



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Érika Lorena de Oliveira Carvalho Ribeiro

**Perlita como adsorvente: avaliação da remoção de óleo de
efluente gerado em área de lavagem de veículos**

Rio de Janeiro

2019

Érika Lorena de Oliveira Carvalho Ribeiro

**Perlita como adsorvente: avaliação da remoção de óleos e graxas de
efluente gerado em área de lavagem de veículos**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dra. Daniele Maia Bila

Coorientadora: Prof.^a Dra. Fabíola Dias da Silva Curbelo

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

R484 Ribeiro, Érika Lorena de Oliveira Carvalho.
Perlita como adsorvente: avaliação da remoção de óleos e graxas de efluente gerado em área de lavagem de veículos / Érika Lorena de Oliveira Carvalho Ribeiro. – 2019.
98f.

Orientadora: Daniele Maia Bila.
Coorientadora: Fabíola Dias da Silva Curbelo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Água - Purificação - Tratamento biológico - Teses. 3. Água - Reuso - Teses. 4. Adsorção – Teses. I. Bila, Daniele Maia. II. Curbelo, Fabíola Dias da Silva. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.16

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Érika Lorena de Oliveira Carvalho Ribeiro

Perlita como adsorvente: avaliação da remoção de óleo de efluente gerado em área de lavagem de veículos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 05 de setembro de 2019.

Banca examinadora:

Prof.^a Dra. Daniele Maia Bila (Orientadora)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Prof.^a Dra. Fabíola Dias da Silva Curbelo (Coorientadora)

Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Prof. Dr. Alfredo Ismael Curbelo Garnica

Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Prof.^a Dra. Letícia Sobral Maia dos Santos Lima

Centro Universitário Carioca - Unicarioca

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, por minha vida e por ser autor do meu destino e à minha avó por ter dado tanto amor a mim e a meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Santíssima Trindade por estarem do meu lado, por me sustentarem sempre, por provarem que o que é impossível para mim, sempre foi possível para Eles.

A minha amada avó Estherlita, aos meus irmãos, aos meus pais e minha ótimadrasta por me ampararem em todos os momentos de angústia e por me trazerem as alegrias da vida. A minha família, pelo apoio constante.

A minha pimpolha, Amora, que é minha companhia diária, por tanto amor e parceria, por ter devolvido sentido à vida.

A meus amigos Ana Carolina Rodrigues, Andreia Peters, Carolina Paixão, Cláudia e Daniel Guimarães (em memória), Debora Ramos, Erick Lorenzato, Gisele Borges (e minha segunda família), Gláucia Almeida, Ingrid Rosa, José Luis Pires, Keila Klem, Larisse Saraiva, Laiza Molezon, Liliana François, Lívia Ganem, Luciene Stivanin, Luiz Losp, Nayla Felizardo, Paula Goulart, Regina Céli (em memória), Solange Souza, Tayani Ferreira, Thais Soares, Thiago Lemos (Mineiro), Úrsula Souza por terem contribuído para o que eu sou hoje. Como diria Vinicius de Moraes “Não fazemos amigos, reconhecemo-os”.

Aos amigos feitos no INEA, em especial á GELIN, por dividirem comigo os prazeres e dores de se trabalhar na área ambiental.

A Gerência de Análises Laboratoriais (GELAB) e Gerência de Informações Hidrometeorológicas e de Qualidade das Águas (GEIHQ) pela contribuição na realização dos experimentos, em especial aos analistas Cláudio e Paula, que tanto contribuíram para a elaboração das análises iniciais.

Aos professores do PEAMB pela colaboração e apoio ao longo das atividades desenvolvidas, em especial ao professor Júlio Forte, Marcia Marques, Ubirajara Mattos por todo apoio ao longo desses meses. Ao professor Aldo Fernandes e Técnica Bianca da UFRJ.

Aos professores Fabíola e Alfredo Curbelo por terem acolhido minha pesquisa com tanto carinho e dedicação.

A UERJ e a UFPB, professores, técnicos, alunos (Stella, Louise e Victor (UERJ), Rafael, Tarsila, Wendell (UFPB)) por terem me recebido e permitido a realização dos experimentos.

A minhas orientadoras Daniele Bila e Fabíola Curbelo pela contribuição ao longo deste trabalho.

A todos os que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação, o meu reconhecimento.

É que tem mais chão nos meus olhos do que cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça.

Cora Coralina

RESUMO

RIBEIRO, Érika Lorena de Oliveira Carvalho. **Perlita como adsorvente**: avaliação da remoção de óleo de efluente gerado em área de lavagem de veículos. 2019. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

