alemã.

Tabela 2 - Valor máximo, mínimo e médio de parâmetros físico-químicos e microbiológicos trabalhados na Alemanha.

Parâmetro	Valor após o tratamento			Padrão de referência
	Máximo	Mínimo	Média	
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)*	199,00	60,00	103,38	-
COT (mg.L ⁻¹)*	5,30	1,26	2,49	-
DBO ₇ (mg.L ⁻¹)*	3,00	0,59	0,86	Máximo de 5 mg.L ⁻¹
DQO (mg.L ⁻¹)*	15,80	4,56	6,82	-
<i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)**	-	-	0,04	Limite de Detecção de 0,03UFC.mL ⁻¹
NO ₂ -N (mg.L ⁻¹)*	0,131	0,006	0,063	-
NO ₃ -N (mg.L ⁻¹)*	3,512	0,364	1,726	-
CaCO ₃ (mg.L ⁻¹)**	-	-	15,71	-

* Amostras do efluente do filtro biológico. ** Amostras do efluente do reservatório.

Fonte: Adaptado de Nolde (2007).

O autor salienta que após o tratamento indicado, pode-se obter água de serviço de alta qualidade para seu uso na descarga de bacias sanitárias e atividades de lavanderia, além de que o tratamento da água da chuva está mais à frente dos padrões alemães.

As diretrizes e normativas para o reúso de águas, geralmente incluem a utilização da água de chuva dentro dessas fontes alternativas. As normas mais representativas para a reutilização de água dos estados membros da União Europeia pertencem aos países de Chipre, França, Grécia, Itália, Portugal e Espanha. Os ministérios de agricultura, energia, sustentabilidade, ambiente e saúde são as instituições emissoras dessas diretrizes (COMISSÃO EUROPEIA, 2014).

O relatório da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, EPA (2004) propõe valores para o tratamento de água reciclada e suas principais aplicações são para irrigação recreativa e paisagística, proteção contra incêndio e descarga de bacias sanitárias. O Departamento de Meio Ambiente e Meio Rural e Marinho da Espanha, MARM (2007) por sua sigla em espanhol, oferece orientações para três diferentes cenários onde as águas residuais, após o tratamento, podem ser usadas. Os parâmetros definidos pelo Departamento de Ambiente e Conservação da Nova Gales do Sul, DEC-NSW (2010) por sua sigla em inglês, são específicos para o uso de águas de escoamento pluvial e considera usos como rega de jardins, lavagem de automóveis e descarga de bacias sanitárias.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (2005) propõe a classificação dos corpos de água superficiais, diferenciando águas doces, águas salinas e águas salobras. Para águas doces se têm quatro subcategorias, definidas como Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4. Essa classificação é de acordo aos usos preponderantes do corpo de água, dentro dos quais está o abastecimento para consumo humano, a proteção de espécies aquáticas, irrigação agrícola, não-agrícola e navegação. Com isso, a normativa permite avaliar a qualidade dos escoamentos de água de chuva, para uso urbano e para o controle da poluição que atinge os rios.

2.1.5 Legislação para a coleta da água de chuva

As leis estaduais e federais que envolvem o uso de águas de chuva evoluíram gradualmente para regular, não só a disposição adequada na rede de drenagem, mas também o seu uso local.

No estado do Rio Grande do Sul, o Decreto nº 23.430, de 24 de outubro de 1974, aprova o regulamento que dispõe sobre a promoção, proteção e recuperação da saúde pública. No geral,

o decreto é responsável por regular as obrigações do Estado ao nível de saúde pública, individual e coletivamente. De acordo com isto, ao longo da Seção II correspondente a Saneamento Básico, o decreto é claro em afirmar que as instalações prediais de esgoto sanitário junto com os tanques sépticos, não podem receber a água de chuva. Além disso, existem especificações sobre materiais, distâncias e equipamentos, em relação ao escoamento das águas de chuva (RIO GRANDE DO SUL, 1974).

O Código Civil com a Lei nº 10.406/10 de Janeiro de 2002, ainda não especificou um uso direto da água de chuva. No entanto, a Seção V, Das Águas, dá especificações sobre a gestão das águas que fluem naturalmente entre prédios. É permitida a construção de canais, barragens, açudes ou obras de represamento de água, desde que os possíveis efeitos sobre edifícios vizinhos sejam planejados (BRASIL, 2002).

Na NBR 15527 de 2007, são estipulados requisitos para a utilização da água da chuva em áreas urbanas com fins não potáveis. No seu escopo deixa claro que, após do tratamento adequado, a água poderia ser direcionada para a descarga de sanitários, irrigação, lavagem de carros, atividades de limpeza, espelhos d'água e aplicações industriais. Assim, para as calhas, condutores, e o reservatório, algumas recomendações operacionais e de instalação são fornecidas e também se especificam as normas da ABNT que cada elemento deve atender. Para o manuseio dentro da residência, esclarece que a distribuição de água de chuva deve ser independente da rede de água potável e os pontos de consumo devem estar identificados, alertando o uso não potável (ABNT, 2007).

Além dessas especificações técnicas, existem alguns regulamentos estaduais e municipais para exigir o uso de água de chuva com diferentes fins, tais como o controle de inundações e a redução da velocidade do escoamento dessas águas.

No Estado de São Paulo é obrigatória a implantação de sistemas de aproveitamento de água de chuva em lotes que tenham uma área impermeabilizada superior a 500 m². Os objetivos principais são reduzir a velocidade de escoamento de águas pluviais, controlar a ocorrência de inundações e contribuir para a redução do consumo de água potável (SÃO PAULO, 2007).

A partir da aprovação do projeto de lei complementar N° 1.231 de 2013, todas as novas edificações, residenciais e comerciais no município de Florianópolis, com área acima dos 200 m², deverão captar água de chuva de forma obrigatória. Essa água poderá ser utilizada em atividades que não exijam sua potabilidade, tais como regar jardins ou na descarga de bacias sanitárias, após do devido tratamento sanitário (CÂMARA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS, 2016).

Por sua vez, o decreto 293 de 2006 que regulamenta a lei N° 10.783 de 2003, obriga aos empreendedores da cidade de Curitiba à implantação de sistemas de captação de águas de chuva dentro do projeto de instalações hidráulicas, para a obtenção da licença de construção. A área de captação estipulada são as coberturas das edificações para atividades que não exijam o uso de água tratada (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2006).

No ano 2008 foi criado o Programa Uso Racional da Água no município de Passo Fundo, regulamentado através da lei complementar N° 198 de 17 de janeiro de 2008. Com ele, a água de chuva é considerada como uma fonte alternativa que pode ser captada, armazenada e utilizada. Para a obtenção de licença de construção, os novos empreendimentos estão obrigados a apresentar o projeto de construção do reservatório para a coleta e armazenamento dessa água, a ser utilizada em atividades que não requerem uso de água tratada (PREFEITURA MUNICIPAL DE PASSO FUNDO, 2008).

Países como a Alemanha, Coréia, Japão e os Estados Unidos, além de fornecer ajuda financeira na implantação dos sistemas de aproveitamento de água de chuva, possuem padrões de qualidade para diferentes usos, visando garantir uma utilização segura das fontes alternativas de água (NOLDE, 2007; FURUMAI, 2008; NATIONAL CONFERENCE OF STATE LEGISLATURES, 2013; KIM, LEE, KIM, 2005).

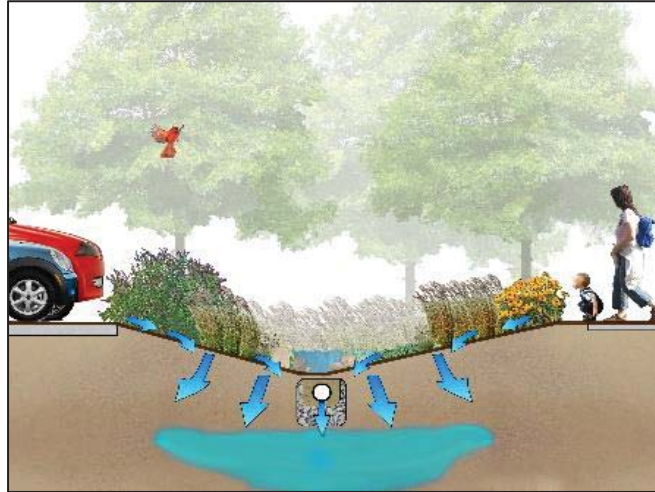
2.2 Técnicas para o tratamento de escoamentos de água de chuva

As técnicas mais comuns para o tratamento dos escoamentos de água de chuva são conhecidas como *best management practices* (BMP). De acordo com Walter, Steenhuis e Haith (1979), inicialmente foram implantadas para reduzir a erosão dos solos, mas seu uso foi estendido para reduzir a carga poluidora que atinge as bacias hidrográficas. Dentro das BMPs existem: Canais de vegetação (*bioswales*), faixas de filtros vegetais (*vegetative filter strips*), meios filtrantes, *wetlands* construídas, trincheiras de infiltração e sistemas de biorretenção (ANDERSON et al., 2016; REDDY, XIE, DASTGHEIBI, 2014c; TROWSDALE, SIMCOCK, 2011; YU, YU, XU, 2013).

Os *bioswales* são canais de vegetação, abertos, projetados especificamente para tratar o escoamento de águas pluviais para um volume de água definido. Ao longo do caminho, promovem a desaceleração, limpeza e infiltração da água de chuva. A Figura 5, mostra um tipo de *bioswale*, também conhecidos como *grasses swales* (gramados). Anderson et al. (2016) testaram o desempenho das bioswales no tratamento de escoamentos de água de chuva derivados de áreas de estacionamento. Os autores observaram eficiências de 81% na remoção

de sólidos suspensos e metais, 82% para a redução das concentrações de hidrocarbonetos e 74% na remoção de pesticidas.

Figura 5 - Esquema geral de uma *Bioswale*.



Fonte: Samper (2013).

As *wetlands* construídas, ilustradas na Figura 6, são capazes de remover materiais contaminantes do escoamento em pavimentos. Elas são geralmente localizadas do lado das calçadas (*right-of-way*) ou de estacionamentos. A água da chuva flui através do pavimento para alcançar a *wetland* construída, transportando contaminantes, tais como óleos, fertilizantes e pesticidas. O uso de plantas nativas reduz a carga poluente, o que facilita o processo de filtração. Finalmente, a água coletada carrega os lençóis freáticos e reduz a quantidade de água necessária para a irrigação desse espaço (HOGAN, 2011).

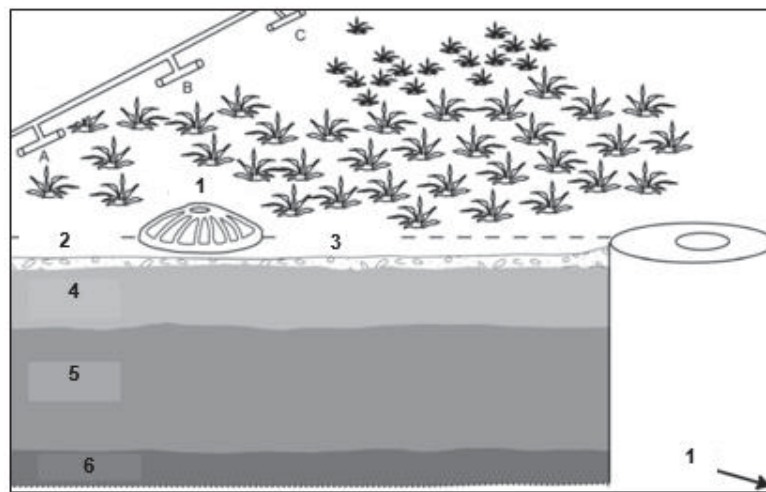
Figura 6 - *Wetland* construída em Portland, Oregon, Estados Unidos.



Fonte: Church (2015).

Segundo Trowsdale e Simcock (2011), os sistemas de biorretenção, também conhecidos como *raingardens*, filtram águas pluviais poluídas através de plantas e solos biologicamente ativos, removendo assim os contaminantes da água. Como técnica BMP, também contribui para o gerenciamento das vazões de água de chuva, o volume de escoamento e a manutenção da recarga de aquíferos subterrâneos. Na Figura 7 se observa um sistema de biorretenção, implantado na cidade de Auckland, Nova Zelândia, instalado no ano 2006 para o tratamento de escoamentos derivados de uma autoestrada.

Figura 7 - Sistema de biorretenção, implantado em Auckland, Nova Zelândia.



1 – Escoamento de excesso; 2 – Húmus (50mm); 3 – Profundidade para acumulação; 4 – Solo superior (300-400mm); 5 – Subsolo (600-700mm); 6 – Areia (150mm).

Fonte: Trowsdale e Simcock (2011).

Os meios filtrantes caracterizam-se pela simplicidade, as propriedades hidráulicas e a eficiência na remoção de nutrientes, SST e metais comuns encontrados nos escoamentos de água de chuva. Esses sistemas podem ser compostos de uma larga variedade de materiais tais como areia, brita, zeólita, calcita, limalha de ferro e carvão ativado. Segundo o material utilizado, podem-se atingir remoções entre o 95% e 100% de metais como Cd, Cu, Pb e Zn (REDDY; XIE; DASTGHEIBI, 2014a, 2014c).

Cada técnica se destaca na remoção de contaminantes específicos dos escoamentos de água de chuva. A sua seleção corresponde à importância no entorno, seja para proteger o ambiente aquático e/ou a saúde humana. Além de sua capacidade de remoção, deve atingir as características de custo-benefício (YU; YU; XU, 2013).

2.3 Processos de separação por membranas

O tratamento de água envolve a avaliação das características físicas, químicas, biológicas e microbiológicas, a fim de cumprir os parâmetros de qualidade de acordo com o seu destino final. Entre as técnicas de tratamento destaca-se os sistemas convencionais, abrandamento, troca iônica e separação por membranas, às vezes combinando suas funções de acordo com as necessidades da sua aplicação (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Basicamente, os processos de separação de membrana funcionam através de uma barreira entre duas fases, o que restringe total ou parcialmente o transporte dos componentes existentes em cada uma delas. O fluxo conduzido através das membranas é em paralelo, resultando uma corrente com os contaminantes removidos, chamada permeado e outro produto contendo a maioria do material contaminante, chamado concentrado (SCOTT, 1998). A Figura 8 apresenta uma visão geral da operação dos processos de separação por membrana.

Figura 8 - Esquema geral da operação dos processos de separação por membrana.



Fonte: Mierzwa e Hespanhol (2005).

No geral, as membranas podem ser classificadas de acordo com a sua morfologia. Segundo Habert, Borges e Nobrega (2006), existem duas classificações relativas ao transporte do influente: Membranas densas e membranas porosas. No primeiro caso, há um processo de difusão ou dissolução com o material da membrana e no segundo caso, o passo do permeante é realizado numa fase fluida, preenchendo os poros da membrana. Por sua vez, se há uma alteração na densidade do material através da seção transversal da membrana, ela é anisotrópica e no caso contrário, isotrópica.

Comercialmente são reconhecidos diferentes processos de separação por membranas, cujas características principais estão resumidas no Quadro 3.

Para o tratamento de águas, normalmente são reconhecidas quatro grandes categorias de processos de separação por membranas: Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose Reversa (OR). As membranas separam partículas sólidas, moléculas e em alguns casos, compostos iônicos dissolvidos através de uma força motriz que

pode ser um gradiente de pressão hidráulico ou um campo eléctrico (WAGNER, 2001; MIERZWA, HESPANHOL, 2005).

Quadro 3 - Processos de separação por membranas comerciais.

Processo	Força Motriz	Aplicações
Microfiltração (MF)	ΔP (0,4 – 2 atm)	Esterilização bacteriana; clarificação vinhos e cervejas; concentração de células; oxigenação de sangue.
Ultrafiltração (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Fracionamento/concentração de proteínas, recuperação de pigmentos/óleos.
Nanofiltração (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Purificação de enzimas; biorreatores a membrana.
Osmose Reversa (OR)	ΔP (15 – 80 atm)	Dessalinização de águas; concentração de suco de frutas; desmineralização de águas.
Diálise (D)	ΔC	Hemodiálise; recuperação de NaOH.
Eletrodiálise (ED)	ΔE	Concentração de soluções salinas; purificação de águas.
Permeação de Gases (PG)	$\Delta P \rightarrow \Delta C$	Recuperação de hidrogénio; separação de CO_2/CH_4 .
Pervaporação (PV)	Pressão de vapor	Desidratação de álcoois; eliminação de VOC da água.

Fonte: Adaptado de Habert, Borges e Nobrega (2006).

As membranas de MF filtram partículas de tamanho micro e submicro em líquidos e gases. Enquanto isso, membranas de UF, removem macromoléculas e coloides de líquidos que contenham espécies iónicas. Para separar compostos orgânicos de menor tamanho e sais seleccionados a partir de soluções, é comum o uso de membranas de NF, enquanto as membranas de OR eliminam virtualmente qualquer material suspenso ou dissolvido, em água e outros solventes (SCOTT, 1998).

Ao contrário do tratamento de água convencional, uma das grandes vantagens da utilização de membranas é que, em princípio, a água pode ser tratada em uma única etapa, sem a necessidade de químicos ou outras ferramentas. Por sua vez, a maior limitação é a colmatação que pode ocorrer na seção transversal. Quando são usadas membranas de OR ou NF, é sugerida a implementação de um pré-tratamento e a operação com fluxo cruzado. No entanto, quando são usadas membranas de MF e UF, se pode implementar uma retrolavagem ou limpeza

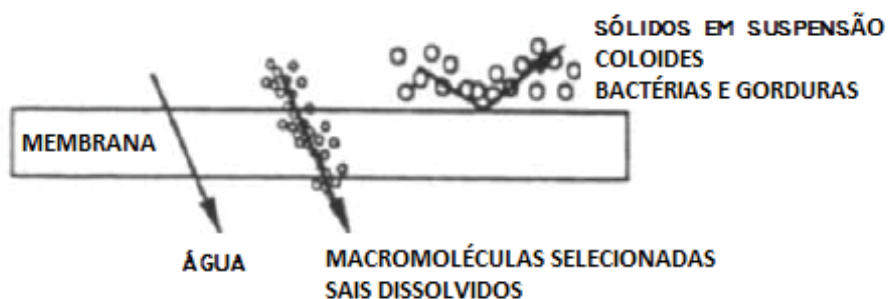
química, apresentando uma grande vantagem em termos de custos de operação e uso de energia do sistema (PETER-VARBANETS et al. 2009).

2.3.1 Microfiltração

O processo de separação por membranas por microfiltração, trabalha basicamente sob os princípios da filtração. Principalmente, os sólidos suspensos são removidos e tanto o solvente e todo o material solúvel, permeia a membrana. No entanto, também são removidos coloides e metais dissolvidos em soluções diluídas. Dos quatro maiores tipos de processos de separação por membranas, a microfiltração tem o maior diâmetro dos poros, portanto não necessita de alta pressão (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006; MIERZWA, HESPANHOL, 2005).

Neste processo, as partículas com diâmetros compreendidos entre 0,1 a 10 μm são retidas, de modo que a sua estrutura tem poros do mesmo tamanho, utilizando pressões geralmente entre 0,1 e 2 bar. Na Figura 9, se observa a capacidade de separação das membranas de MF.

Figura 9 - Capacidade de separação das membranas de Microfiltração.



Fonte: Adaptado de Scott (1998).

As membranas de MF podem ser isotrópicas ou anisotrópicas e, por sua vez, podem ser de diferentes materiais como cerâmica e polímeros termoplásticos, tais como polisulfona e polivinilideno. Os filtros para membranas de MF são feitos normalmente com um tamanho de poro uniforme e uma densidade de poros de 80%, o que significa uma resistência hidrodinâmica relativamente baixa (WAGNER, 2001; SCOTT, 1998).

O fluxo J , através da membrana, é proporcional à diferença de pressão aplicada ΔP , à resistência da membrana para o passo do fluido, entendida como permeabilidade K , e inversamente proporcional à resistência associada com o material particulado retido,

representada pela viscosidade μ , tal como é mostrado na Equação 1 (STRATHMANN, 1981; SCOTT, 1998).

$$J = \frac{K \Delta P}{\mu} \quad (1)$$

A microfiltração pode remover impurezas tais como partículas, bactérias e vírus, de uma solução contendo um solvente e microsolutos permeando livremente a membrana. As aplicações típicas são desenvolvidas na esterilização de líquidos e gases em indústrias químicas, biológicas, farmacêuticas e de alimentos; purificação e filtração estéril de soluções termo-sensíveis e bebidas; produção de água pura e tratamento de esgoto (STRATHMANN, 1981; SCOTT, 1998).

Embora exemplos de membranas MF são focados em aplicações microbiológicas e clínicas, industrialmente o uso mais proeminente é na produção de água ultrapura para a indústria eletrônica. A água de enxágue utilizada para circuitos integrados pode conter impurezas iônicas e partículas que prejudicam o rendimento de produção dos componentes eletrônicos, bloqueando ou dispersando a luz durante os procedimentos de exposição ou formação de imagens (SCOTT, 1998; STRATHMANN, 1981).

De acordo com Sobsey (2002 apud PETER-VARBANETS et al., 2009) a microfiltração com membranas cerâmicas está dentro das poucas tecnologias de membrana recomendadas pela Organização Mundial da Saúde e aplicada nos países em desenvolvimento, para o tratamento de fontes de água natural como lagos e rios. Dentro dos sistemas descentralizados para tratamento de água potável, destaca-se os sistemas POU (point-of-use) que são responsáveis por tratar apenas a quantidade de água usada para beber. Atualmente, existem sistemas portáteis de membranas cerâmicas com um tamanho de poro de 0,2 μm , o que pode ser operado por gravidade ou por bombeamento manual. Estes podem ser usados em águas turvas ou com matéria orgânica, mas têm uma vida útil limitada entre 20.000 - 100.000 L de água filtrada (PETER-VARBANETS et al., 2009).

Estudos mais recentes têm investigado o desempenho de nanofibras poliméricas no âmbito dos sistemas de microfiltração, produzidas através de fiação eletrostática ou *electrospinning*. No estudo de Dobrowsky et al. (2015) foram utilizadas membranas com o material referido, em dois ensaios: O primeiro usando adicionalmente uma coluna de carvão ativado e o segundo, utilizando discos de nanofibras contendo grupos de amônio quaternário. A amostragem foi realizada em tanques de armazenamento de água de chuva e em águas

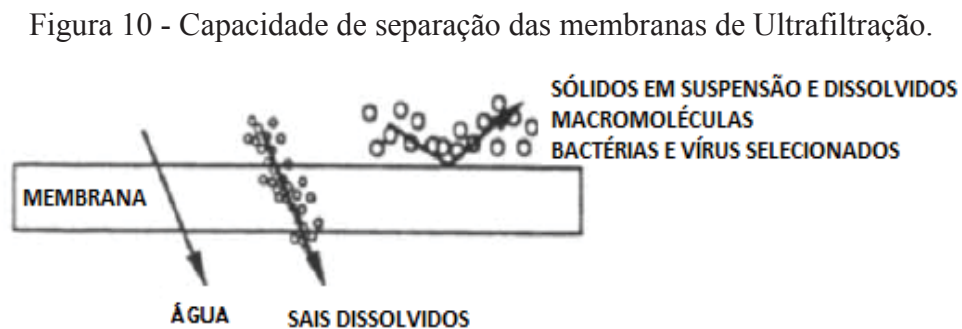
superficiais do Rio Plankenburg, Stellenbosch, África do Sul. Os resultados demonstraram que, através do sistema membrana de nanofibras/coluna de carvão ativado, podem ser produzidos 3L de água potável, uma vez que as quantidades de *E. coli*, coliformes totais e número de bactérias heterotróficas estão dentro das diretrizes de água potável de África do Sul. No entanto, de acordo com os autores, devem ser realizados métodos moleculares para analisar a eficiência do sistema, uma vez que foi detectada a presença de bactérias potencialmente patogénicas, tais como *Legionella spp.* e *Klebsiella spp.*, e o vírus, adenovírus, através de testes de reação em cadeia da polimerase – PCR.

2.3.2 Ultrafiltração

O princípio de funcionamento da microfiltração, ultrafiltração e osmose reversa é a separação de partículas através de uma membrana; a diferença entre cada processo é o tamanho dessas partículas. Na UF as membranas possuem poros com um diâmetro que pode variar entre 0,2 para 0,02 μm , de modo que apenas as partículas de um tamanho e um peso específico são filtradas, além de soluções contendo solutos numa ampla faixa de massa molar (10^3 - 10^6 Dalton). Substâncias como sais e água podem passar livremente (SCOTT, 1998).

A tecnologia de UF é uma opção viável para remover bactérias, protozoários e vírus da água superficial, resultando em elevadas reduções microbianas de 7 log de bactérias coliformes, entre 4,4 – 7 log de redução para *Cryptosporidium* e *Giardia lamblia* e 6 log para vírus como bacteriófago MS2 (LECHEVALLIER; AU, 2004).

Com a utilização de membranas de UF pode ser conseguida a remoção substancial de vírus com um tamanho entre 30 e 300 nm (PETER-VARBANETS et al., 2009). A Figura 10 apresenta a capacidade de separação das membranas de UF.

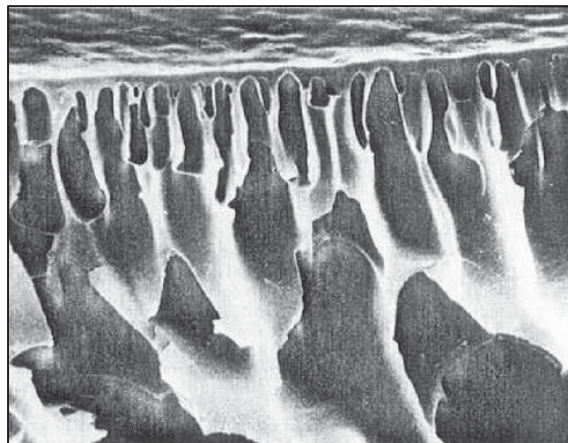


Fonte: Adaptado de Scott (1998).

Uma vez que as membranas de ultrafiltração são mais fechadas em comparação com as de microfiltração, a sua utilização é mais diversificada. No caso de ter solutos macromoleculares concentrados em soluções diluídas, tais como enzimas ou proteínas, o material retido é geralmente recuperado e o filtrado é muitas vezes descartado (STRATHMANN, 1981).

A seção típica de uma membrana de ultrafiltração é anisotrópica, caracterizada por a espessura fina da superfície que varia de 0,1 a 1 μm e uma subestrutura com poros mais abertos com uma espessura típica de 125 μm . Este sistema proporciona alta permeabilidade hidráulica e bom suporte mecânico, respectivamente. Uma vez que a pressão osmótica da solução de alimentação é insignificante, geralmente pressões de trabalho entre 1 e 5 bar são usadas (PORTER, 1990; STRATHMANN, 1981). A Figura 11 mostra em maior detalhe a configuração das membranas de UF.

Figura 11 - Fotomicrografia da seção transversal de uma membrana de UF anisotrópica.



Fonte: Porter (1990).

O desempenho das membranas de UF é definido de acordo com a sua retenção nominal, isto é, o valor da massa molar para a qual a membrana apresenta um coeficiente de rejeição de 95%. Este coeficiente de rejeição R , é calculado de acordo com a Equação 2, em que C_p e C_f são as concentrações do soluto no permeado e na alimentação, respectivamente. O valor de R varia entre 0 e 1, o que depende das condições de operação, a velocidade do fluxo, a massa do soluto, entre outros fatores (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006; SCOTT, 1998).

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2)$$

Os materiais das membranas de UF são variados. Inicialmente, foram utilizados polímeros sintéticos, tais como acetato de celulose e polieletrólitos. No entanto, atualmente existe uma ampla variedade de polímeros sintéticos, química e termicamente estáveis, incluindo cloreto de polivinilo (PVC), poliacrilonitrilo (PAN), policarbonato (PC), alifáticos e poliamidas aromáticas (PA). Também existem membranas inorgânicas feitas de óxido de zircônio e de alumínio (PORTER, 1990).

Como foi mencionado acima, as membranas de UF permitem purificar e coletar ambos o material fluido que passa através da membrana, e o material retido. As aplicações mais comuns são o fracionamento ou concentração de proteínas e a recuperação de pigmentos ou óleos. Em grande escala, a UF é usada para o tratamento de efluentes industriais e águas de processo; para a concentração, purificação e separação de soluções macromoleculares em indústrias químicas, alimentícias e farmacêuticas. Também é usada na produção de água ultrapura (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006; STRATHMANN, 1981).

Desde o início, a aplicação de membranas de UF foi focada no tratamento de efluentes industriais. Na indústria de processamento de metais, há vários exemplos. As emulsões óleo-água são normalmente utilizadas para a lubrificação e a refrigeração de ferramentas. Antes do processamento adicional, o metal é enxaguado com água para remover vestígios de óleo. Neste caso, a utilização de membranas de UF permite recuperar uma emulsão concentrada de cerca de 5 - 10% de óleo, que pode ser reutilizado diretamente nas peças de metal, como a água permeada em um novo processo de lavagem (STRATHMANN, 1981).

Com as vantagens da UF no processo de microfiltração, em relação às substâncias removidas e respeito à osmose reversa, quanto à pressão de trabalho a ser utilizada, suas aplicações foram prorrogadas até mesmo o tratamento de água para fins potáveis. Em Moçambique, África se está conduzindo o projeto AQUAPOT, liderado pela Universidade Politécnica de Valência, Espanha, a fim de fornecer água potável através de um sistema de distribuição descentralizado, em uma vila de 10.000 habitantes (ARNAL et al., 2010).

O sistema inicia-se com um pré-tratamento com um filtro de areia de 150 μm e de um microfiltro de 25 μm . A água passa então através de duas membranas de UF feitas de polisulfona, com uma retenção nominal de 100 kDa. Os autores fizeram a avaliação do sistema, depois de seis meses de trabalho, observando que, do ponto de vista da permeabilidade da membrana, o desempenho era satisfatório, possivelmente pela manutenção apropriada e a limpeza de filtros e membranas. Quanto à qualidade da água, de 18 amostras coletadas, em 3 a presença de coliformes totais foi confirmada, assim que os autores demonstraram que um

processo de pós-cloração era necessário antes de distribuir a água, para garantir boas condições microbiológicas (ARNAL et al., 2010).

A aplicação de membranas de UF foi também estudada ao nível de tratamento de água de chuva. Liaw et al. (2009) avaliaram a qualidade da água de chuva captada no telhado da Universidade Nacional de Tecnologia de Taipei. Foram coletadas três amostras em dias diferentes, a partir da primeira descarga da chuva a fim de obter as amostras mais contaminadas. A membrana de UF usada, mostrada na Figura 12, tinha um diâmetro de poro de $0,03\ \mu\text{m}$. Antes de ser tratada, a água apresentava uma turbidez de $4,4\ \text{uT}$, colônias totais de $700\ \text{UFC/ml}$ e coliformes totais de $>16\ \text{NMP/100ml}$. No entanto, após do tratamento por UF, a turbidez da água caiu a $1\ \text{uT}$ e não foi detectada a presença de bactérias.

Figura 12 - Membrana de Ultrafiltração usada para tratamento de água de chuva.



Fonte: Liaw et al. (2009).

Miorando (2015) avaliou o tratamento de água de chuva coletada em superfícies de telhado utilizando membranas de UF em dois tipos de materiais: polietersulfona e cerâmica (óxido de zircônia). A autora observa que, em ambos os casos, é possível atender os parâmetros de potabilidade da água de acordo com as normativas brasileiras e europeias, fornecendo uma fonte sustentável para o abastecimento de água às comunidades, sem a necessidade de outro tipo de tratamento adicional.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de estudo

O local de estudo está situado no campus I da Universidade de Passo Fundo, localizado na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

As amostras de água de chuva foram obtidas na área de estacionamento do prédio da Faculdade de Direito, localizado nas coordenadas 28° 13' 33,56" S e 52° 23' 16,48" O, indicadas na Figura 13.

Figura 13 - Localização da área de coleta de água de chuva



Fonte: Google Inc. (2015).

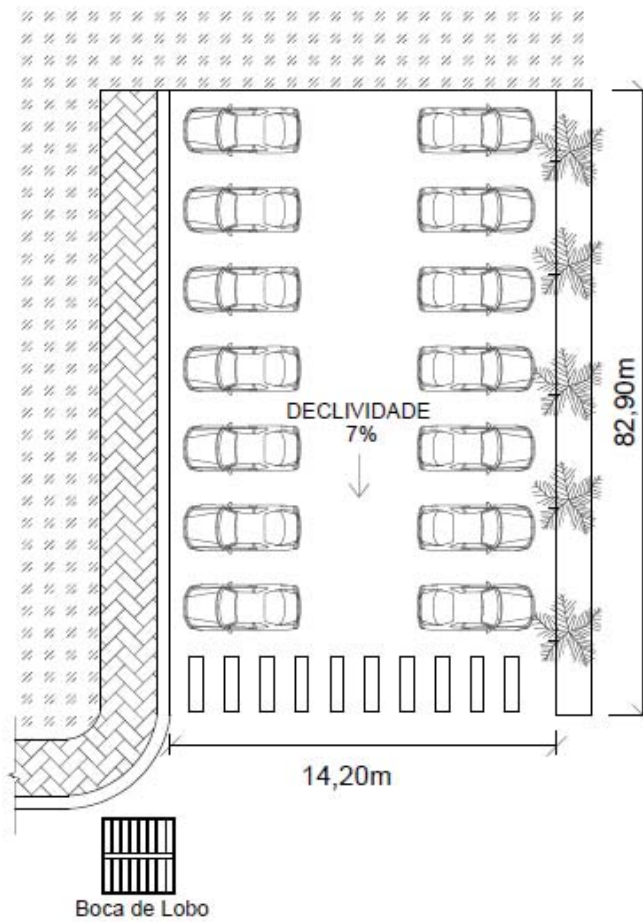
A área é revestida em asfalto e caracteriza-se pelo constante fluxo de tráfego em horas de pico. Na Figura 14 é mostrado o estacionamento e na Figura 15 as dimensões da área de coleta, que tem uma área aproximada de 1177,18 m².

Figura 14 - Estacionamento da Faculdade de Direito da UPF.



Fonte: Próprio autor (2016).

Figura 15 - Esquema da área de coleta.