A atividade de lavagem de veículos é geradora de grandes volumes de efluente contendo em sua maioria óleos e graxas, MBAS e sólidos. O sistema de tratamento usual gera efluentes de purga do sistema, da retrolavagem dos filtros, o que o torna oneroso. A adsorção surge como uma alternativa para minimizar esses custos. Compostos que possuem em sua composição silicato de alumínio, como a perlita, em geral, são bons adsorventes. A perlita é um aluminossilicato muito poroso, de baixo custo e fácil de obter, térmica e quimicamente inerte, com mineração e transporte realizados de forma sustentável. Esse mineral torna-se um resíduo após ser removida de tanques criogênicos. O objetivo deste trabalho foi reutilizar a perlita como adsorvente no processo de adsorção como uma alternativa para o tratamento de efluentes de lavagem de veículos. A metodologia do trabalho consistiu na caracterização do adsorvente pelos métodos BET, Termogravimetria; na elaboração do efluente sintético por meio de óleo de motor, ácido clorídrico, NaCl e detergente; e na realização de banho finito de acordo com a Norma ASTM D 3860/98, onde diferentes massas da perlita foram colocadas em contato com o efluente sintético de concentração conhecida. Para avaliar a concentração final do óleo no efluente sintético, foi realizada a confecção de uma curva de calibração e por fim a leitura no espectrofotômetro das concentrações finais. Dessa forma foi possível obter os parâmetros do modelo experimental. O modelo de Freundlich foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Com base na equação deste modelo, a quantidade de perlita a ser utilizada para atender aos requisitos do processo de tratamento de água de lavagem foi estimada para uma empresa que realiza 80 lavagens de veículos por dia. A quantidade de perlita a ser usada para tratar cerca de 21 m³ por dia será de aproximadamente 319 kg perlita por dia. De acordo com os resultados obtidos no método BET, foi possível estimar a área superficial da perlita em 2,47m².g⁻¹, seu tamanho de poro em 776,36 Å e volume de poros em 1,892.10⁻³ cm³.g⁻¹, sendo a taxa de adsorção de 0,06459 g.g⁻¹. Pelo método da termogravimetria foi possível estimar as fases de decomposição térmica da perlita em 90°C a 190°C devido a perda de água e em 310°C a 355°C devido a transformação de fase de algum dos elementos da perlita ou deshidroxilação de estruturas.

Palavras-chave: Óleos e graxas; Reutilização de água de lavagem; Reutilização de resíduos.

ABSTRACT

RIBEIRO, Érika Lorena de Oliveira Carvalho. **Perlite as adsorbent**: evaluation of the removal of oil from effluents in vehicle washing area. 2019. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The vehicle washing activity generates large volumes of effluent containing mostly oils and greases, MBAS and solids. The usual treatment system generates system purge effluents from filter backwashing, which makes it costly. Adsorption is an alternative to minimize these costs. Compounds that have aluminum silicate in their composition, such as perlite, are generally good adsorbents. Perlite is a very porous, low cost, easy to obtain, thermally and chemically inert aluminosilicate, with sustainable mining and transportation. This mineral becomes a residue after being removed from cryogenic tanks. The objective of this work was to reuse the perlite as adsorbent in the adsorption process as an alternative for the treatment of vehicle wash effluents. The methodology of the work consisted in the characterization of the adsorbent by the methods BET, Thermogravimetry; in the preparation of synthetic effluent by means of motor oil, hydrochloric acid, NaCl and detergent; and in the realization of a finite bath according to ASTM D 3860/98, where different masses of perlite were placed in contact with the synthetic effluent of known concentration. To evaluate the final concentration of the oil in the synthetic effluent, a calibration curve was made and finally the final concentration spectrophotometer reading. Thus it was possible to obtain the parameters of the experimental model. Freundlich's model best fit the experimental data. Based on the equation of this model, the amount of perlite to be used to meet the requirements of the wash water treatment process has been estimated for a company that performs 80 vehicle washes per day. The amount of perlite to be used to treat about 21 m³ / day will be approximately 319 kg perlite per day. According to the results obtained in the BET method, it was possible to estimate the surface area of the perlite at 2.47m².g⁻¹, its pore size at 776.36 Å and pore volume at 1.892.10⁻³ cm³.g⁻¹. , with the adsorption rate being 0,06459g.g⁻¹. By the thermogravimetry method it was possible to estimate the thermal decomposition phases of the perlite at 90 ° C to 190 ° C due to water loss and at 310 ° C to 355 ° C due to phase transformation of any of the elements of perlite or dehydroxylation. structures.

Keywords: Oils and Greases; Reuse of washing water; Waste reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de lavagem tipo Túnel.....	19
Figura 2 – Sistema de lavagem tipo “rollover”.....	20
Figura 3 – Sistema de tradicional com jato manual.....	21
Figura 4 – Aumento da frota de automóveis do Município do Rio de Janeiro nos últimos dez anos.....	22
Figura 5 – Formação de micela.....	30
Figura 6 – Micela.....	30
Figura 7 – Esquema representativo de sistema de tratamento de efluentes contendo água e óleo.....	32
Figura 8 – Sistema de tratamento e reuso de água de lavagem de veículos.....	33
Figura 9 – Aproveitamento dos resíduos sólidos.....	38
Figura 10 – Variações possíveis da perlita (natural, semiexpandida e expandida).....	39
Figura 11 – Processo de beneficiamento da perlita.....	40
Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da perlita natural.....	41
Figura 13 – Reação do grupo SiOH em meio ácido.....	43
Figura 14 – Reação do grupo SiOH em meio alcalino.....	43
Figura 15 – Representação esquemática de diferentes grupos silanóis da perlita.....	44
Figura 16 – Dispositivo de segurança do tanque externo.....	45
Figura 17 – Experimentos para determinação dos dados de equilíbrio de adsorção...	53
Figura 18 – Isoterma de adsorção.....	54
Figura 19 – Dosagem do Adsorvente.....	55
Figura 20 – Formas possíveis de isotermas de adsorção.....	55
Figura 21 – Características dos Adsorventes.....	63
Figura 22 – Esquema representativo da adsorção gasosa na superfície.....	64
Figura 23 – Classificação das isotermas de acordo com a IUPAC.....	65
Figura 24 – Fluxograma representativo da metodologia do trabalho.....	67
Figura 25 - Porosímetro - ASAP 2020.....	70
Figura 26 – Preparo de água produzida.....	71
Figura 27 – Ensaio em banho finito.....	73
Figura 28 – Transferência da água produzida.....	74
Figura 29 – Suspensão de perlita.....	75