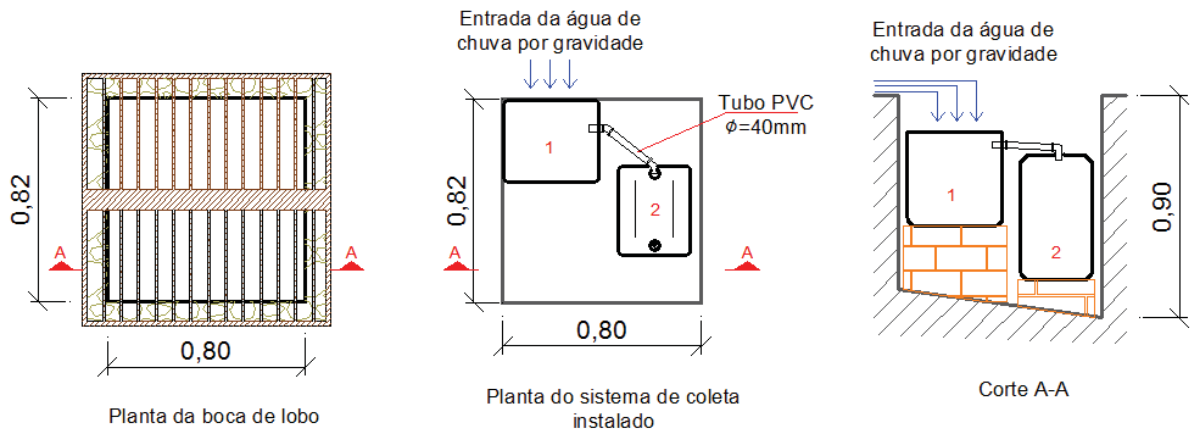


Medidas em metros.
Fonte: Próprio autor (2016).

3.2 Coleta, amostragem e transporte da água de chuva

A coleta de água de chuva foi realizada na boca de lobo da área de captação através de duas bombonas plásticas colocadas no seu interior, que recuperavam o escoamento feito por gravidade. O diagrama do sistema instalado é mostrado na Figura 16. Após de encher a bombona 1 utilizada como tanque sedimentador, o escoamento era dirigido à bombona 2 através de um tubo PVC de 40 mm de diâmetro. O volume dos dois tanques de coleta é aproximadamente 50 litros para cada um. Na Figura 17 é mostrado o sistema já instalado na boca de lobo.

Figura 16 - Diagrama do sistema de coleta situado na boca de lobo.



Medidas em metros.
Fonte: Próprio autor (2016).

Figura 17 - Instalação do sistema para a coleta de água de chuva no estacionamento.



Fonte: Próprio autor (2016).

Para a preservação e técnicas de amostragem foi contemplada a NBR 9898:1987 que faz considerações de manutenção periódica, escolha dos frascos de coleta e cuidados para prevenir a contaminação da amostra.

O transporte das amostras foi motorizado a fim de evitar danos, derramamentos e o risco de contaminação local. Os parâmetros de volume mínimo, preservação e prazo para análise foram determinados segundo as Tabelas 1 e 2 contidas na NBR 9898:1987 para amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.

3.3 Tratamento da água de chuva por MF e UF

Os experimentos foram desenvolvidos numa unidade piloto de filtração submersa para MF e UF disponível no Laboratório de Operações Unitárias da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da UPF, mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Unidade piloto para Microfiltração e Ultrafiltração com membrana submersa.



Fonte: Próprio autor (2016).

A fim de evitar a colmatação prematura das membranas, antes da aplicação dos PSM foram feitos uma sedimentação preliminar e um peneiramento para remoção de sólidos grosseiros como pedras, folhas, insetos e galhos como é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Peneiramento preliminar ao processo de MF e UF.



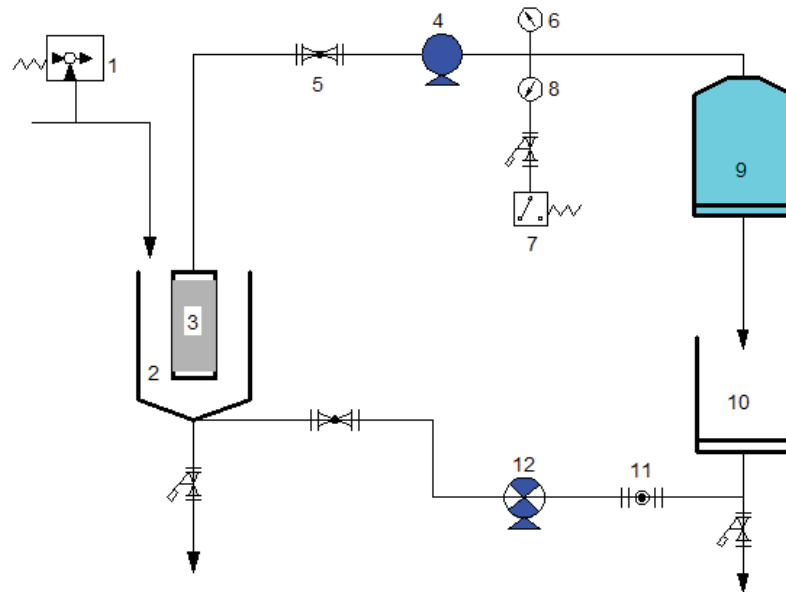
Fonte: Próprio autor (2016).

O tratamento de água de chuva foi realizado através de dois processos de separação por membrana, microfiltração e ultrafiltração, separadamente. As duas membranas são constituídas na configuração de fibra oca – outside/inside, para trabalhar de forma submersa.

A membrana de MF é fabricada em poli imida, possui 0,4 μm de diâmetro de poro, uma área de filtração de 0,12 m^2 e trabalha em configuração submersa. A membrana de UF é fabricada em poli éter sulfona, possui uma retenção nominal de 50 kDa, uma área de filtração de 0,12 m^2 e também trabalha de forma submersa.

O diagrama mostrando a operação geral do equipamento é detalhado na Figura 20. O sistema era acionado através do painel de controle (1), o qual regulava os processos de operação e retrolavado. A água de chuva coletada era alimentada manualmente ao tanque de polipropileno (2) onde foi instalada a membrana (3). O volume alimentado foi medido a fim de obter a taxa de volume recuperado. Uma bomba de vácuo (4) aplicava pressões negativas no sistema, enquanto o vácuo era ajustado para trabalhar de forma constante através da válvula agulha (5). A vazão do permeado era verificada no rotâmetro (6), enquanto a vazão de ar fornecida pelo compressor (7) era controlada por um segundo rotâmetro (8). O permeado era direcionado ao tanque de vácuo (9) e posteriormente enviado ao tanque de disposição final (10). Quando o fluxo decaía 50% do fluxo inicial, o processo de retrolavagem era iniciado utilizando um volume predeterminado do permeado. A válvula esfera (11) era aberta e a bomba centrífuga (12) era acionada para inverter a direção do fluxo, conseguindo a remoção de material suspenso ou coloidal depositado sobre a superfície da membrana.

Figura 20 - Esquema geral de unidade para filtração submersa.



1 – Painel de controle; 2 – Tanque de polipropileno; 3 - Membrana submersa; 4 – Bomba de vácuo;
5 – Válvula agulha; 6 – Rotâmetro para controle de vazão; 7 – Compressor de ar; 8 – Rotâmetro para controle de ar; 9 – Tanque de vácuo; 10 – Tanque para disposição final; 11 – Válvula de esfera; 12 – Bomba centrífuga.

Fonte: Próprio autor (2016).

O arejamento foi utilizado para reduzir a incrustação na membrana. A injeção de ar pode ser útil para um melhor controle de incrustação, sem utilizar pré-tratamentos tais como coagulação, adsorção e peroxidação. Além disso, aeração é considerada como uma técnica eficiente de limpeza, combinada com processos de retrolavado, que pode alcançar altas taxas de recuperação de fluxo (KIM, LEE, KIM, 2005; GAO et al., 2011).

3.4 Delineamento experimental para a aplicação dos tratamentos de MF e UF

A fase experimental com os tratamentos de MF e UF foi desenvolvida em duas etapas: Determinação da membrana e pressão de trabalho e ensaios de longo período com a membrana de melhor desempenho.

Para determinar a pressão e a membrana de trabalho, foram avaliadas duas pressões extremas de 10 e 40 kPa, identificando a sua influência no fluxo do permeado. Cada processo de filtração foi realizado em duas repetições por um tempo de 30 minutos (cada um), sendo no total quatro para MF e quatro para UF. Logo, foi avaliada a qualidade e porcentagem de rejeição para as membranas e pressões trabalhadas, através dos parâmetros de pH, condutividade, cor, turbidez, sólidos sedimentáveis, matéria orgânica e volume recuperado.

Uma vez que a experimentação preliminar não originou grandes diferenças na rejeição de poluentes para as duas membranas, foram feitos ensaios de longo período tanto com a membrana de MF como a de UF, com tempos entre 4,50 e 8 h. Foram avaliados 27 parâmetros de caracterização físico-química e microbiológica mostrados no item 3.5, visando ao uso em atividades não potáveis.

3.5 Caracterização da água de chuva para os ensaios de longo período

A avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos permitiu determinar as concentrações de diferentes materiais contaminantes na água de chuva coletada em solo. Além disso, foi necessária para calcular a rejeição desses contaminantes, segundo o tipo de membrana utilizada. Os parâmetros de avaliação para a caracterização dos ensaios de longo período, assim como os testes que foram realizados segundo a normativa vigente, são descritos no Quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros de avaliação e testes para caracterização da água de chuva.

(continua)

Parâmetro	Norma de referência	Método
Parâmetros físico-químicos		
pH	NBR 14339:1999	Método eletrométrico
Cor	APHA, AWWA, WEF 2120 C: 2000	Espectrofotométrico - Método de comprimento de onda único
Turbidez	APHA, AWWA, WEF 2130: 2001	Método Nefelométrico
Condutividade Elétrica (CE)	NBR 14340:1999	Determinação da condutividade e da resistividade elétrica
Sólidos sedimentáveis (SS)	NBR 10561: 1988	Método do cone Imhoff
Sólidos Suspensos Totais (SST)	NBR 10664:1989	Método gravimétrico
Sólidos Totais (ST)	NBR 10664:1989	Método gravimétrico
Dureza Total	LANARA 1981	Método titulométrico do EDTA
Nitritos (NO ₂ -N)	LANARA 1981	Método colorimétrico
Nitratos (NO ₃ -N)	APHA, AWWA, WEF 4500-NO ₃ D: 2000	Método de íon seletivo
Fósforo Total (TP)	NBR 12772:1992	Determinação de fósforo
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	APHA, AWWA, WEF 4500 – SO ₄ ²⁻ :1997	Método turbidimétrico

Quadro 4 - Parâmetros de avaliação e testes para caracterização da água de chuva.

(continuação)

Parâmetro	Norma de referência	Método
Parâmetros físico-químicos		
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	APHA, AWWA, WEF 2005	Micrométrico através da digestão em refluxo fechado e quantificação fotométrica
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	NBR 12614:1992	Método de incubação (20°C, cinco dias)
Nitrogênio Kjeldahl (NTK)	NBR 13796:1997	Método macro Kjeldahl
Nitrogênio Amoniacal (NH ₃ -N)	APHA, AWWA, WEF 4500-NH ₃ :1997	Método de Fenato
Óleos e graxas	APHA, AWWA, WEF 5520D: 1999	Método de Extração de Soxhlet
Metais pesados (Cd, Cr, Pb, Zn, Ni, Cu, Fe)	APHA, AWWA, WEF 3110:1999	Método de espectrometria de absorção atômica
Hidrocarbonetos	EPA Método 8260C	Análise de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa
Parâmetros microbiológicos		
Coliformes totais	Ministério de Agricultura: Instrução Normativa N° 62, 26 ago. 2003	Número mais provável de Coliformes Totais
Coliformes termotolerantes	Ministério de Agricultura: Instrução Normativa N° 62, 26 ago. 2003	Número mais provável de Coliformes Termotolerantes

Fonte: Próprio autor (2016).

3.6 Determinação dos possíveis usos da água de chuva tratada

O Brasil não possui legislação para regulamentar a utilização da água da chuva coletada em solo. No entanto, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA classifica os corpos de água superficiais segundo os seus usos preponderantes. Os padrões de comparação para fins não potáveis aplicados na pesquisa foram aqueles utilizados ao redor do mundo, por cidades ou organizações governamentais interessadas na utilização de água de reúso para usos urbanos. A avaliação da qualidade do permeado por MF e UF foi realizada através de:

- a) Resolução N° 357, de 17 de março de 2005 do CONAMA que Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

- b) Diretrizes para reuso de água da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA do ano 2004 como guia para aqueles estados que não tem uma regulamentação específica na matéria;
- c) Gerenciamento de águas pluviais urbanas: Coleta e reuso, publicação feita no ano 2006 pelo Departamento de Ambiente e Conservação de Nova Gales do Sul, Austrália.
- d) Real Decreto 1620 de 2007 da Espanha que estabelece o regime jurídico para a reutilização da água tratada.

Depois da revisão e a análise das diferentes fontes de avaliação para atividades com fins não potáveis, foram determinados os possíveis usos da água de chuva coletada em solo em múltiplos cenários urbanos e residenciais.

Além disso, foi estimado o volume que representou cada uma das coletas realizadas através dos dados de precipitação minuto a minuto, registrados pela leitura de um pluviógrafo automático. Tal consideração foi com o objetivo de determinar o consumo diário de água potável per capita que se poderia economizar e para projetar um sistema básico de tratamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

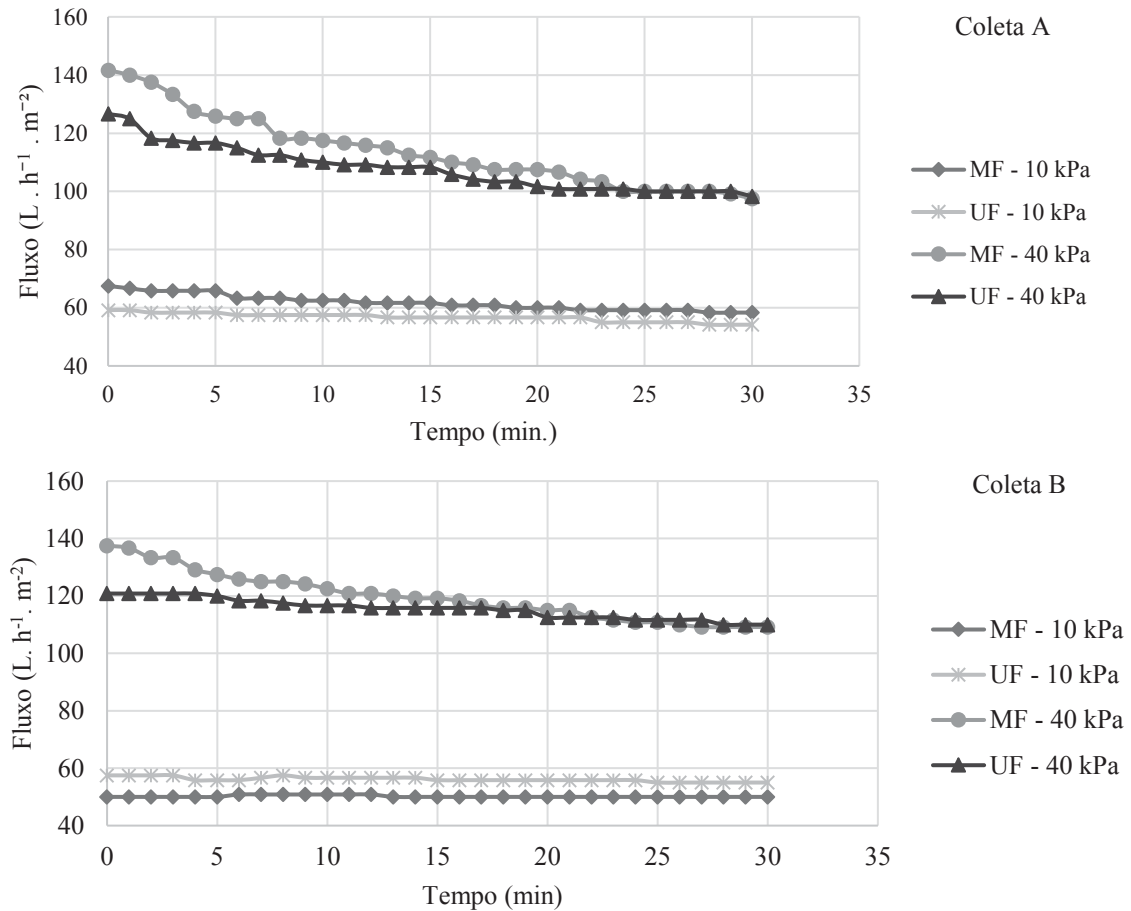
4.1 Determinação da membrana e a pressão de trabalho

A seleção da membrana e a pressão de operação para os ensaios de longo período foi realizada analisando a influência da pressão no fluxo das membranas e nas porcentagens de rejeição dos contaminantes. Os testes com cada membrana foram de 30 minutos e as eficiências de remoção foram calculadas para 5 parâmetros físico-químicos, além do volume recuperado.

4.1.1 Influência da pressão de operação no desempenho do fluxo

A Figura 21 apresenta a variação do fluxo nas membranas de MF e UF, utilizando pressões de operação de 10 e 40 kPa. Nessa parte inicial foram realizadas duas coletas de água de chuva (A, B). Cada processo de filtração teve uma duração de 30 minutos, com o fim de testar as membranas com as mesmas cargas contaminantes da coleta particular.

Figura 21 - Variação do fluxo por tipo de membrana e pressão.



Como se observa na Figura 21, tanto na MF como na UF não houve a necessidade de um processo de retrolavagem, pois o fluxo não decresce mais do 50% após dos 30 minutos de filtração, para as duas pressões trabalhadas. Além disso, os fluxos das duas membranas de trabalho são bastante similares tanto na pressão de 10 kPa como na de 40 kPa. Utilizando uma pressão de 10 kPa, o fluxo estabiliza na faixa dos 100-110 L.h⁻¹.m⁻², enquanto na pressão de 40 kPa, o fluxo estabiliza na faixa dos 50-60 L.h⁻¹.m⁻². Ou seja, existe um acréscimo do fluxo entre o 50% e 55% para quando é utilizada a pressão de 40 kPa.