Figura 30 – Adição de clorofórmio e agitação da solução.....	76
Figura 31 – Ensaio BET.....	78
Figura 32 – Curva termogravimétrica de decomposição da perlita.....	79
Figura 33 – pH inicial em função de diversos tempos de agitação.....	81
Figura 34 – Diferença entre pH final e pH inicial em função do pH inicial.....	81
Figura 35 – Espectro de Varredura Óleo Selenia.....	82
Figura 36 – Curva de calibração do óleo Selenia Perform 5W – 30 API SN.....	82
Figura 37 – Espectro de varredura do detergente comercial.....	83
Figura 38 – Espectro de varredura perlita/água produzida.....	84
Figura 39 – Isoterma de Adsorção Modelo de Langmuir.....	85
Figura 40 – Isoterma de Adsorção Modelo de Frenluich.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Solventes e reagentes utilizados.....	68
Quadro 2 – Equipamentos utilizados durante os procedimentos experimentais.....	68
Quadro 3 – Parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vazão e capacidade para os processos de lavagem de veículos.....	21
Tabela 2 – Frota de veículos do município do Rio de Janeiro por ano de fabricação.	23
Tabela 3 – Resultados de análises de efluente bruto de lavagem de veículos.....	24
Tabela 4 – Dados de produção nacional de vermiculita e perlita em 2005.....	40
Tabela 5 – Composição Química da Perlita.....	42
Tabela 6 – Propriedades físico-química da perlita de acordo com a FISPQ.....	42
Tabela 7 – Caracterização de adsorventes obtida na literatura.....	78
Tabela 8 – Caracterização da perlita (experimento).....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
pHzpc	Ponto de Zero Carga
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
U.S.EPA	United States Environmental Protection Agency
NBR	Norma Brasileira
TOG	Teores de Óleos e Graxas
MBAS	Substâncias Ativas ao Azul de Metileno
OG	Óleos e Graxas
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
EPA	Environmental Protection Agency
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
DETRAN	Departamento de Trânsito do Estado do Rio De Janeiro
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
COT	Carbono Orgânico Total
DQO	Demanda Química de Oxigênio
SST	Sólidos Suspensos Totais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ABS	Aquil Benzeno Sulfonado
LAS	Aquil Benzeno Sulfonado de Cadeias Lineares
CSAO	Caixa Separadora de Água e Óleo
TG	Termogravimetria
DTG	Termogravimetria Derivada
DTA	Análise Térmica Diferencial
IUPAC	International Union Of Pure And Applied Chemistry
BET	Brunauer, Emmett e Teller

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
OBJETIVOS.....	16
1 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
1.1 LEGISLAÇÃO.....	17
1.1.1 <i>Legislação pertinente ao reuso de efluentes.....</i>	<i>17</i>

1.1.2	<i>Legislação aplicável a reutilização de resíduos.....</i>	<i>18</i>
1.2	SISTEMAS DE LAVAGEM DE VEÍCULO.....	19
1.3	EFLUENTES LÍQUIDOS.....	23
1.3.1	<i>Caracterização de efluentes da lavagem de veículos.....</i>	<i>24</i>
1.3.1.1	Óleos e graxas (OG).....	27
1.3.1.2	Surfactantes.....	29
1.4	TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVAGEM DE VEÍCULOS.....	30
1.4.1	<i>Aspectos do reuso de efluentes de lavagem de veículos.....</i>	<i>34</i>
1.5	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	37
1.6	PERLITA.....	39
1.6.1	<i>Caracterização da perlita.....</i>	<i>41</i>
1.7	ADSORÇÃO.....	47
1.1.2	Fatores que influencia na adsorção em superfície porosa.....	48
1.1.3	Equilíbrio de adsorção.....	52
1.1.4	Modelos de adsorção.....	56
1.1.5	Adsorvente.....	59
1.1.5.1	Tipo de adsorventes.....	59
1.1.5.2	Adsorventes mais utilizados industrialmente.....	60
1.1.5.3	Técnicas analíticas para avaliação de adsorventes.....	62
2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	67
2.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	67
2.2	MÉTODOS.....	68
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89

INTRODUÇÃO

Está previsto no artigo 255 da Constituição Federal de 1.988 que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e a coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para a presente e futuras gerações (BRASIL, 1988). As atividades humanas são geradoras de aspectos ambientais que podem resultar em impactos ambientais. Dentre estes aspectos estão a geração de resíduos e de efluentes.

A legislação do Estado do Rio de Janeiro prevê a obrigatoriedade do reuso de água de lavagem de veículos por meio da Lei 6.034, de 08 de setembro de 2011, que dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-rápidos, transportadoras e empresas de ônibus urbanos intermunicipais e interestaduais a instalarem equipamentos de tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2011).

Os principais poluentes envolvidos na lavagem automotiva são óleos e graxas e surfactantes. No Estado do Rio de Janeiro, de acordo com a NT-202 R.10, o teor de óleo e graxas para lançamento é de 20 mg.L⁻¹ de óleo mineral, 30 mg.L⁻¹ de óleo vegetal e óleo animal, e a concentração de surfactantes deve ser inferior a 2 mg.L⁻¹ (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE, 1986).

A legislação do Estado do Rio de Janeiro prevê a obrigatoriedade do reuso de água de lavagem de veículos por meio da Lei 6.034, de 08 de setembro de 2011, que dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-rápidos, transportadoras e empresas de ônibus urbanos intermunicipais e interestaduais a instalarem equipamentos de tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2011).

Os sistemas convencionais para o tratamento de efluentes gerados em área de lavagem são basicamente constituídos de caixa retentora de areia para reter material sólido grosseiro, caixa separadora de óleo (CSAO) para redução da velocidade do fluxo e retenção da maior parte do óleo livre e uma pequena parcela de óleo emulsionado, filtros e antiespumantes para remoção de surfactantes (SECRON; GIORDANO; FILHO, 2010).

Esses sistemas exigem alta frequência de purga, manutenção e retrolavagem dos filtros. Assim, se faz necessária a otimização para diminuir as paradas do sistema e os custos com sua manutenção. O [processo de adsorção surge como alternativa que pode complementar o tratamento dos efluentes gerados em área de lavagem de](#)

veículos.

O objetivo deste trabalho foi reutilizar a perlita, que é um resíduo gerado por uma indústria química de Volta Redonda no Estado do Rio de Janeiro, como adsorvente no processo de adsorção como uma alternativa para o tratamento de efluente de lavagem gerado em lavagem tipo túnel.

Desta forma, este trabalho tornou-se relevante não só pela disponibilidade de dados experimentais que viabilizam a redução desta fonte de poluição (óleos e graxas), mas também pela contribuição no desenvolvimento da área em estudo e por contribuir com a preservação do meio ambiente.

Nos próximos capítulos estão apresentados os aspectos teóricos do assunto estudado abordando as pesquisas realizadas por outros autores, a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho que são a caracterização da perlita, a elaboração do efluente sintético, os ensaios de adsorção em banho finito, método para determinação da concentração de óleo e graxa e as conclusões obtidas a partir dos resultados deste estudo.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar a aplicação de perlita expandida no tratamento de efluente gerado em área de lavagem de veículos com foco na redução de óleos e graxas e surfactantes.

Objetivos Específicos

- Caracterizar o adsorvente por meio da expansão; análise termogravimétrica; pH de zero carga (pH_{zpc});
- Construir isotermas de adsorção utilizando os modelos de Langmuir e modelo de Freundlich adequando aos dados experimentais;
- Estimar a quantidade de perlita a ser utilizada para atender ao requerimento do processo de tratamento de água de lavagem de veículos;
- Disponibilizar informações para a otimização do tratamento convencional de efluente de lavagem de veículos com posterior reuso.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Legislação

Com base na atual visão mundial sobre gestão de águas, este recurso passa ser considerado “natural e limitado, bem de domínio público e dotado de valor econômico”, sendo alto o custo da água tratada potável (VIVACQUA, 2005).

A aplicação do princípio poluidor-pagador, que atribui ao poluidor o ônus relativo ao combate à poluição e à preservação do meio ambiente, deve ser considerada como forma de garantir o uso racional e a proteção ambiental. Assim, a cobrança implantada nas diferentes regiões e abrangendo todas as bacias hidrográficas estimula a prática do reuso (BORGES, 2003).

1.1.1 [Legislação pertinente](#) ao reuso de efluentes

No cenário mundial, em 1992, a Environmental Protection Agency (EPA) juntamente com a Agency for International Development publicaram o Guidelines for Water Reuse, uma norma que tem por objetivo regular e orientar o reuso em locais onde não há regulamentação para tal prática. O texto aborda processos de tratamento e critérios de qualidade para águas residuárias visando o reuso urbano, industrial e agrícola (MALINOWSKI, 2006).

No Brasil, apesar das primeiras legislações sobre o lançamento de efluente nos corpos hídricos remotarem de 1986, quando a Resolução nº 20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) apresentou os limites máximos de impurezas para cada destino específico da água, apenas em 28 de novembro de 2005 foi elaborada a Resolução N° 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que estabelece as modalidades, diretrizes e critérios gerais que regulamentam e estimulam a prática de reuso direto não potável de água em todo o território nacional. No artigo 3º desta Lei são definidas cinco modalidades de reuso de água, estando o reuso de água na lavagem de veículos previsto na modalidade I – reuso para fins urbanos (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986; CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HIDRICOS, 2005).

A legislação do Estado do Rio de Janeiro prevê o reuso por meio da Lei nº. 6.034,

publicada em 8 de setembro de 2011, que dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-rápidos, transportadoras e empresas de ônibus urbanos intermunicipais e interestaduais, localizados no Estado do Rio de Janeiro, de instalarem equipamentos para tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos. É estabelecido para as empresas, o prazo de 180 dias, a partir da data de publicação (6 de março de 2012), para implantação e aplicação do sistema de tratamento e reutilização da água, estando o infrator sujeito à notificação para instalação dos equipamentos, no prazo máximo de 60 dias, sob pena de multa (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2011).

Apesar da legislação do Estado do Rio de Janeiro abordar questões relativas ao reuso da água de lavagem de veículos, não existe regulamentação quanto aos parâmetros de qualidade da água para reuso (ZANETI; ETCHEPARE; RUBIO, 2011).

O mercado vem adotando critérios estabelecidos na norma NBR 13.969 de setembro de 1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Água de Classe 1, de acordo com essa norma, é aquela “utilizada para lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário” e precisa apresentar os seguintes padrões de qualidade, turbidez menor que 5 uT, coliformes termotolerantes com concentração menor que 200 NMP/100 mL, sólidos dissolvidos totais em concentração menor que 200 mg.L⁻¹, pH entre 6 e 8 e cloro residual com concentração entre 0,5mg.L⁻¹ a 1,5mg.L⁻¹.

1.1.2 [Legislação](#) aplicável a reutilização de resíduos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, “Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências”. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pela administração pública com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. De acordo com o art. 9º, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos

resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

1.2 Sistemas de lavagem de veículo

A atividade de lavagem de veículos pode ser realizada por diferentes processos e operações, com suas características específicas, variando em relação ao volume de água, substâncias químicas utilizados e a carga de contaminantes nos efluentes (MALLMANN, 2013). Cabe explicar que, o equipamento lava-rápido foi desenvolvido com a pretensão de mecanizar o processo de lavagem de veículos. Assim, podem ser classificados como:

- Lavagem tipo Túnel, Figura 1 (a e b), na qual o veículo segue pelo interior do equipamento modular e automático, controlado eletronicamente por sensores e controladores lógicos programáveis (CLP). Inicia-se com entrada do veículo no interior do equipamento em formato de túnel, passando por áreas de lavagem, enxágue enceramento e secagem (MALLMANN, 2013).