Nas experimentações utilizando a pressão de 40 kPa, é observada uma queda do fluxo mais acentuada, do que na pressão de 10 kPa. EPA (2005), Habert, Borges e Nobrega (2007) e Song (1998) salientam que a redução do fluxo através das membranas pode acontecer por um bloqueio nos poros, a adsorção do soluto e a deposição de partículas sobre a superfície da membrana. Tais situações são chamadas em conjunto de *fouling* ou incrustação. Depois dos procedimentos de limpeza das membranas não sempre é possível recuperar 100% da permeabilidade hidráulica pois os poros podem sofrer algum tipo de alteração (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2007).

A formação da torta de filtração é considerada uma das causas principais no declínio de fluxo, quando são utilizados processos como a microfiltração. Benkahla et al. (1995), estudaram a formação da torta de filtração, junto ao acréscimo da pressão de trabalho. Os autores observaram que a resistência da torta de filtração é maior, quando se aumenta a pressão transversal da membrana. Além disso, essa resistência permanece a um nível constante, ao diminuir a pressão de trabalho. No entanto, a redução do fluxo pela torta de filtração, pode ir acompanhada por rejeições mais eficientes, tornando necessária a aplicação de testes em operação constante para uma avaliação mais abrangente.

4.1.2 Rejeição de contaminantes na MF e UF em relação à variação da pressão

A seleção da membrana e da pressão de trabalho é baseada, além da variação do fluxo, nos valores de caracterização do permeado apresentados na Tabela 3 e Tabela 4.

Os valores de pH não possuem uma variação significativa entre a água de chuva em estado bruto e o permeado. Nos parâmetros de cor e turbidez foi observado um desempenho similar tanto para a MF como UF, nas duas pressões de experimentação, embora as concentrações em estado bruto sejam bastante diferenciadas. Isto mostra que a qualidade do permeado nesses dois parâmetros físico-químicos, depende das características da membrana e não das cargas contaminantes iniciais.

Tabela 3 - Qualidade das amostras em estado bruto e do permeado.

Coleta	Pressão (kPa)	PSM	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	pH	Turbidez (uT)	Cor (uH)	Matéria Orgânica ($\text{mg O}_2\text{.L}^{-1}$)	SS (mg. L^{-1})	Volume recup. %
A	Bruto		7,32	7,84	133	139	3,9	0,1	-----
	10	MF	11,13	8,34	2	1	3,5	ND	88,73
		UF	8,39	8,17	3	1	3,4	ND	86,36
	40	MF	10,44	7,25	3	2	1,8	ND	91,85
		UF	7,93	7,53	1	2	1,4	ND	92,74
	B	Bruto		9,29	6,98	12	15	1,8	0,003
10		MF	15,12	7,05	2	1	1,6	ND	82,73
		UF	10,1	7,13	1	2	1,6	ND	90
40		MF	13,97	7,17	2	3	1,1	ND	93,93
		UF	9,14	7,02	2	2	0,7	ND	96,06

ND: Não detectável.

Tabela 4 - Rejeições calculadas para turbidez, cor e matéria orgânica.

Coleta N°	Membrana	Pressão (kPa)	Turbidez	Cor	Matéria orgânica
A	MF	10	0,99	0,99	0,11
	UF		0,98	0,99	0,12
	MF	40	0,98	0,99	0,55
	UF		0,99	0,99	0,64
B	MF	10	0,83	0,93	0,12
	UF		0,92	0,87	0,12
	MF	40	0,83	0,80	0,41
	UF		0,83	0,87	0,59

No caso da matéria orgânica, foram observados maiores valores de rejeição quando é utilizada uma pressão de 40 kPa. Além disso, a UF apresentou um melhor desempenho, mesmo com duas condições diferentes de carga inicial ($3,9 \text{ mg.L}^{-1}$ e $1,8 \text{ mg.L}^{-1}$). EPA (2005) ressalta que as propriedades de filtração das membranas dependem, para além das condições do material, da formação da torta produzida na superfície da membrana pela deposição de partículas. Essa torta é chamada também de membrana dinâmica e, conseqüentemente, consegue aumentar a eficiência de remoção. A utilização de pressões maiores, pressupõe uma formação de tortas de filtração mais densas, impactando positivamente na remoção de matéria orgânica coloidal (BENKAHLA et al., 1995; CHU, LI, 2006).

Valores altos de cor e turbidez como no caso da coleta A, pressupõem valores maiores de matéria orgânica. Melo (2007) destaca que a turbidez é decorrente da presença de sólidos em suspensão, sejam orgânicos ou inorgânicos, enquanto EPA (2012) adverte que é importante remover matéria orgânica suspendida para evitar a geração de odores e cores desagradáveis.

Por tanto, existe uma forte correlação entre os valores de turbidez e o conteúdo de matéria orgânica.

Nas duas caracterizações realizadas se observa um acréscimo da condutividade nos permeados, obtendo maiores valores para quando o tratamento é feito pela membrana de MF. Yamamura, Kimura e Watanabe (2007) e Kimura et al. (2004) utilizaram membranas MF e UF para o tratamento de águas superficiais. Os autores relatam que a matéria orgânica responsável pela incrustação destas membranas, pode apresentar um processo de dessorção após a limpeza com NaOH (solução utilizada no presente trabalho). É possível que tal fenômeno aconteça nas duas membranas usadas neste estudo, acompanhado pela dessorção de espécies iônicas como descreveram Reddy et al. (201b) após de utilizar meios filtrantes. Isto afeta a quantificação final da condutividade elétrica.

Em todos os experimentos se percebem valores acima do 80% para o volume recuperado do permeado, encontrando maiores porcentagens quando é utilizada a membrana de UF trabalhando com uma pressão de 40 kPa. Essa relação entre a pressão e o fluxo é descrita por Habert, Borges e Nobrega (2006), já que no caso de utilizar membranas com poros mais fechados, é necessário aumentar a pressão de operação para obter fluxos economicamente viáveis, uma vez que tais membranas oferecem uma maior resistência à transferência de massa.

Como foi observado, nos parâmetros de avaliação preliminar (turbidez, cor, matéria orgânica, sólidos sedimentáveis e volume recuperado) o desempenho das membranas de MF e UF são bastante similares. No entanto, na rejeição de matéria orgânica, volume recuperado e taxas de fluxo, foi observado um melhor desempenho utilizando uma pressão de trabalho de 40 kPa. Por esse motivo, os ensaios de longo período foram conduzidos com as duas membranas de MF e UF, separadamente, operando a 40 kPa.

4.2 Ensaios de longo período

Para as duas membranas de trabalho, MF e UF, foram conduzidos três experimentos de longo período, para um total de seis ensaios. Através deles foi realizada a análise do comportamento do fluxo e a qualidade do permeado coletado, visando o uso em atividades que não precisam de tratamentos de potabilização.

4.2.1 Caracterização da água de chuva em estado bruto

A caracterização da água de chuva em estado bruto foi realizada para cada um dos processos de filtração. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

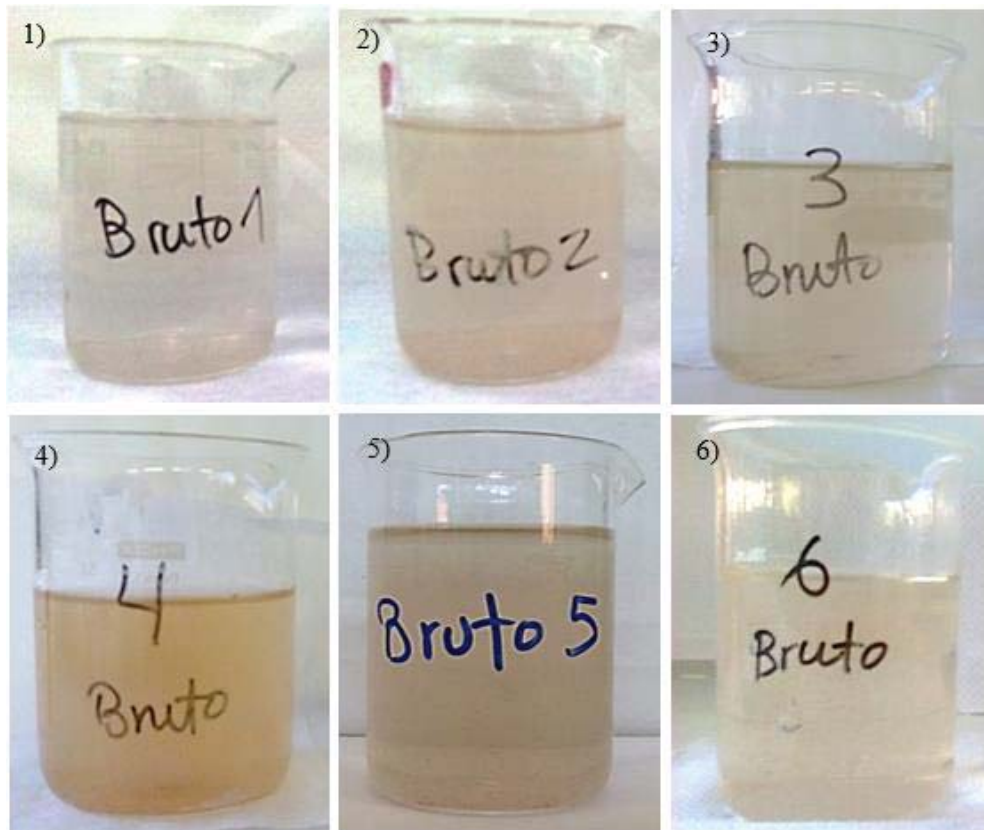
Tabela 5 - Caracterização das amostras de água de chuva em estado bruto.

Parâmetro	Unidade	Número de coleta						Média
		1	2	3	4	5	6	
pH	-	7,33	6,87	6,87	6,57	6,89	6,45	6,83
CE	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	13,28	10,23	14,39	9,63	24,20	13,16	14,15
Cor	uH	36	124	86	133	74	53	84,33
Turbidez	uT	33	125	99	163	77	57	92,33
Dureza (CaCO_3)	mg.L^{-1}	5,20	9,40	3,60	3,10	7,10	3,60	5,33
$\text{NH}_3\text{-N}$	mg.L^{-1}	1,03	2,57	0,77	1,03	0,77	2,05	1,37
NTK	mg.L^{-1}	5,21	2,78	1,27	1,39	2,78	2,78	2,70
Sólidos sedim.	mg.L^{-1}	0,10	2,50	0,00	3,75	8,00	2,50	2,81
Sólidos Totais	mg.L^{-1}	145,00	97,50	87,50	201,67	251,67	36,00	136,56
SST	mg.L^{-1}	28,67	61,33	40,00	125,33	70,67	36,00	60,33
Fósforo Total	mg.L^{-1}	0,04	0,31	0,16	0,52	0,18	0,15	0,23
$\text{NO}_2\text{-N}$	mg.L^{-1}	<0,66	<0,66	<0,66	<0,66	<0,66	<0,66	<0,66
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg.L^{-1}	0,36	<0,2	<0,2	<0,2	0,76	0,58	0,38
SO_4^{2-}	mg.L^{-1}	28,70	19,00	20,20	21,20	38,80	9,60	22,92
DQO	$\text{mgO}_2\text{.L}^{-1}$	59,84	27,56	39,97	37,45	45,56	38,01	41,40
DBO_5	$\text{mgO}_2\text{.L}^{-1}$	10,63	18,75	18,75	19,38	16,25	32,50	19,38
Óleos e graxas	mg.L^{-1}	77,50	66,00	108,00	96,00	27,50	58,67	72,28
Coliformes totais	UFC.100mL^{-1}	<300	4300	29000	2300	46000	>110000	31983
Coliformes termotolerantes	UFC.100mL^{-1}	<300	<300	<300	<300	>110000	>110000	36866
Pb	mg.L^{-1}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,18	0,07
Cd	mg.L^{-1}	0,06	0,03	0,03	0,03	0,01	0,00	0,03
Cr	mg.L^{-1}	0,15	0,39	0,39	0,35	0,27	0,27	0,30
Ni	mg.L^{-1}	0,10	0,13	0,06	0,10	0,05	0,05	0,08
Zn	mg.L^{-1}	0,06	0,23	0,07	0,08	0,07	0,07	0,10
Cu	mg.L^{-1}	0,00	8,75	0,00	0,00	0,00	0,00	1,46
Fe	mg.L^{-1}	1,81	7,72	1,82	10,68	5,41	4,40	5,31

Para todas as coletas, os valores de cor e turbidez apresentaram uma forte correlação, sugerindo que ao quantificar uma das variáveis, pode-se estimar o valor da outra. As concentrações de turbidez e SST possuem uma relação diretamente proporcional, uma vez que a maiores valores de turbidez correspondem maiores valores de SST, como é observado na coleta 4 (concentração mais alta) e as coletas 6 e 1 (concentrações mais baixas).

A área de captação está rodeada por duas zonas verdes de extensão considerável e no momento de realizar a coleta da água, foi possível observar como o solo era carregado até o sistema. A OMS (2011), Aryal et al. (2010), Zhu et al. (2004) e FUNASA (2004), advertem que concentrações altas de ferro interferem no aspecto da água, alterando os valores de cor e turbidez. Tal relação também é observada na aparência das amostras em estado bruto, como é mostrado na Figura 22, principalmente na coleta 4 que possui os maiores valores de cor, turbidez, SST e Fe.

Figura 22 - Aparência das amostras em estado bruto.



Nota: Aparência das amostras em estado bruto segundo o número de coleta
 Fonte: Próprio autor (2016).

Zhang et al. (2010) avaliaram a relação entre os parâmetros de SST e DQO ao longo do tempo. Para as coletas feitas em telhados e em solo, os picos desses dois parâmetros acontecem após de 5 minutos. Depois desse tempo as concentrações decrescem lentamente e permanecem estáveis no final. O sistema instalado não para de encher quando atinge seu máximo nível, pelo contrário, transborda até o evento de chuva parar. Considerando isso, é possível que as contrações de DQO sejam similares ao final de cada coleta, pois nenhuma foi feita no começo das precipitações. Tal comportamento foi observado neste trabalho pois se obteve uma média de $41,40 \text{ mg.L}^{-1}$, com valores mínimo e máximo de $27,56$ e $59,84 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente.

As concentrações de $\text{NH}_3\text{-N}$, SST, Zn e Ni apresentaram afinidade com os valores indicados por Göbel, Dierkes e Coldewey (2007) para caracterizações de escoamentos de água de chuva em áreas com alta intensidade de tráfego. Entre as principais fontes de SST, Zn e Ni existem: Despejos humanos ou animais (para SST), erosões do solo ou pavimento, veículos (tráfego, gases de escape) e abrasão de pneus e freios (Aryal et al, 2010; DEC-NSW, 2006). Portanto, é comum encontrar uma forte relação nas concentrações de áreas que são abertas ao público e que tem a presença de tráfego de automóveis.

O Departamento do Meio Ambiente e Conservação de Nova Gales do Sul, Austrália, DEC-NSW (2006), realizou a caracterização físico-química dos escoamentos pluviais de áreas urbanas em períodos chuvosos. Os parâmetros de NTK ($3,02 \text{ mg.L}^{-1}$), $\text{NO}_2\text{-N}$ ($0,34 \text{ mg.L}^{-1}$), $\text{NO}_3\text{-N}$ ($0,34 \text{ mg.L}^{-1}$) e DBO_5 (14 mg.L^{-1}) compartilham certa semelhança com as concentrações médias do presente trabalho, apresentadas na Tabela 5. Como foi referido acima, o estacionamento utilizado para a coleta da água de chuva é cercado por duas áreas verdes. Além destas zonas, se têm plantações de milho e soja. É possível que a água de chuva carregue solo e matéria orgânica do entorno. As concentrações de DBO poderiam ter a mesma origem como é sugerido pelo EPA (2004), Zhu et al. (2004) e OMS (2011). Além disso, atividades agrícolas, fertilizantes químicos ou nitrogenados, sedimentos e decomposição bacteriana de matéria orgânica, são fontes de compostos nitrogenados como NTK, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ e $\text{NH}_3\text{-N}$.

Quanto às concentrações de turbidez, cor, óleos e graxas, coliformes totais, Cd, Cr, Cu e Fe, a caracterização apresentada neste trabalho tem concentrações muito mais elevadas em comparação com os trabalhos realizados com áreas afins feitos por Zhu et al. (2004), o DEC-NSW (2006) e Göbel, Dierkes e Coldewey (2007). No caso dos metais pesados, os valores são altamente influenciados pela abrasão dos pneus e freios, além dos materiais encontrados na superfície dos veículos (Aryal et al, 2010; EPA, 2004; Muschack, 1990; OMS, 2011). Por sua vez, as concentrações de turbidez e cor são afetadas pela interação de água com metais pesados (Fe, Zn), a presença de matéria orgânica e a erosão do solo (EPA, 2004; Zhu et al., 2004).