Figura 1 - Sistema de lavagem tipo Túnel



Legenda: (a) e (b) Equipamento utilizado para lavagem tipo túnel.

Fonte: (a) WASHTEC, 2019, (b) DIYTRADE, 2014.

Na área de lavagem, o detergente diluído em água é aplicado em forma de espumas que é depositada sobre o veículo. A sujeira é removida de forma mecânica por escovas e/ou jatos de alta pressão, havendo enxágue com água

limpa e secagem com jatos de ar, efluente é coletado na vala abaixo do túnel (MALLMANN, 2013).

- Lavagem tipo “Rollover”, Figura 2 (a e b), é aquela em que o automóvel fica parado enquanto a máquina de lavagem passa por ele (MORELLI, 2005). Escovas em forma cilíndrica, que giram ao redor do eixo, compõe o equipamento, sendo em geral três escovas, duas laterais e uma superior. O equipamento realiza movimentos para frente e para trás, cobrindo toda a área lateral e superior do carro. O efluente gerado é coletado em vala abaixo do sistema (MALLMANN, 2013).

Figura 2 – Sistema de lavagem tipo “rollover”



Legenda: (a) e (b) – Equipamento utilizado para lavagem tipo “rollover”.

Fonte: (a) ALL.BIZ, 2019, (b) ISTOBAL, 2019.

- Lavagem a jato manual, é aquela em que o veículo recebe jatos de alta pressão de ar, sabão e água alternandos, por meio de mangueira, Figura 3 (a e b). O efluente, normalmente é coletado através de ralos e encaminhado para estação de tratamento preliminar nas localidades brasileiras onde já existe legislação específica (ROSA et al., 2014). Como exemplo, o Estado do Rio de Janeiro com a Lei 6.034 de 2011.

Figura 3 – Sistema de tradicional com jato manual



Legenda: (a) e (b) – Equipamento utilizado para lavagem tipo “rollover”.

Fonte: NOVONEGÓCIO, 2016.

A Tabela 1 apresenta alguns aspectos importantes dos tipos de lavagem mencionados anteriormente.

Tabela 1 – Vazão e capacidade para os processos de lavagem de veículos.

Tipo	Capacidade (veículos/dia)	Volume médio (L/veículo)	Descarga (m³/dia)	Perdas (L/veículo) (evaporação e outras)
Tunel	100-600	262	75,7	7-30
“Rollover”	média: 250 10-150	112-168	11,4	7-30
Lavagem manual	média: 75 40-96 média: 64	*	19,9	*

Fonte: UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (1980).

Avaliando informações apresentadas em trabalho acadêmicos, observa-se que não há um consenso a respeito da vazão utilizada na lavagem de cada automóvel. Em países como México, Japão, China, Kuwait são estimados de 50 a 378 litros de água por veículo, dependendo do tipo de sistema operacional utilizado (SMITH; SHILLEY, 2009; FALL et al., 2007). Rosa et al. (2011) em sua pesquisa, identificaram uma faixa de 50 a 80 litros por veículo. De acordo com Nunes (2006), lava rápido automático de carros consome 250 litros por veículo.

Dessa forma, em alguns desses países já existe legislação específica que regulamenta o descarte, assim como, o tratamento dessas águas residuárias,

impulsionando investimentos em sistema de recuperação da água no próprio empreendimento.

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA), cada brasileiro consome, em média, 108,4 litros de água por dia para, além de beber, suprir necessidades básicas como higiene pessoal e limpeza de roupas (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2018).

Estudos realizados pelas grandes empresas de estacionamentos e postos de gasolina concluíram que mais de 88% dos proprietários de automóveis, com menos de dez anos de uso, lavam seus carros com uma periodicidade de 15 dias, e 53% o fazem semanalmente (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS, 2012).

A frota do Estado do Rio de Janeiro é composta por 4.984.074 automóveis registrados (englobada na categoria veículos), dados de julho de 2019. Na Capital a frota registrada de automóveis é de 2.290.744, conforme representado na Figura 4 (DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2019).

Figura 4 – Aumento da frota de automóveis do Município do Rio de Janeiro nos últimos dez anos



Fonte: DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2019.

De acordo com o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) a frota nacional de automóveis é de 53.459.376, representando 54,44% da totalidade de veículos. No Estado do Rio de Janeiro, o número de automóveis é de 6.597.214 total, dados do ano de 2018, sendo a frota municipal da capital composta por 2.246.488 automóveis (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2018).

No Brasil em 2010, cerca de 32.700 postos de lavagem apresentavam um consumo de água de 3,7 milhões de m³ por mês, o equivalente ao consumo mensal de uma cidade de 600 mil habitantes (LEÃO et al., 2010).

Considerando a frota do município do Rio de Janeiro com até 10 anos de uso, cerca de 1.208.753 veículos, de acordo com o DETRAN, conforme apresentado na sendo o percentual de automóveis próximo de 75% deste total, e que 88% dessa parcela, cerca de 797.777 automóveis, passam por lavagem com periodicidade de 15 dias e que para cada automóvel são consumidos, de acordo com a UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (1980), 262 L de água por lavagem, então o consumo de água seriam de 209.017.574 L por dia. Tomando-se por base que cerca de 80% do total consumido para a lavagem pode ser reutilizado, ou seja, aproximadamente 167.214.059 L por dia. De acordo com o IBGE, o consumo per capita diário de água é de 135,5 L, assim, essa vazão de água reaproveitada representa o consumo de 1.234.053 pessoas aproximadamente.