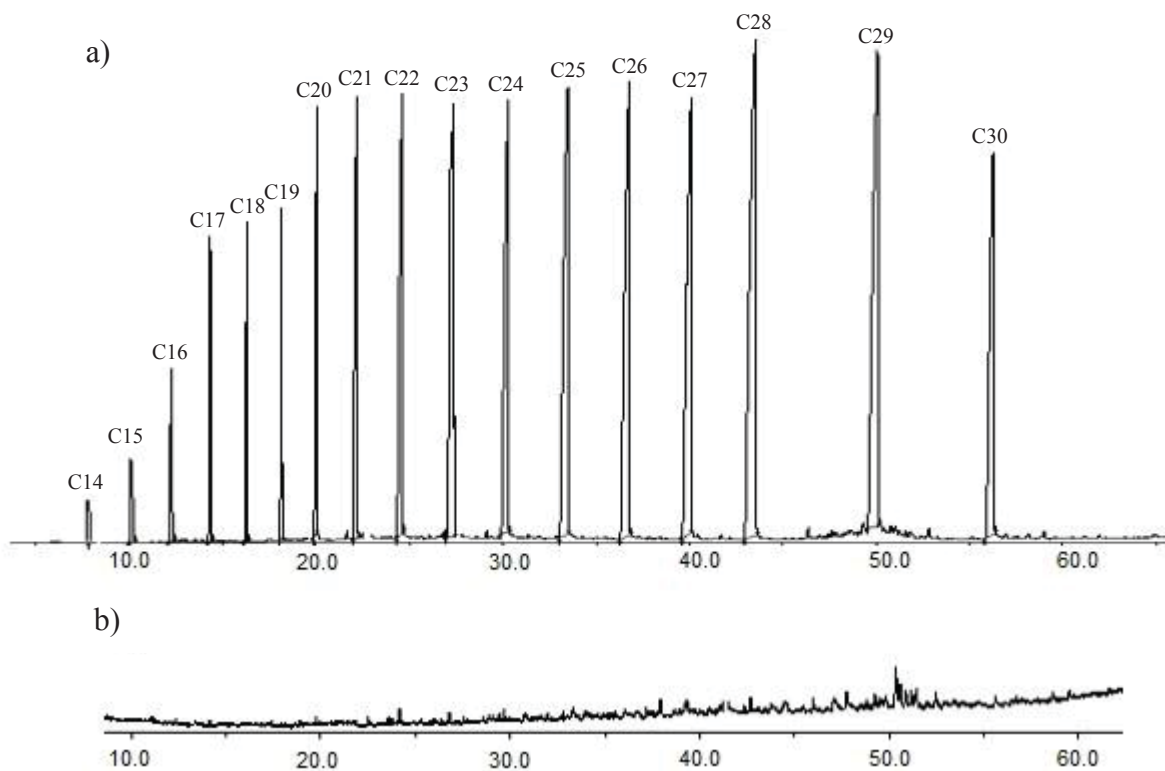
A coleta foi realizada numa área que pode conter vazamentos de combustíveis e lubrificantes. As concentrações de óleos e graxas são afetadas, atingindo ou ultrapassando valores geralmente reportados em águas de esgoto doméstico com mínimos de 50 mg.L^{-1} e máximos de 100 mg.L^{-1} (Metcalf; Eddy, 2003).

O valor médio para óleos reportado no presente trabalho ($72,28 \text{ mg.L}^{-1}$) é similar aos valores máximos reportados por Khan et al. (2006) e McQueen et al. (2010), $80,1 \text{ mg.L}^{-1}$ e 79 mg.L^{-1} respectivamente, os quais correspondem a caracterizações feitas em autoestradas e parques automotivos. No entanto Khan et al. (2006) consideram que as amostras coletadas no início do evento de chuva, assim como as coletadas ao final, podem superestimar e subestimar a concentração média do evento em 20 mg.L^{-1} ou 1 e 2 mg.L^{-1} , respectivamente. Para obter o valor correspondente a todo o evento, deveria ser instalado um sistema de coleta que consiga armazenar todo o volume teórico segundo a área proposta e a intensidade média de precipitação.

De acordo com Brown, Pierce e Rice (1985) os escoamentos de águas pluviais são responsáveis pelas concentrações de hidrocarbonetos nos corpos de água, principalmente por causa de materiais oleosos. Uma vez que havia a presença de óleos e graxas na água de chuva,

procurou-se identificar se esses óleos eram hidrocarbonetos provenientes de combustíveis. Para tal, foram injetados no cromatógrafo gasoso padrões com as mesmas cadeias carbônicas encontradas em gasolina e diesel. No entanto, as análises cromatográficas de todas as amostras em estado bruto, não apresentaram o perfil desejado para águas contaminadas com substâncias que possuem as cadeias carbônicas entre C14 até C30, sugerindo que os óleos e graxas presentes não são devido a vazamentos ou respingos de combustíveis. Os cromatogramas com os padrões e a leitura das amostras são mostrados na Figura 23.

Figura 23 - Perfis cromatográficos dos padrões e as amostras em estado bruto.



a) Perfil cromatográfico padrão com 17 cadeias carbônicas (C14-C30).

b) Perfil cromatográfico das amostras de água de chuva em estado bruto, coletadas no estacionamento.

Fonte: Próprio autor (2016).

Latimer et al. (1990) realizaram as análises cromatográficas de escoamentos de água de chuva coletados em quatro áreas com diferente tipo de uso: comercial, residencial, industrial e autoestrada. Tais cromatogramas foram comparados com os perfis de cinco produtos petrolíferos refinados: Gasolina, óleo combustível N° 2, óleo combustível N° 6, óleo usado para motor e óleo virgem para motor. Os resultados mostraram que, contrário ao que geralmente é concluído, as concentrações de hidrocarbonetos em água de chuva coleta em piso, provêm principalmente de óleo usado para motor. Os autores analisaram as possíveis fontes de produtos

contaminados com óleo usado para motor e devido às altas concentrações achadas, concluíram que podem-se derivar de a) óleo depositado pelos veículos nas vias de circulação ou b) o despejo de óleo nos coletores de águas pluviais.

Comparando os perfis cromatográficos de Latimer (1990) e o perfil padrão analisado no presente trabalho (Figura 23a), é possível que a água de chuva coletada no estacionamento do prédio de direito da UPF esteja contaminada com múltiplos tipos e concentrações de óleos e graxas (Tabela 5), tanto vegetal (pois a área de coleta é cercada por uma área verde) e mineral (óleo de motor usado), de modo que se torna difícil a sua identificação. Além disso, é possível que as concentrações de hidrocarbonetos sejam baixas, de acordo aos picos observados na Figura 23b.

Autores como Zhu et al. (2004), Göbel, Dierkes e Coldewey (2007), Aryal et al. (2010) e Reddy, Xie e Dastgheibi (2014b), destacam a presença de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) nos escoamentos de água de chuva. Esses tipos de hidrocarbonetos são comuns em estradas, estacionamentos e áreas abertas, o que pode elevar as concentrações de óleos e graxas na água de chuva do presente estudo. No entanto, a sua caracterização deve ser realizada de forma individual, pois cada tipo de HAP possui um comportamento diferente.

4.2.2 Fluxo permeado da MF e UF

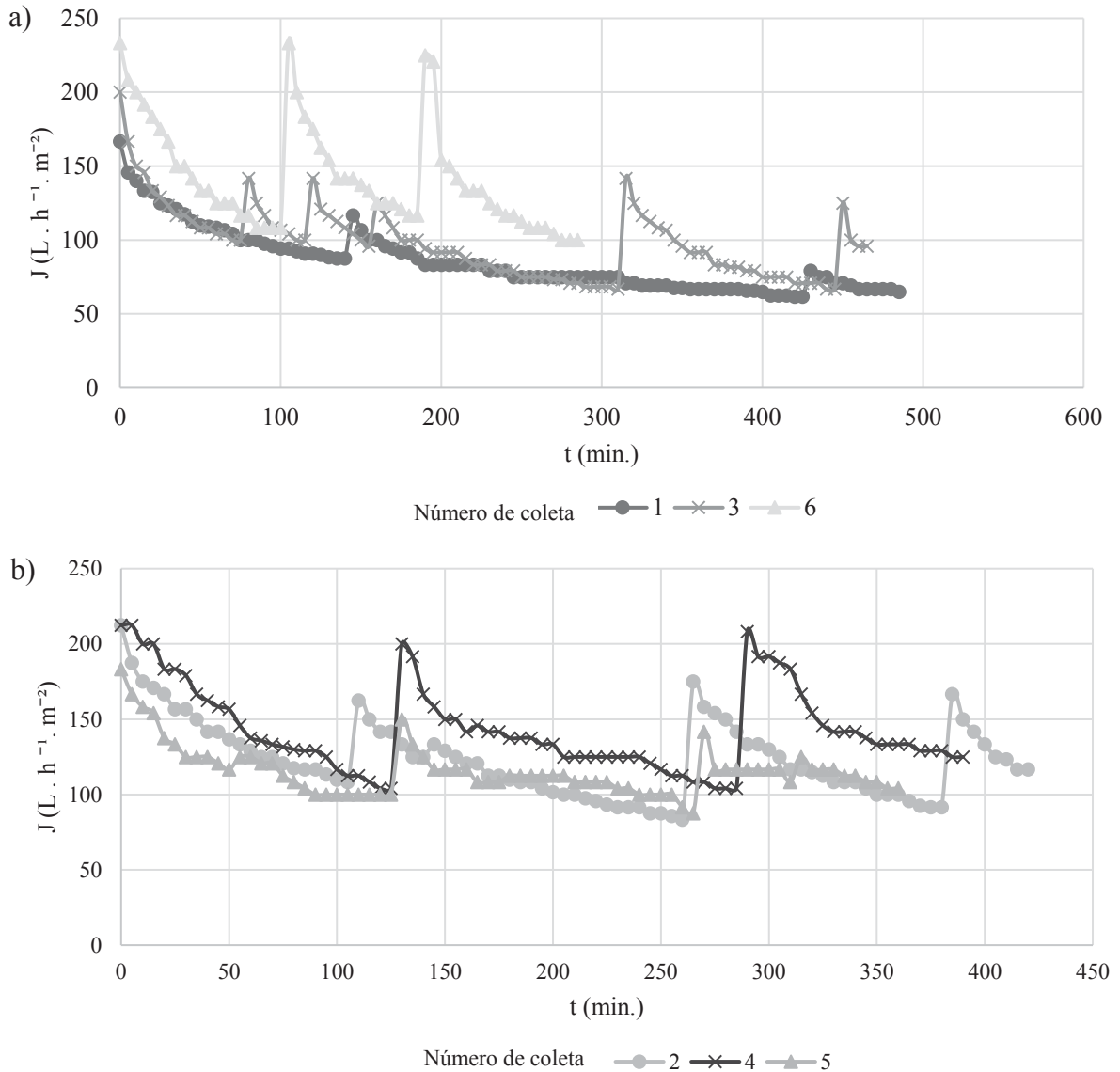
Os experimentos de operação constante foram desenvolvidos com a pressão selecionada de 40 kPa. As condições de filtração estão expostas na Tabela 6. Como se observa, além da pressão, a vazão de ar também é constante em todos os PSM. Kim, Lee e Kim (2005) apontam à injeção de ar como um método muito eficiente para reduzir os mecanismos relacionados com a incrustação ou *fouling*, além de atenuar o incremento da pressão de operação para obter maiores taxas de fluxo.

Tabela 6 - Condições de operação para os ensaios de longo período.

Coleta	PSM	Vazão de ar (L.min ⁻¹)	Tempo de filtração (h)	Volume alimentado (L)	Volume total recuperado (L)	Volume das retrolavagens (L)	Taxa de recuperação (%)
1	MF	1	8,00	66,64	65,95	6,00	89,96
2	UF	1	7,00	82,30	81,65	19,00	76,12
3	MF	1	7,75	71,10	70,14	47,00	32,55
4	UF	1	6,50	80,30	79,50	12,00	84,06
5	UF	1	6,00	66,80	62,23	11,00	76,69
6	MF	1	4,50	64,00	63,80	14,00	77,81

As curvas de fluxo para os ensaios de longo período realizados com as membranas de MF e UF, estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Desempenho do fluxo nas membranas de a) MF e b) UF.



Os picos das curvas representam o fluxo permeado antes e depois de executar os processos de retrolavagem. Como é observado, foram necessários diferentes processos de retrolavagem para conduzir as filtrações satisfatoriamente.

O fluxo na membrana de MF cai ao 50% do inicial de forma mais acentuada, em curtos período de tempo fluando entre 40, 75, 85 e 135 minutos. As membranas de MF são caracterizadas por terem um tamanho de poro maior em comparação com os outros PSM mais comuns (UF, NF, OR), permitindo o passo de partículas de maior diâmetro. Song (1998) adverte que a obstrução do poro e a formação de torta de filtração são dois mecanismos de incrustação

na membrana, onde o primeiro está relacionado com a forma e tamanho dos poros e o segundo refere-se ao aumento de partículas retidas. Durante a experimentação em operação constante a membrana de MF utilizada poderia ser submetida a um processo de incrustação mais rápido, afetando o desempenho do fluxo a longo prazo.

Comparando o fluxo nas duas membranas, os processos de UF são mais uniformes antes e depois dos procedimentos de retrolavagem. Ao contrário com a MF, o decaimento de fluxo ao 50% do inicial ocorre em intervalos maiores que variam entre 105 e 160 minutos. Além do bloqueio dos poros e a formação da torta de filtração, Metcalf e Eddy (2003) consideram o estreitamento dos poros dentro dos mecanismos de *fouling* por acumulação de sólidos. Na UF isto pode ocorrer quando o material sólido do influente tem um peso molecular menor do que o corte da membrana, e é depositado na superfície do poro. No entanto, devido à estabilidade de fluxo nos três ensaios de operação constante, a configuração mais estreita da membrana de UF favoreceu a formação de uma camada seletiva que permitiu evitar alterações críticas no poro da membrana, mantendo a regularidade no fluxo.

Na membrana de MF foram necessários múltiplos e diferentes processos de retrolavagem para retornar ao valor inicial, o que foi atingido apenas na última filtração. Já no caso da UF, apesar de ser um PSM que necessita maiores volumes de alimentação (Tabela 6), é possível completar tempos de operação mais longos, com melhores oportunidades para recuperar o fluxo inicial. As taxas de recuperação no processo da UF estão entre o 76 e 85%, enquanto para a MF se obteve um valor de 32,55%, principalmente por todo o volume que foi destinado para os processos de retrolavagem da coleta 3. Nesse caso particular da MF, a maior concentração de todas as 6 caracterizações se encontra nos óleos e graxas, parâmetro que poderia ter afetado o desempenho do fluxo.

É importante ressaltar que, além da carga poluidora inicial e o mecanismo de incrustação, os processos de limpeza entre cada operação não sempre permitem recuperar os fluxos iniciais e seu desenvolvimento ao longo do tempo. De acordo com a Habert, Borges e Nobrega (2006), apesar de executar uma limpeza periódica, o fluxo experimenta uma suave queda pois não é possível eliminar por completo as alterações provocadas nos poros na membrana.

MF e UF tem uma permeabilidade hidráulica altamente competitiva em comparação às técnicas de tratamento de águas superficiais mais conhecidas. MF atinge valores entre 60-265 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ (1666-7360 $cm \cdot s^{-1}$) e UF abrange valores entre 80-220 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ (2222 - 6111 $cm \cdot s^{-1}$). Meios filtrantes com biocarvão descritos por Reddy, Xie e Dastgheibi (2014d), sistemas de filtro com meios mistos relatados por Reddy, Xie e Dastgheibi (2014c) e sistemas de

bioretensão ilustrados por Trowsdale e Simcock (2011) conseguem uma condutividade hidráulica de $0,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $0,5 \text{ cm.s}^{-1}$ e $0,00138 \text{ cm.s}^{-1}$, respectivamente. No entanto, os critérios de operação e qualidade dependem do destino final da água de chuva tratada, seja para uso urbano ou controle da poluição em corpos de água superficiais.

4.2.3 Qualidade do permeado

Na Tabela 7 são apresentados os valores da caracterização físico-química e microbiológica após do tratamento por MF e UF.

Tabela 7 - Qualidade do permeado pelo tratamento por membranas de MF e UF.

Parâmetro	Unidades	MF			UF		
		Mín.	Máx.	Rejeição (%)	Mín.	Máx.	Rejeição (%)
pH	-	6,53	7,58	-	6,84	7,02	-
CE	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	13,73	15,33	-	9,07	23,20	-
Cor	uH	1,00	3,00	96,65	1,00	2,00	98,51
Turbidez	uT	1,00	2,00	97,15	0,00	2,00	99,32
Dureza (CaCO_3)	mg.L^{-1}	3,10	4,20	11,97	2,70	4,90	35,91
$\text{NH}_3\text{-N}$	mg.L^{-1}	0,77	1,41	18,75	0,26	0,26	88,89
NTK	mg.L^{-1}	1,16	1,85	37,01	0,69	1,74	70,83
Sólidos sedimentáveis	mg.L^{-1}	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
Sólidos Totais	mg.L^{-1}	25,00	86,67	44,86	20,00	110,00	74,46
SST	mg.L^{-1}	0,00	0,00	100,00	0,00	1,33	99,28
Fósforo Total	mg.L^{-1}	0,02	0,05	64,91	0,00	0,03	98,28
$\text{NO}_2\text{-N}$	mg.L^{-1}	<0,66	<0,66	*	<0,66	<0,66	*
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg.L^{-1}	<0,20	1,51	1,85	<0,2	0,69	3,07
SO_4^{2-}	mg.L^{-1}	11,80	23,70	4,01	12,40	35,40	16,23
DQO	$\text{mgO}_2\text{.L}^{-1}$	18,97	26,25	49,88	18,13	21,96	41,57
DBO_5	$\text{mgO}_2\text{.L}^{-1}$	2,25	7,00	74,21	5,38	7,25	65,56
Óleos e graxas	mg.L^{-1}	51,00	75,00	22,83	13,50	55,00	37,11
Coliformes totais	UFC.100mL^{-1}	<300	920	98,28	<300	<300	93,11
Coliformes termotolerantes	UFC.100mL^{-1}	<300	<300	99,73	<300	<300	99,73
Pb	mg.L^{-1}	0,18	0,18	*	0,00	0,18	16,67
Cd	mg.L^{-1}	0,03	0,05	21,08	0,00	0,03	31,15
Cr	mg.L^{-1}	0,15	0,35	3,33	0,27	0,43	15,00
Ni	mg.L^{-1}	0,04	0,06	22,62	0,04	0,07	61,90
Zn	mg.L^{-1}	0,03	0,09	51,41	0,07	0,08	43,06
Cu	mg.L^{-1}	0,00	0,00	*	0,00	0,00	100,00
Fe	mg.L^{-1}	0,57	0,60	73,96	0,57	0,58	92,14

* O valor da concentração em estado bruto foi o mesmo para o permeado.

As rejeições para SS, SST, coliformes termotolerantes, cor, turbidez e coliformes totais estão acima do 90% em ambas membranas, com um leve melhor desempenho no caso da UF

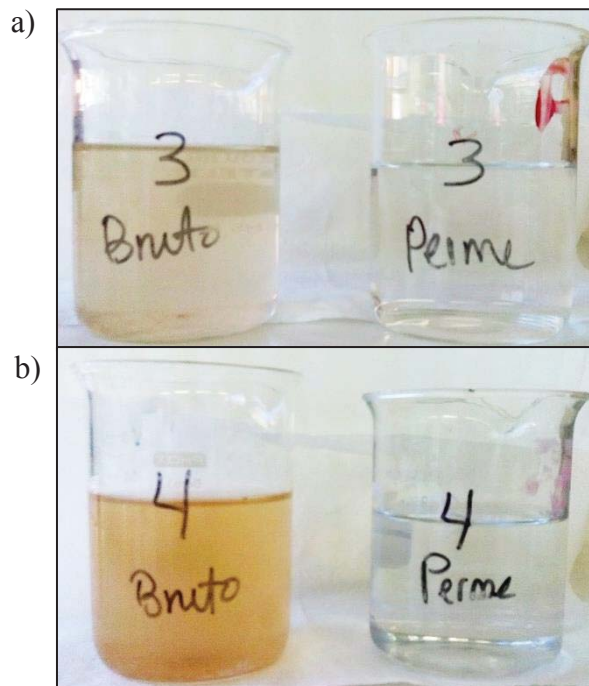
para os últimos três parâmetros. Para dureza, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ foram obtidas baixas taxas de remoção, porém, as concentrações da água da chuva em estado bruto também foram baixas.

Os processos de MF e UF têm um desempenho qualificado para a remoção de sólidos suspensos, atingindo até o 100% de eficiência. De acordo com Anderson et al. (2016) e Paul, Aitken e Antizar-ladislao (2013), *best management practices* (BMP) como bioswales e pavimentos macro permeáveis tem remoções que variam entre 29 e 100%.

Baixas taxas de remoção foram obtidas para dureza, nitrogênio amoniacal, nitrato, e sulfato, com as duas membranas. No entanto, as concentrações do influente são também baixas (Tabela 5). Outras técnicas são mais eficientes na remoção de nutrientes e compostos de nitrogênio. Com o sistema de pavimentos macro permeáveis avaliado por Paul, Aitken e Antizar-ladislao (2013), é possível alcançar 100% de eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal. Através de meios filtrantes feitos com limalha de ferro, é possível uma remoção de 100% para o nitrato e 90% de fósforo total (REDDY; XIE; DASTGHEIBI, 2013).

Na Figura 25 é mostrada a aparência do bruto e permeado nas coletas 3 e 4. Como se observa na Figura 26, as rejeições nos parâmetros de turbidez e cor não dependem da carga poluidora inicial e sim, das características da membrana e possivelmente da eficiência da retrolavagem.

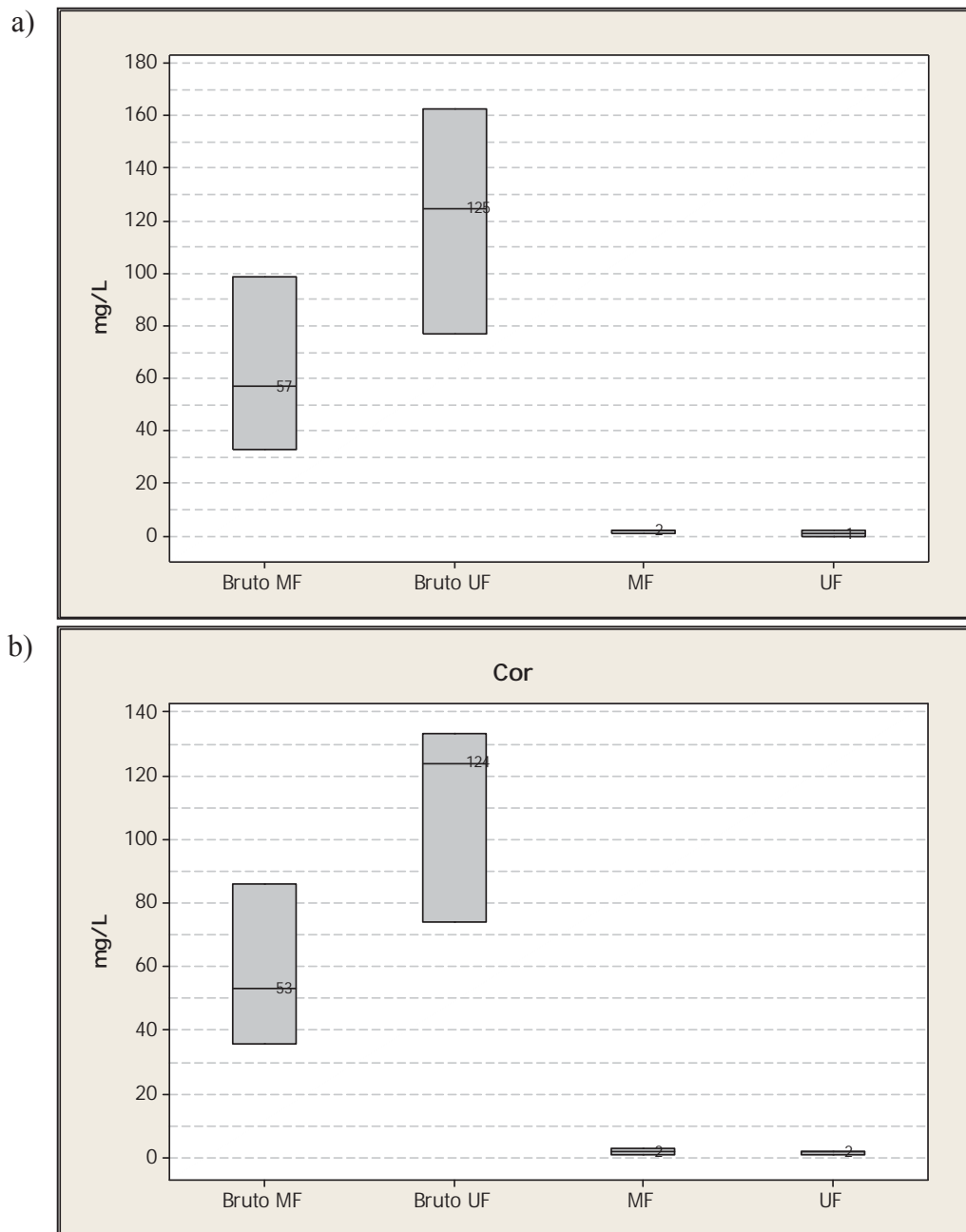
Figura 25 - Aparência do permeado após da aplicação dos PSM de MF e UF



Amostras em estado bruto e permeado a) Coleta 3, aplicação de MF. b) Coleta 4, aplicação de UF.

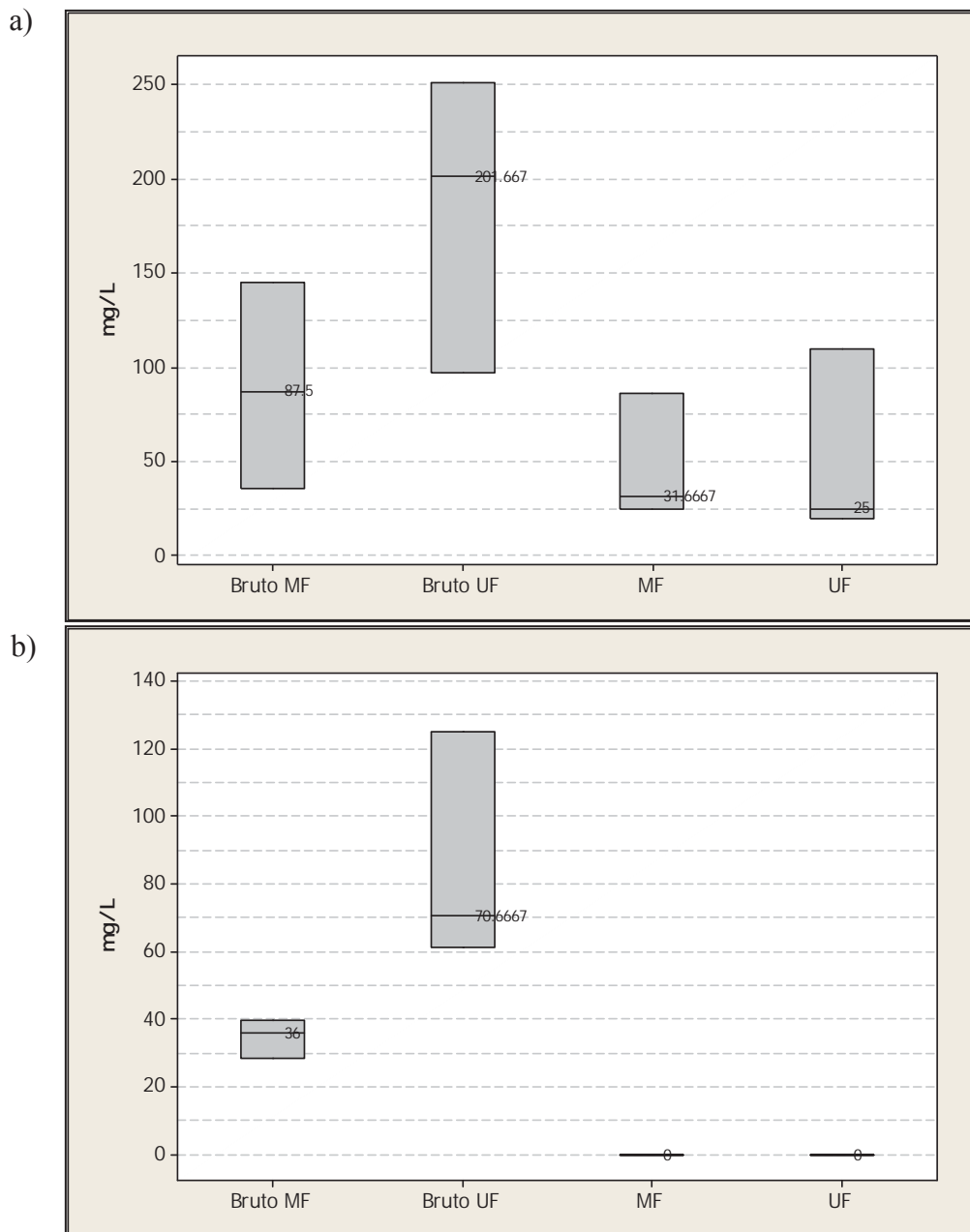
Fonte: Próprio autor (2016).

Figura 26 - Distribuição das concentrações para o bruto e permeado, a) turbidez; b) cor.



As rejeições para sólidos totais apresentadas na Tabela 7 e a distribuição das suas concentrações mostradas na Figura 27, sugerem que sua redução depende das concentrações iniciais do influente. Logo, se existem altas concentrações de ST em estado bruto, o permeado terá valores equivalentes. A Figura 27 também apresenta as concentrações em estado bruto dos sólidos suspensos totais, junto às cargas finais no permeado, que foram não detectáveis. A redução dessas concentrações depende das características de rejeição das membranas e não da carga poluente presente na água de chuva em estado bruto.

Figura 27 - Distribuição das concentrações para o bruto e permeado, a) sólidos totais; b) sólidos suspensos totais.



Ambos PSM têm reduções semelhantes nas concentrações de DQO (MF, 49,88% - 41,57%, UF), porém, a taxa de remoção de DBO é maior para o caso de MF (74,21%). No entanto, quando são utilizados processos de separação por membranas, as porcentagens de remoção de matéria orgânica dependem da carga poluidora inicial e das condições de operação tais como o material de membrana, a pressão de trabalho e a taxa de arejamento (AREERACHAKUL et al., 2009; KIM, LEE, KIM, 2005; KIM et al., 2007).

Segundo Aryal et al. (2010), nos escoamentos de água de chuva, a distribuição de metais pesados em forma dissolvida e particulada, depende de múltiplos fatores tais como a localização, variações sazonais, temperatura e pH. A membrana de UF teve um melhor desempenho na redução das concentrações de metais como Cd, Cr, Ni e Fe. No entanto, para Pb, Cd e Cr, as porcentagens de rejeição estão abaixo do 35%. As concentrações desses metais poderiam estar em forma solúvel, o que dificulta a sua redução através de membranas porosas. Através do tratamento por UF foi obtida uma taxa de remoção de 61,90%, 92,14% e 100% para os metais de Ni, Fe, e Cu, respectivamente, mesmo tendo valores muito semelhantes às concentrações iniciais tratadas pela MF. É possível que esses metais estejam presentes no solo ou material coloidal arrastado desde as áreas verdes e o revestimento do estacionamento, facilitando a sua rejeição.

Reduzir as concentrações de metais pesados em corpos de água é de vital importância devido à sua alta toxicidade. Por conseguinte, as técnicas para sua remoção devem ser 100% eficientes, dependendo do limite a ser atingido. Meios filtrantes feitos de calcita, zeólita e limalha de ferro podem atingir eficiências de remoção entre 90 – 100% de metais pesados como Cd, Cu, Pb, Ni, Cr e Zn, com concentrações muito mais elevadas em água de chuva, que variam entre 2,5 até 50 mg.L⁻¹ (REDDY; XIE; DASTGHEIBI, 2014a).

As eficiências de remoção de óleos e graxas são menores do 50% tanto para MF (22,83%, média) como para UF (37,11%, média). Portanto, é possível que as partículas apolares extraídas pelo método utilizado (Quadro 4) sejam de emulsões oleosas cujo tamanho pode variar entre 100-10.000nm, as quais não podem ser rejeitadas, nem pelo diâmetro de poro da membrana de MF (0,4 µm), nem a retenção nominal da membrana de UF (50 kDa).

Na caracterização microbiológica, apesar de ter elevadas concentrações de coliformes totais na água de chuva em estado bruto (> 110000; 46000 UFC.100 mL⁻¹), foram observadas eficiências de remoção de 98,28% e 93,11% para MF e UF respectivamente. Para coliformes termotolerantes foram observadas rejeições de 99,73% tanto na MF como na UF, valores equivalentes à concentração mínima detectada pelo método de análise utilizado (<300 UFC.100mL⁻¹). Meios filtrantes com zeólita e carvão ativado atingem uma eficiência de remoção de *E. Coli* de 96% e 98%, respectivamente (BIRCH, FAZELI, MATTHAI, 2005; GUEST et al. 2012). Nesse caso a competitividade das membranas de MF e UF deveria ser testada.

4.3 Perspectivas de aplicação

A avaliação de qualidade do permeado por MF e UF foi realizada utilizando as diretrizes do CONAMA (2005, 2011) para o Brasil, EPA (2004) dos Estados Unidos, DEC-NSW (2006) no estado de Nova Gales do Sul, Austrália e do MARM (2007) utilizado em Espanha.

As concentrações médias do permeado por MF e UF, junto com os valores de avaliação propostos, são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Avaliação da qualidade do permeado da MF e UF.

Parâmetro	Unidades	MF	UF	EPA (2004)	DEC - NSW (2006)	MARM (2007)	CONAMA (2005, 2011)		
		Média	Média				Efluentes	Classe 3	Classe 4
pH	-	6,98	6,91	6 - 9	6,5 - 8,5	-	5 - 9	6 - 9	6 - 9
CE	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	14,53	14,16	-	-	-	-	-	-
Color	uH	2,00	1,67	-	-	-	-	75	-
Turbidez	uT	1,67	1,00	<0,1 - 30	≤ 2	2 ^c , 10 ^d , Sem padrão ^e	-	100	-
Dureza (CaCO ₃)	mg.L ⁻¹	3,60	3,67	25 - 350 ^a	-	-	-	-	-
NH ₃ -N	mg.L ⁻¹	0,98	0,26	-	-	-	20	13.3	-
NTK	mg.L ⁻¹	1,58	1,22	<1 - 30	-	-	-	-	-
ST	mg.L ⁻¹	47,78	51,67	-	-	-	-	-	-
SST	mg.L ⁻¹	0,00	0,00	<5 - 30	-	10 ^c , 20 ^d , 35 ^e	-	-	-
TP	mg.L ⁻¹	0,03	0,01	<1 - 20	-	2 ^f	-	0,05 - 0,15	-
NO ₂ -N	mg.L ⁻¹	<0,66	<0,66	0,5 ^b	-	-	-	10	-
NO ₃ -N	mg.L ⁻¹	0,68	0,36	2 - 12	-	-	-	1	-
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	19,20	22,37	250 ^a	-	-	-	250	-
DQO	mg.L ⁻¹	22,61	20,53	< 20 - 90	-	-	-	-	-
DBO ₅	mg.L ⁻¹	5,25	6,21	<10 - 45	-	-	60% menos	10	-
Óleos e graxas	mg.L ⁻¹	59,11	40,83	-	-	-	20	Virtualmente ausentes	Toleram-se iridescências
Coliformes totais	UFC. 100mL ⁻¹	610	<300	<1 - 200	-	-	-	-	-
Coliformes termotol.	UFC. 100mL ⁻¹	<300	<300	<1 - 1000	<1 (<i>E. coli</i>)	0 ^c , 200 ^d , 10000 ^e (<i>E. coli</i>)	-	1000-4000	-
Pb	mg.L ⁻¹	0,18	0,18	-	-	-	0,50	0,033	-
Cd	mg.L ⁻¹	0,03	0,02	<0,01	-	-	1,00	0,01	-
Cr	mg.L ⁻¹	0,26	0,32	-	-	-	1,00	0,05	-
Ni	mg.L ⁻¹	0,05	0,05	<0,1 - 0,02	-	-	2,00	0,025	-
Zn	mg.L ⁻¹	0,06	0,07	-	-	-	5,00	5,00	-
Cu	mg.L ⁻¹	0,00	0,00	-	-	-	1,00	0,013 ^f	-
Fe	mg.L ⁻¹	0,59	0,58	-	-	-	15,00	5,00 ^f	-

^a Uso agrícola – Plantações não alimentares. ^b Uso agrícola – Plantações alimentares. ^c Rega de jardins e descarga de bacias sanitárias. ^d Irrigação de áreas verdes, limpeza de estradas, proteção contra incêndio e lavagem industrial de veículos. ^e Uso recreativo onde o acesso ao público está restrito. ^f Concentrações em estado dissolvido.