Tabela 2 – Frota de veículos do município do Rio de Janeiro por ano de fabricação.

Frota	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total
2010 a 2019	132.015	151.765	148.898	160.227	155.667	126.015	95.721	95.831	99.141	43.473	1.208.753
											3

Fonte: DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2019.

1.3 Efluentes Líquidos

O Brasil está localizado no continente que possui o maior volume hídrico do mundo. No entanto, sofre com a escassez de água, o que pode ser explicado pela cultura do desperdício e pelo descaso com relação ao tratamento de esgotos antes do lançamento em corpos hídricos (OENNING JUNIOR, 2006).

Cerca de 1% de todo o volume de água disponível no planeta, é disponibilizado para as atividades humanas; sendo que 10% deste total é reservada para fins urbanos, e 35% deste quantitativo descartada após sua utilização, na forma de esgoto, aumentando os problemas relacionados à poluição dos recursos hídricos (MANCUSO e SANTOS, 2003).

A poluição hídrica pode ser definida como qualquer alteração física, química ou biológica da qualidade de um corpo hídrico, capaz de ultrapassar os padrões estabelecidos para a classe, conforme o seu uso preponderante (GIORDANO, 2004).

Considera-se a ação dos agentes como físicos materiais, os sólidos em suspensão ou formas de energia, calorífica e radiações; como químicos, as substâncias dissolvidas ou com potencial solubilização; e como biológicos, os microorganismos (GIORDANO, 2004).

1.3.1 Caracterização de efluentes da lavagem de veículos

A lavagem de veículos é um processo altamente consumidor de água e envolve o uso de produtos químicos. Os efluentes gerados tem composição variável que depende de inúmeros fatores, constituindo fonte significativa de demanda química de oxigênio (TEIXEIRA, 2003).

Dentre os compostos estão os contaminantes presentes na superfície dos veículos e na composição dos produtos utilizados na limpeza como partículas e sólidos em suspensão, metais pesados, surfactantes, substâncias orgânicas (óleos, graxas, ceras) de acordo com ZANETI; ETCHEPARE; RUBIO, 2013; TEIXEIRA (2003), conforme .

Tabela 3 – Resultados de análises de efluente bruto de lavagem de veículos.

Parâmetro	Neves (2010)	Zaneti et al. (2011)	Rosa et al. (2011)	Etchepare (2012)	Soeiro (2014)
Gasolina (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Óleo de motor (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Diesel (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Cádmio (mg.L ⁻¹)	*	*	0,04	*	0,01
Cromo (mg.L ⁻¹)	*	*	0,50	*	0,05
Cobre (mg.L ⁻¹)	*	*	1,12	*	0,38
Chumbo (mg.L ⁻¹)	*	*	0,56	*	0,20
Níquel (mg.L ⁻¹)	*	*	0,30	*	0,10
Zinco (mg.L ⁻¹)	*	*	2,82	*	0,31
Ferro (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	4,13
Alumínio (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	6,40
Manganês (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	0,23
Prata (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	0,10
Sódio (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*

Nitrato + nitrito (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
pH	8,27	7,55	8,30	7,40	6,98
Dureza (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Sólidos Dissolvidos T. (mg.L ⁻¹)	*	423,5	*	334	*
Sólidos Suspensos T. (mg.L ⁻¹)	*	78,5	1.729	91	*
Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Sólidos Totais (mg.L ⁻¹)	*	*	3.225	*	*
Óleo e graxa (mg.L ⁻¹)	364	8,3	152,8	14	282,35
Turbidez (NTU)	*	96	360	107	*
Fósforo T. (mg.L ⁻¹)	*	1,00	4,36	1,0	*
Surfactantes MBAS (mg.L ⁻¹)	*	16,35	*	23	*
Nitrogênio T. (mg.L ⁻¹)	*	7	18,8	9,6	*
Amônia (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	1,02
DBO (mg.L ⁻¹)	740	100,5	*	72	89,55
DQO (mg.L ⁻¹)	*	*	1.696	189	846,46
E. Coli (N.M.P.100mL ⁻¹)	*	325E+05	*	3,44E+05	*
Coliformes T. (N.M.P.100mL ⁻¹)	*	1,53E+05	*	2,1E+04	*
SiO (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Sulfato (mg.L ⁻¹)	*	*	*	*	*
Sulfeto (mg.L ⁻¹)	*	*	*	0,18	*
Cloreto (mg.L ⁻¹)	*	*	*	30	*

Legenda: * - Não detectado.

Fonte: NEVES (2010), ZANETI; ETCHEPARE; RUBIO (2011), ROSA et al. (2011), ETCHEPARE et al. (2012) e SOEIRO (2014).

Além disso, estão presentes nestes efluentes, produtos não oleosos utilizados nas atividades automotivas, que contribuem, assim como os óleos e graxas, na formação e composição do efluente final gerado pelos estabelecimentos inseridos neste ramo (SECRON, 2006).

Entre os metais pesados que podem ser encontrados na composição do efluente gerado em área de lavagem de veículos, pode se citar o cobre, presente na superfície dos veículos, no motor, nos radiadores, em resíduos de asfalto. Durante a lavagem, há a remoção dessas partículas por associação aos compostos nitrogenados (DORIGON; TESSARO, 2010). O zinco está presente naturalmente no ambiente, e na composição do ferro e aço, produtos mecânicos, borracha, óleos e ceras, tintas e vernizes, sabões e detergentes (VON SPERLING, 2005).