Com a avaliação da qualidade da água através do EPA (2004), é possível atingir os padrões de todas as características físico-químicas para ambos tipos de tratamento proposto, exceto na concentração de cádmio. No entanto, este limite de concentração é especialmente para o caso da irrigação, pois valores acima podem ser tóxicos para as plantas. Por tanto, essas concentrações podem ser consideradas para usos ornamentais, descarga de bacias sanitárias e proteção contra incêndio.

Como é observado, não existe parâmetro de referência para verificar os valores de condutividade elétrica. Nem o Brasil dentro da Portaria N° 2.914 para atingir os padrões de potabilidade, possui valor para aquela característica. No entanto a APHA, AWA e a WEF (1999), entidades reconhecidas ao nível mundial pelo desenvolvimento de padrões para água e águas residuais, aclaram que a condutividade elétrica das águas potáveis nos Estados Unidos está na faixa de 50 – 1500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Além disso, a condutividade da água destilada se encontra na faixa de 0,5 – 3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Assim, para os permeados de MF e UF o valor de condutividade é baixo, atingindo até o valor de CE para água potável.

Os valores de pH e turbidez se encontram dentro dos limites estabelecidos pelo DEC-NSW (2006) para descarga de bacias sanitárias, rega de jardins e lavagem de carros. Para atingir totalmente as orientações propostas é necessário determinar as concentrações de *E. coli* devido a que os valores de coliformes termotolerantes não são suficientes. Além desses três parâmetros, a normativa específica a caracterização de sais, nutrientes, metais pesados e pesticidas para uso residencial. Embora não tem um padrão específico para cada um, os limites do EPA (2004) são um bom indicador de qualidade.

De acordo com o MARM (2010), os permeados atingem os objetivos de turbidez, sólidos suspensos e fósforo total para todos os propósitos, incluindo: irrigação de áreas verdes, limpeza de ruas, proteção contra incêndios, lavagem de veículos e usos recreativos. No entanto, para além dos parâmetros mostrados, é necessária a quantificação de *Legionella spp* e nematóides intestinais se houver risco de dispersão em aerossol.

A avaliação do permeado através do CONAMA (2005) para corpos de água superficiais, serve não só para identificar os possíveis usos da água de chuva, mas também como diretriz para considerar a redução da poluição que atinge tais corpos de água. Para a avaliação do permeado, apenas as classes 3 e 4 foram adoptadas, devido a que as concentrações dos permeados ficavam fora dos limites estabelecidos pelas classes 1 e 2 para DBO e todos os metais pesados, excetuando cobre.

As águas de classe 4 podem ser destinadas à navegação e harmonia paisagística. Seus padrões de qualidade são facilmente realizáveis através do tratamento por MF e UF. No entanto

deve ser avaliada a concentração de fenóis. Por sua vez, ambas membranas permitem adequar a água de chuva para os critérios de classe 3. As concentrações de Zn, Cu e Fe atendem os limites estabelecidos. Mas, para atingir os valores de Pb, Cd, Cr e Ni, pode-se sugerir o uso de procedimentos complementares tais como meios filtrantes, ou técnicas mais avançadas como NF e osmose reversa, visando atingir maiores padrões de qualidade. Além dos critérios de qualidade mostrados na Tabela 8 é necessário avaliar outros parâmetros orgânicos e inorgânicos, visando à redução de riscos na saúde dos usuários e o ambiente.

É importante destacar que com a resolução do CONAMA (2011) para lançamento de efluentes em corpos de água, os permeados da MF e UF, atingem todos os parâmetros apresentados na Tabela 8, excetuando os óleos e graxas. Isto faz com que a água de chuva tratada possa ser conduzida a qualquer classe de corpo de água superficial, desde que as características desse corpo receptor não sejam mudadas através da vazão e a carga poluente. Além dos parâmetros mostrados, é necessária a análise de outros compostos orgânicos.

Os permeados tanto da MF como da UF conseguiram atingir as concentrações para coliformes termotolerantes da normativa estadunidense, EPA (2004). A membrana de UF alcança virtualmente a concentração limite para coliformes totais, enquanto a membrana de MF fica fora do padrão. Nesse caso, a cloração pode ser usada como alternativa para o controle da qualidade microbiológica das águas de chuva tratadas. No entanto as outras diretrizes internacionais de avaliação adotadas estimam a qualidade microbiológica através da avaliação de *E. Coli*.

A presença de sólidos sedimentáveis nas amostras de água de chuva deste trabalho, sugere um processo de sedimentação ou decantação antes de fazer algum tratamento de separação por membranas, visando um melhor desempenho no fluxo e nas eficiências de rejeição. Isto pode reduzir as concentrações de cor e turbidez, preliminarmente (ANDRADE, 2013; ZHANG et al., 2010; HELMREICH, HORN, 2009; MELO, 2007; ZHU et al., 2004).

No nível operacional, os processos de MF e UF têm taxas de permeabilidade hidráulica significativamente grandes como visto no item 4.2.2. Isto permite o tratamento de grandes volumes de água de chuva e, além disso, maiores tempos de operação constante. Segundo o destino final da água tratada, uma das maiores vantagens dos sistemas de MF e UF é a variedade de materiais: nanofibras poliméricas polisulfona, cerâmica ou metal, o que pode atender vários critérios de qualidade e, por sua vez, a viabilidade econômica (Dobrowsky et al., 2015; Arnal et al., 2010; Peter-Varbanets et al., 2009; Kim et al., 2005). No entanto, a pesquisa de tratamentos dos escoamentos de água de chuva através de MF e UF, ainda é limitada.

4.4 Proposta para a aplicação de um sistema de aproveitamento de água de chuva coletada em pavimento asfáltico

Para cada uma das coletas realizadas no presente trabalho foi estimada a vazão de pico através do método racional, sendo ele um dos mais antigos e mais largamente utilizados para dimensionar estruturas hidráulicas tais como coletores de drenagem, tubulações para águas pluviais e aquedutos. Na Equação 3, Q representa o fluxo de pico em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, C é o coeficiente de escoamento adimensional baseado na declividade e o tipo de solo, I é a intensidade média da chuva em $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ e A é a área de drenagem contribuinte em m^2 (HOUGHTALEN; AKAN; HWANG, 2012).

$$Q = C I A \quad (3)$$

Na Tabela 9 são apresentados os dados de precipitação, além da vazão pico e o volume aproximado que poderia representar a coleta da água de chuva durante o tempo de precipitação. Foi utilizado um coeficiente de escoamento C de 0.85, atribuído ao uso do solo como estacionamento.

Tabela 9 - Características de precipitação e volume estimado para cada coleta.

Coleta	Data de coleta	Precipitação (mm)	Tempo de precipitação (min.)	Intensidade média I ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	Vazão de pico Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Volume estimado (L)
1	08/08/2016	15,3	46	12,9	0,0036	9918,65
2	15/08/2016	13,7	54	15,2	0,0042	13708,26
3	17/08/2016	2,7	12	13,5	0,0038	2701,63
4	19/08/2016	6,6	26	15,2	0,0042	6603,98
5	13/09/2016	5,4	16	20,3	0,0056	5403,26
6	19/09/2016	8,8	30	17,6	0,0049	8805,31

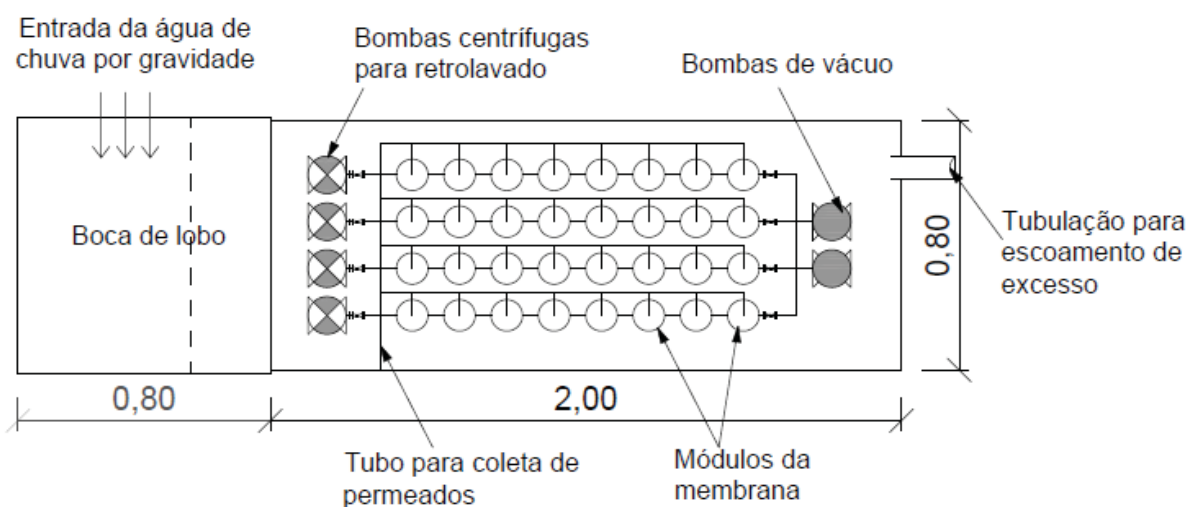
Os dados de precipitação e tempo de precipitação correspondem ao intervalo desde a instalação do sistema de coleta até o dia e hora em que foi retirado para levar a água de chuva ao laboratório. No entanto, para avaliar o potencial volumétrico da área escolhida visando à instalação de um sistema de aproveitamento de água de chuva, devem ser feitas análises hidrológicas considerando a intensidade média da chuva, duração da precipitação, a localização geográfica e os diferentes intervalos de retorno.

Ghisi e Ferreira (2007) determinaram o perfil de consumo de água num conjunto residencial de três blocos na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Os autores observaram que a demanda média é de 172,3 litros por capita por dia. Na descarga de bacias sanitárias e atividades de limpeza o consumo médio é de 32,8 e 1,9 litros por capita por dia, ou seja, um volume de 34.7 litros que poderia ser substituído com água de chuva coletada em solo, após de tratamento.

De acordo aos volumes que foram estimados e mostrados na Tabela 9, o volume da coleta 2 (máximo) poderia atingir o consumo diário de 395 pessoas, enquanto com o valor da coleta 3 (mínimo), seriam atingidas 77 pessoas, em atividades que não precisam de potabilização. É necessário determinar o perfil de consumo da população que se deseje abordar. Li, Boyle e Reynolds (2010), apontam que atividades como lavagem de carros e rega de jardins, poderiam levar o 12% do consumo por capita por dia. Isto revela um grande potencial de oferta para sistemas de aproveitamento de água de chuva coletada em superfícies de solo.

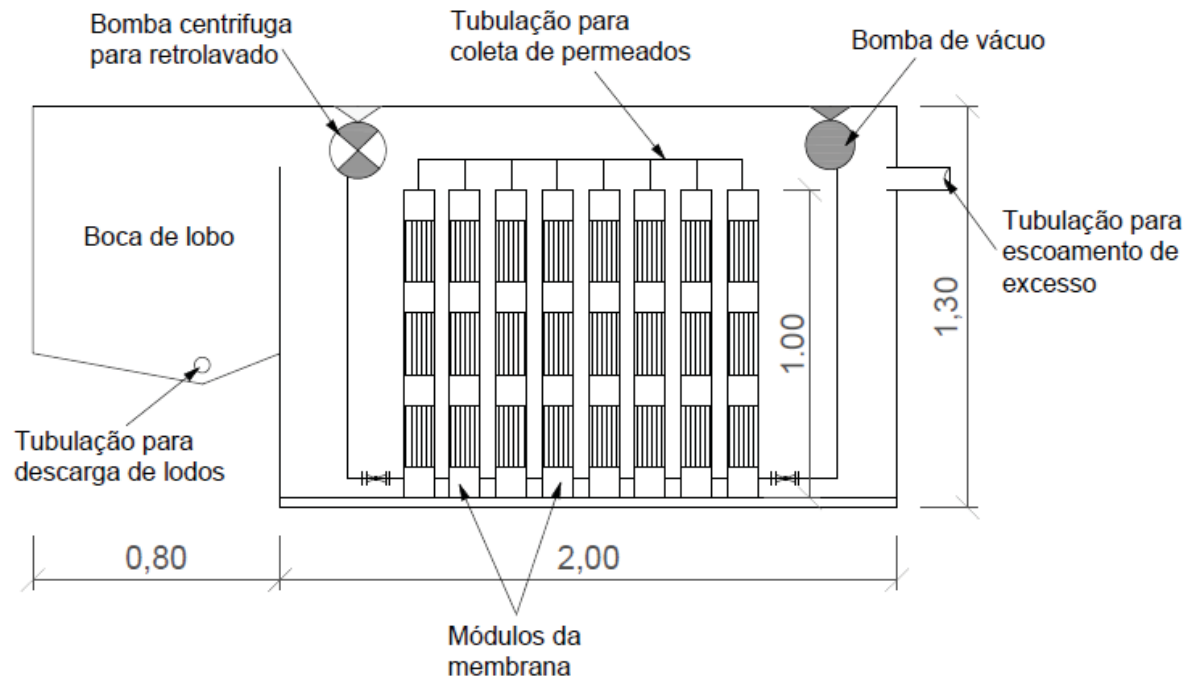
Um sistema de tratamento com a membrana de UF foi proposto para o máximo volume estimado de 13708,26 L (coleta 2). Com um tempo de filtração de 12 horas e um fluxo médio de $100 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ é necessária uma área de membrana de 11 m^2 . Assim, com um módulo de membrana de 1 m de comprimento, 23 módulos seriam necessários no total. O diagrama básico do sistema é mostrado na Figura 28 e Figura 29.

Figura 28 - Diagrama do sistema de tratamento por UF de água de chuva coletada em solo



Fonte: Próprio autor (2016).

Figura 29 - Seção transversal do sistema de tratamento por UF de água de chuva coletada em solo



Fonte: Próprio autor (2016).

Como é observado, o sistema de tratamento precisa apenas de uma área de $1,6 \text{ m}^2$. Com uma taxa média de recuperação da UF de 78,9% (Tabela 6), o volume de água tratada seria de 10.823 L. Com esse valor, poderia ser analisada a possibilidade de uso em ambientes urbanos, a contribuição para os corpos de água superficiais ou ambas opções.

No entanto, é necessária uma análise mais detalhada, considerando as variáveis de precipitação, variáveis hidráulicas do sistema, consumo de energia, técnicas complementares, armazenamento e distribuição da água tratada.

5 CONCLUSÕES

O aproveitamento de água de chuva coletada em superfícies de solo é uma excelente alternativa para uso em atividades não potáveis e para o controle de poluição que atinge os corpos de água. Isto contribui à redução de riscos por inundação na infraestrutura urbana e na população, além de aumentar a oferta de água.

Os processos de MF e UF permitem adequar a nível físico-químico água de chuva coletada em superfícies de tráfego para seu uso em atividades não potáveis tais como descarga de bacias sanitárias, irrigação, atividades recreativas, proteção contra incêndios, lavagem de carros, navegação e harmonia paisagística. As eficiências de rejeição em sólidos suspensos, turbidez, cor, coliformes totais e termotolerantes, estão além do 90%. No entanto, devem ser avaliados procedimentos complementares para a desinfecção dessa água, segundo os limites de avaliação, descartando qualquer risco na saúde dos usuários.

As concentrações de cor, turbidez, óleos e graxas, coliformes e metais pesados como cádmio, cromo, cobre e ferro, apresentaram concentrações elevadas em comparação com outros trabalhos relacionados. A utilização de zonas com a influência de tráfego automotivo implica uma caracterização detalhada e a avaliação de possíveis fontes poluidoras para atingir os padrões de qualidade e evitar riscos na população e o ambiente.

Com a água de chuva tratada através das membranas de MF e UF, é possível reduzir a carga poluidora que atinge os corpos de água superficiais e enquadrar ela na classe 3 e 4, segundo a classificação brasileira. No entanto, é necessária a avaliação de outros parâmetros orgânicos e inorgânicos para sua completa aplicação. Além disso, devem-se avaliar técnicas complementares para a redução de concentrações em metais pesados, as quais não são facilmente realizáveis mediante a MF e UF.