Teixeira (2003) salienta ainda que quando não há enxágüe na parte inferior e no motor dos veículos, as concentrações de agentes desengraxantes, solventes e metais pesados, são muito baixas. Caso contrário, a concentração destes poluentes aumenta consideravelmente.

É recomendável que, a água utilizada para a lavagem passe por processo de tratamento ou diluição, visto que a concentração de cloretos na recirculação de

água pode aumentar gradativamente a concentração de sais. A extensão da corrosão das carrocerias que pode ser causada, depende da umidade e da concentração de sulfatos na atmosfera, maior em cidades industrializadas (TEIXEIRA, 2003).

A presença de partículas sólidas em suspensão como areia fina, silte e argila causam a elevação da turbidez, devido à dispersão e à absorção da luz. A importância de se estudar este parâmetro se deve ao fato da turbidez interferir diretamente no processo de absorção da luz e, por conseguinte, na produção de fotossíntese em corpos hídricos (ODUM e BARRET, 2007).

De acordo com o estudo realizado por Berti et al., (2009), os valores de pH em efluente gerado na atividade de lavagem de veículos apresenta condições básicas, mantendo-se com valores uniformes em todas as empresas de lavagem de veículo e confirmando a presença de produtos de limpeza veicular como base alcalina.

Rosa et al. (2011) realizaram em sua pesquisa, caracterização do efluente de 20 empresas que possuem licença ambiental e realizam lavagem de veículos em Campina Grande-PB. Foram coletadas amostras de efluentes nessas empresas, durante seis semanas consecutivas e dias alternados: segunda-feira, quarta-feira e sábado (levando em conta os dias de maior atividade nas respectivas empresas). Em cada uma das empresas foram coletadas 06 amostras no box de lavagem, (no dique anterior a caixa separadora de água e óleo). Como resultado para concentração máxima de óleos e graxas, 300 mg.L^{-1} e concentração média de 250 mg.L^{-1} , para turbidez foi encontrado valor máximo de 1200 NTU e médio de 800 NTU, para pH foi encontrado valor máximo de 9 e médio de 8,5.

1.3.1.1 Óleos e graxas (OG)

O termo OG, em águas residuárias, aplica-se a uma variedade de substâncias orgânicas de origem mineral, vegetal ou animal que são extraídas de uma solução aquosa, ou em suspensão, por hexano, ou por 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoroetano. Hidrocarbonetos, ésteres, óleos, gorduras, ceras e ácidos graxos de grande peso molecular compreendem a maioria dos materiais dissolvidos por esses solventes. São raramente encontrados em águas naturais, sendo

normalmente oriundas de despejos e resíduos industriais, esgotos domésticos, efluentes de oficinas mecânicas, postos de gasolina, estradas e vias públicas (SECRON, 2006).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil consumiu em 2017, cerca de 151.109 m³ por ano de óleo diesel e 1,3.109 m³ por ano de óleo lubrificante. Mesmo se apenas uma pequena fração deste volume se transformar em contaminante para a água e o solo, esta não pode ser desprezado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

Para Secron (2006), com o intuito de utilizar tratamento adequado de efluentes contendo este contaminante, faz-se necessário conhecer sua natureza (mineral, vegetal), a forma na qual este se encontra (em suspensão, emulsificado) e em que local ocorre (tipo de indústria, etapa do processo).

Óleos Combustíveis são óleos minerais, hidrocarbonetos betuminosos, viscosos, inflamáveis, insolúveis em água, mas solúveis em álcool ou éter. Entre os hidrocarbonetos, os que causam maior impacto são os compostos aromáticos (benzeno, o tolueno, o etilbenzeno e os xilenos (orto, meta e pára), por serem eles os mais solúveis e os mais tóxicos entre os demais (OLIVEIRA; LOUREIRO, 1998).

Óleos Lubrificantes são óleos minerais, uma mistura de moléculas contendo de 18 a 40 átomos de carbono classificados em parafínicos, aromáticos e naftênicos (cicloparafínicos) provenientes do refino do petróleo. Além de carbono e hidrogênio podem conter ainda compostos com heteroátomos como enxofre, metais, nitrogênio ou oxigênio, substituídos em várias estruturas hidrocarbônicas (AZEVEDO; DE CARVALHO; FONSECA, 2005).

Os óleos vegetais e animais podem fazer parte da composição de óleos lubrificantes, a exemplo do óleo de mamona, utilizado nas operações de lavagem e polimento de motores (SILVEIRA et al., 2010). Normalmente, os óleos lubrificantes não são totalmente consumidos pelo motor dos automóveis durante o seu uso, assim podendo causar diversos problemas ambientais (AZEVEDO; DE CARVALHO; FONSECA, 2005).

A mistura água e óleo ocorre de forma insuficiente devido a polaridade das duas substâncias envolvidas, podendo ser separados através de simples mecanismo de decantação. No entanto, na presença de surfactantes (como produtos empregados na lavagem de veículos), há a emulsificação das gotículas

de óleo, dificultando a separação da água e do óleo (SHONS, 2008). Assim, óleos podem ser encontrados em efluentes nas formas Óleo livre (gotas de óleo $>150\mu\text{m}$), Óleo emulsionado (gotas de óleo $<50\mu\text{m}$), Óleo dissolvido (gotas de óleo $>50\mu\text{m}$) ou Óleo adsorvido em partículas sólidas (BADER, 2007).

Óleo livre: disperso sob forma de gotas de grandes diâmetros que naturalmente flota na superfície da água na forma de filme. Formado por hidrocarbonetos praticamente insolúveis, tais como aromáticos, polinucleares, policiclo-parafinas e parafinas pesadas, pode ser facilmente removido da água por separadores gravitacionais (ATKINS e DE PAULA, 2001).