As diretrizes para avaliação da qualidade do permeado, foram em sua maioria para água de reúso. Isto mostra uma carência na pesquisa do potencial da água de chuva e seus tratamentos, dependendo o uso final. É necessária uma participação integral dos órgãos governamentais competentes para orientar e incentivar o uso e tratamento dessas águas.

Perspectivas para futuros trabalhos:

- a) Sistema de armazenamento e distribuição para funcionamento contínuo;
- b) Viabilidade econômica detalhada, para usos urbanos ou para gerenciamento de corpos de água superficiais.
- c) Avaliação do desempenho de membranas de UF com Osmose Reversa, no tratamento dos escoamentos de água de chuva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLA, F. A.; AL-SHAREEF, A. W. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. **Desalination**, v. 243, n. 1-3, p. 195-207, jul. 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527: Água de chuva -Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ANDERSON, B. S. et al. Bioswales reduce contaminants associated with toxicity in urban stormwater. **Environmental Toxicology and Chemistry**. v. 9999, n. 9999, p. 1-11, abr. 2016.
- ANDRADE N., Cícero Onofre. Aproveitamento imediato da água de chuva. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 73-86, mar. 2013.
- APHA; AWWA; WEF - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington: APHA; AWWA; WEF, 1999.
- AREERACHAKUL, N. et al. Submerged membrane system with biofilter as a treatment to rainwater. **Water, Air, & Soil Pollution: Focus**, v. 9, n. 5-6, p. 431-438, dez. 2009.
- ARNAL, J. M. et al. Design and installation of a decentralized drinking water system based on ultrafiltration in Mozambique. **Desalination**, Nottingham, v. 250, n. 2, p. 613-617, jan. 2010.
- ARYAL, Rupak, et al. Urban stormwater quality and treatment. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 27, n. 5, p. 1343-1359, set. 2010.
- BAEK, S. S. et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach. **Water research**, v. 86, p. 122-131, dez. 2015.
- BARNETT, T. et al. The effects of climate change on water resources in the west: Introduction and overview. **Climatic Change**, Amsterdam, v. 62, n. 1, p. 1-11, 2004.
- BENKAHLA, Y. K. et al. Cake growth mechanism in cross-flow microfiltration of mineral suspensions. **Journal of Membrane Science**, v. 98, n. 1, p. 107-117, jan. 1995.
- BIRCH, G. F.; FAZELI, M. S.; MATTHAI, C. Efficiency of an infiltration basin in removing contaminants from urban stormwater. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 101, n. 1, p. 23-38, jan. 2005.
- BOTELHO, M. **Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nas cidades**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- BRASIL. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Institui o Código Civil. **Lex**: coletânea de legislação: edição federal, Brasília, 2002.

BROWN, J. N.; PEAKE, B. M. Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff. **Science of the total environment**, v. 359, n. 1-3, p. 145-155, abr. 2016.

BROWN, R. C.; PIERCE, R. H.; RICE, S. A. Hydrocarbon contamination in sediments from urban stormwater runoff. **Marine Pollution Bulletin**, v. 16, n. 6, p. 236-240, jun. 1985.

CÂMARA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. Projeto de lei complementar nº 1.231, de 2013. **Lex**: coletânea de legislação e jurisprudência, Florianópolis, 2006.

CHIU, Y.; LIAW, C; CHEN, L. Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. **Renewable Energy**, Oxford, v. 34, n. 3, p. 492-498, mar. 2009.

CHU, L.; LI, S. Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 51, n. 2, p. 173-179, set. 2006.

CHURCH, S. Exploring Green Streets and rain gardens as instances of small scale nature and environmental learning tools. **Landscape and Urban Planning**, Michigan, v. 134, p. 229-240, fev. 2015.

COMISSÃO EUROPEIA. **Water reuse in Europe. Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2014.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução N° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Lex**: coletânea de legislação, Brasília, 2005.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução N° 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Lex**: coletânea de legislação, Brasília, 2011.

CROW, J.; BARDILL, J.; BAYLISS, R. **The Water Supply of Byzantine Constantinople**. Londres: Society for the Promotion of Roman Studies, 2008.

DANNECKER, W.; AU, M.; STECHMANN, H. Substance load in rainwater runoff from different streets in Hamburg. **Science of the total environment**, v. 93, p. 385-392, abr. 1990.

DEC-NSW – DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND CONSERVATION NEW SOUTH WALES. **Managing urban stormwater: Harvesting and reuse**. Sydney: DECNSW, 2006.

DOBROWSKY, P. H. et al. Efficiency of Microfiltration Systems for the Removal of Bacterial and Viral Contaminants from Surface and Rainwater. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 226, n. 3, p. 1-14, mar. 2015.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices**. Washington: EPA, 1999.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for water reuse**. Cincinnati: EPA, 2004.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Membrane filtration guidance manual**. Cincinnati: EPA, 2005.

FANE, A. G. Membranes for water production and wastewater reuse. **Desalination**, Perth, v. 106, n. 1-3, p. 1-9, ago. 1996.

FIORI, Simone. **Avaliação qualitativa e quantitativa do potencial de reúso de água cinza em edifícios residenciais multifamiliares**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

FUNASA - FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual prático de análise de água**. 1. ed. Brasília: FUNASA, 2004.

FURUMAI, H. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 33, n. 5, p. 340-346, fev. 2008.

GAO, W. et al. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review. **Desalination**, v. 272, n. 1-3, p. 1-8, mai. 2011.

GHISI, Eneidir; FERREIRA, Daniel. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, n. 7, p. 2512-2522, jul. 2007.

GHISI, E.; MONTIBELLER, A.; SCHMIDT, R. W. Potential for potable water savings by using rainwater: An analysis over 62 cities in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 204-210, fev. 2006.

GÖBEL, P.; DIERKES, C.; COLDEWEY, W. G. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 26-42, abr. 2007.

GOOGLE INC. Google Earth. Versão 7.1.5.1557. [Sem título]. Google Inc., 2005.

GOULD, J.; NISSEN-PETERSEN, E. **Rainwater catchment systems for domestic supply: Design, construction and implementation**. London: ITDG Publishing, 1999.

GUEST, R. M. et al. Zinc-sulphate-heptahydrate coated activated carbon for microbe removal from stormwater. **Water Science and Technology**, v. 66, n. 7, p. 1582-1589, ago. 2012

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HALL, M. S. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon: determination (PAHs) transported by storm water drainage in the Pelotas region and its levels in São Gonçalo Channel. **Chimica Oggi-Chemistry Today**, v. 34, n. 2, p. 17-21, mar. 2016.

HELMREICH, B.; HORN, H. Opportunities in rainwater harvesting. **Desalination**, Nottingham, v. 248, n. 1-3, p. 118-124, nov. 2009.

HERRMANN, T; SCHMIDA, U. Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. **Urban Water**, London, v. 1, n. 4, p. 307-316, dez. 2000.

HOGAN, C. Bioswale. **The Encyclopedia of Earth**, abr. 2010. Disponível em: <<http://www.eoearth.org/view/article/150668/>>. Acesso em: 28 out. 2015.

HOUGHTALEN, R.; AKAN, O.; HWANG, N. **Engenharia hidráulica**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

JONES, M.; HUNT, W. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. **Resources, Conservation & Recycling**, Utrecht, v. 54, n. 10, p. 623-629, ago. 2010.

KHAN, S. et al. Oil and grease measurement in highway runoff—Sampling time and event mean concentrations. **Journal of Environmental Engineering**, v. 132, n. 3, p. 415-422, mar. 2006.

KIM, R.; LEE, S.; KIM, J. Application of a metal membrane for rainwater utilization: filtration characteristics and membrane fouling. **Desalination**, v. 177, n. 1-3, p. 121-132, jun. 2005.

KIM, R. H. et al. Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. **Desalination**, v. 202, n. 1-3, p. 326-332, jan. 2007.

KIMURA, K. et al. Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water. **Water research**, v. 38, n. 14, p. 3431-3441, ago. 2004.

LATIMER, J. S. et al. Sources of petroleum hydrocarbons in urban runoff. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 52, n. 1, p. 1-21, jul. 1990.

LECHEVALLIER, M.; AU, K. **Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water**. London: IWA Publishing, 2004.

LI, X.; XIE, Z.; YAN, X. Runoff characteristics of artificial catchment materials for rainwater harvesting in the semiarid regions of China. **Agricultural Water Management**, Califórnia, v. 65, n. 3, p. 211-224, mar. 2004.

LI, Z.; BOYLE, F.; REYNOLDS, A. Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. **Desalination**, Nottingham, v. 260, n. 1-8, p. 1-8, set. 2010.

LIAW, C. H. et al. The Application of Flat Ultra-Filtration for Rainwater Reuse. In: INTERNATIONAL RAINWATER CATCHMENT SYSTEMS CONFERENCE: "RAINWATER HARVESTING TO COPE WITH CLIMATE CHANGE", 14., 2009, Kuala Lumpur. **Anais eletrônicos...** Kuala Lumpur: IRCSA, 2009. Disponível em: <<http://www.eng.warwick.ac.uk/ircsa/pdf/14th/papers/P1-4%20Liaw.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2015.

MARM - MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. **Guía para la aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas**. Madrid: MARM, 2010.

McQUEEN, A. et al. Campus parking lot stormwater runoff: Physicochemical analyses and toxicity tests using *Ceriodaphnia dubia* and *Pimephales promelas*. **Chemosphere**, v. 79, n. 5, p. 561-569, abr. 2010.

MELO, Luciano Rebello da Cunha. **Variação da qualidade da água de chuva no início da precipitação**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental; Meio Ambiente; Recursos Hídricos e Hidráulica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: Uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MIORANDO, Taizi. **Potabilização de água da chuva por ultrafiltração**. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

MUSCHACK, W. Road runoff - a diffuse source of water pollution. **Vom Wasser**, v. 72, p. 267-282, 1989.

MUSCHACK, W. Pollution of Street Run-Off by Traffic and Local Conditions. **The Science of the Total Environment**, Devon, v. 93, p. 419-431, abr. 1990.

NADDEO, V.; SCANNAPIECO, D.; BELGIORNO, V. Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment. **Journal of Hydrology**, v. 498, 287-291, ago. 2013.

NATIONAL CONFERENCE OF STATE LEGISLATURES. **State Rainwater: Graywater Harvesting Laws and Legislation**. 2013. Disponível em: <<http://www.ncsl.org/research/environment-and-natural-resources/rainwater-harvesting.aspx#tx>>. Acesso em: 23 out. 2015.

NOLDE, E. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. **Desalination**, Marrakech, v. 215, n. 1-3, p. 1-11, set. 2007.

OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Guidelines for Drinking-water Quality**. 4. ed. Geneva: WHO Press, 2011.

PAUL, A. N.; AITKEN, D.; ANTIZAR-LADISLAO, B. Stormwater quality performance of a macro-pervious pavement car park installation equipped with channel drain based oil and silt retention devices. **Water research**, v. 47, n. 20, p. 7327-7336, dez. 2013.

PETER-VARBANETS, M. et al. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. **Water Research**, Lyngby, v. 43, n. 2, p. 245-265, fev. 2009.

PNUMA - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Every drop counts: Environmentally Sound Technologies for Urban and Domestic Water Use Efficiency**. Osaka/Shiga: TU Delft, 2008.

PORTER, M. Ultrafiltration. In: PORTER, M. **Handbook of Industrial Membrane Technology**. Westwood: Noyes Publications, 1990. p. 136-259.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Decreto nº 293, de 22 de março de 2006. Regulamenta a lei Nº 10.785/03 e dispõe sobre os critérios do uso e conservação racional da água nas edificações e dá outras providências. **Lex**: coletânea de legislação e jurisprudência, Curitiba, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PASSO FUNDO. Lei complementar nº 198, de 17 de janeiro de 2008. Cria o ‘Programa uso racional da água’ no município de passo fundo e dá outras providências. **Lex**: coletânea de legislação e jurisprudência, Passo Fundo, 2008.

REDDY, K. R.; XIE, T.; DASTGHEIBI, S. Nutrients removal from urban stormwater by different filter materials. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 225, n. 1, p. 1-14, nov. 2013.

REDDY, K. R.; XIE, T.; DASTGHEIBI, S. Removal of heavy metals from urban stormwater runoff using different filter materials. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 2, n. 1, p. 282-292, mar. 2014a.

REDDY, K. R.; XIE, T.; DASTGHEIBI, S. PAHs removal from urban storm water runoff by different filter materials. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 18, n. 2, p. 1-6, abr. 2014b.

REDDY, K. R.; XIE, T.; DASTGHEIBI, S. Mixed-Media Filter System for Removal of Multiple Contaminants from Urban Storm Water: Large-Scale Laboratory Testing. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 18, n. 3, p. 1-8, jul. 2014c.

REDDY, K. R.; XIE, T.; DASTGHEIBI, S. Evaluation of biochar as a potential filter media for the removal of mixed contaminants from urban storm water runoff. **Journal of Environmental Engineering**, v. 140, n. 12, p. 1-10, dez. 2014d.

REVISTA FATOR BRASIL. Gramado do “Engenhão” será irrigado com água de chuva. **Revista Fator Brasil**, jul. 2007. Disponível em: <http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=14571>. Acesso em: 08 mar. 2016.

REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL E SUSTENTABILIDADE. Whirlpool investe no uso inteligente da água. **Revista meio ambiente industrial e sustentabilidade**, mar. 2015. Disponível em: <<http://rmai.com.br/whirlpool-investe-no-uso-inteligente-da-agua/>>. Acesso em: 08 mar. 2016.

REVISTA MEIO FILTRANTE. Loja autorizada da Peugeot instala sistema para o reaproveitamento da água de chuva da Supergreen. **Revista Meio Filtrante**, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=2493&link=noticias>>. Acesso em: 08 mar. 2016.

REVISTA TAE. Guarulhos usa água da chuva para lavar veículos da frota municipal. **Revista TAE**, nov. 2010. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=1097&genero=4>>. Acesso em: 08 mar. 2016.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Decreto nº 23.430, de 24 de outubro de 1974. Aprova Regulamento que dispõe sobre a promoção, proteção e recuperação da Saúde Pública. **Lex:** coletânea de legislação e jurisprudência, Porto Alegre, 1974.

SÃO FRANCISCO (Estado). **On-site Non-potable Water Use: Guide for the collection, treatment, and reuse of alternate water supplies in San Francisco**. São Francisco: San Francisco Public Utilities Commission, 2012.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 12.526, de 02 de janeiro de 2007. Estabelece normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais. **Lex:** coletânea de legislação e jurisprudência, São Paulo, 2007.

SAMPER, B. Bioswale. **Wordpress**, mar. 2013. Disponível em: <<https://blakesamper.files.wordpress.com/2013/03/bioswale.jpg>>. Acesso em: 04 dez. 2016.

SAUTCHUK, Carla et al. **Conservação e reúso da água em edificações**. São Paulo: ANA - Agência Nacional de Águas; SindusCon-SP - Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo; FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2005.

SCOTT, K. **Handbook of Industrial Membranes**. Oxford: Elsevier Science, 1998.

SHAH, Tushaar et al. Sustaining Asia's groundwater boom: An overview of issues and evidence. **Natural Resources Forum**, v. 27, n. 2, p. 130-141, 2003.

SONG, Lianfa. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modeling of membrane fouling. **Journal of membrane science**, v. 139, n. 2, p. 183-200, fev. 1998.

STOTZ, G. Investigations of the properties of the surface water run-off from federal highways in the FRG. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 59, p. 329-337, 1987.

STRATHMANN, H. Membrane separation processes. **Journal of Membrane Science**, Amsterdam, v. 9, n. 1-2, p. 121-189, 1981.

STURM, M. et al. Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. **Physics and Chemistry of the Earth, Partes A/B/C**, v. 34, n. 13, p. 776-785, 2009.

SUN, S. et al. Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment. **Water research**, v. 85, 432-442, nov. 2015.

THOMAS, R. et al. Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices. **Journal of Cleaner Production**, Tennessee, v. 75, p. 166-173, jul. 2014.

TOMAZ, Plínio. **Aproveitamento de água de chuva**. 2. ed. São Paulo: Navegar Editora, 2005.

TROWSDALE, S. A.; SIMCOCK, R. Urban stormwater treatment using bioretention. **Journal of Hydrology**, v. 397, n. 3-4, p. 167-174, fev. 2011.

UREÑA, J. La ordenación de los espacios fluviales en las ciudades. In: DE LA CAL, P.; PELLICER, F. (Coord.). **Ríos y ciudades**. Zaragoza: Institución “Fernando el Católico”, 2002. p. 45-63.

VOGEL, J. R.; MOORE, T. L. Urban Stormwater Characterization, Control, and Treatment. **Water Environment Research**, v. 88, n. 10, p. 1918-1950, oct. 2016.

WAGNER, J. **Membrane Filtration Handbook**. 2. ed. Minnetonka: Osmonics, 2001.

WALTER, M.F., STEENHUIS, T.S., HAITH, D.A. Nonpoint source pollution control by soil and water conservation practices. **Transactions of the ASAE**, v. 22, p. 834–840, 1979.

YAMAMURA, H.; KIMURA, K.; WATANABE, Y. Mechanism involved in the evolution of physically irreversible fouling in microfiltration and ultrafiltration membranes used for drinking water treatment. **Environmental science & technology**, v. 41, n. 19, p. 6789-6794, ago. 2007.

YU, J.; YU, H.; XU, L. Performance evaluation of various stormwater best management practices. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 9, p. 6160-6171, abr. 2013.

ZHANG, Mulan et al. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 1, p. 40-46, jan. 2010.

ZHU, Kun et al. Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. **Journal of arid environments**, v. 57, n. 4, p. 487-505, jun. 2004.