Emulsão: sistema heterogêneo composto por ao menos um líquido imiscível dispersado em outro líquido na forma de gotículas. A formação de emulsão oleosa é um fenômeno físico ou químico, passível de ocorrência nas áreas de lavagem de veículos. Ocorre pela quebra da lâmina de óleo em gotículas de pequenos diâmetros, completamente dispersas na água, mas que permanecem em suspensão. Quanto menores as gotículas, mais estável a emulsão (SCHRAMM, 1992). Quando as gotículas entram em contato umas com as outras, estas tendem a coalescer e se elevar até a superfície. Apenas quando ocorre a coalescência (agregação) das gotas de óleo, é que este poderá ser enviado para tratamento nos separadores de água e óleo convencionais (ATKINS e DE PAULA, 2001). O emulsificador possui uma extremidade polar e outra apolar o que previne que as gotículas de óleo se encontrem e coalesçam. Surfactantes e sólidos finamente divididos aumentam a estabilidade da emulsão, pois agem como carga nas moléculas de óleo causando a repulsão mútua e conseqüente dispersão (ATKINS e DE PAULA, 2001). O óleo pode se encontrar em emulsão mecânica ou química.

Óleo mecanicamente emulsificado: finas gotículas de óleo variando em tamanho entre microns até milímetros. Estas gotículas são estabilizadas eletrostaticamente sem a influência de surfactantes (HONG; FANE; BURFORD, 2003).

Óleo quimicamente emulsificado ou dissolvido: incluem óleos de gotículas muito finas (0,5 micron de diâmetro), uma vez que estão presentes agentes superficiais ativos, como emulsificante, geralmente um surfactante, detergente ou

sabão, que aumentam a estabilidade da emulsão, devido à interação entre a superfície água- óleo (HONG; FANE; BURFORD, 2003).

Óleo solúvel ou óleo “dissolvido”: Todos os produtos de petróleo apresentam fração solúvel em água, sendo que óleos mais leves possuem fração solúvel maior do que óleos mais pesados. Quanto mais pesado o hidrocarboneto, maior seu ponto de ebulição e menor sua solubilidade em água. (ATKINS e DE PAULA, 2001). Nesta classe, inclui aquele que é verdadeiramente dissolvido em sentido químico, mais aquele óleo disperso em gotículas finas, tal que a remoção por meios físicos é impossível. A remoção de óleo “dissolvido” requer técnicas mais sofisticadas e é freqüentemente considerada uma etapa de tratamento avançada (TEIXEIRA, 2003).

Sólidos “oil-wet” (embebidos em óleo): aderem aos sedimentos, metais ou outro tipo de material particulado presente no efluente. O produto é denominado sólido molhado por óleo e a remoção desse tipo de óleo da água ocorre com a remoção de sólidos em suspensão (WAEKENS, 2010).

1.3.1.2 Surfactantes

Surfactantes estão presentes nas águas residuárias geradas nas operações de lavagens de veículos devido ao uso de sabões e detergentes.

Os surfactantes são classificados como iônicos e não iônicos. Os iônicos podem ser aniônicos ou catiônicos. O aquil benzeno sulfonado (ABS) é um típico surfactante aniônico. O ABS de cadeias lineares (LAS) é considerado biodegradável, no entanto, ao se degradar, consome oxigênio do meio, podendo causar eutrofização do corpo hídrico em que é disposto (TEIXEIRA, 2003).

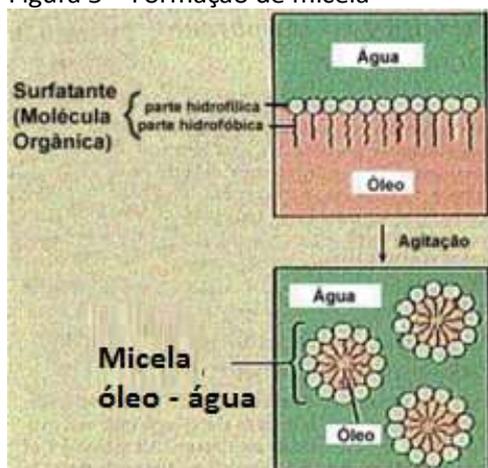
Surfactantes são moléculas orgânicas compostas por fração hidrofílica e fração hidrofóbica. A porção apolar é freqüentemente, uma cadeia

hidrocarbonada, enquanto a porção polar pode ser iônica (aniônica ou catiônica), não-iônica ou anfotérica (FERNANDES et al., 2015).

Estas moléculas possuem a propriedade de interagir tanto com a fase aquosa, quanto com a fase oleosa de efluentes, gerando, assim, as emulsões.

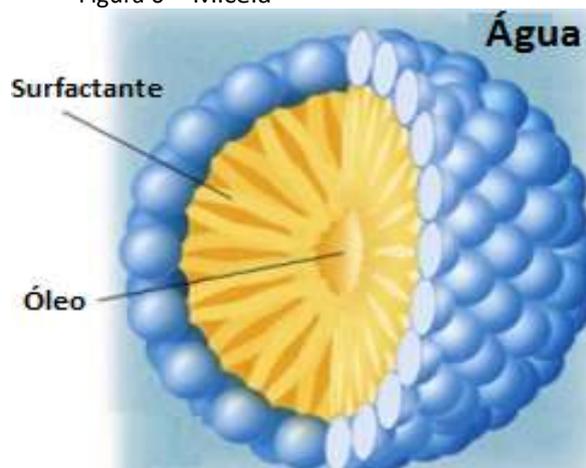
Quando moléculas anfifílicas são misturadas em água por agitação, elas têm a tendência de se aglomerar e formar pequenas estruturas esféricas, ficando as cabeças hidrofílicas voltadas para a água e as caudas hidrofóbicas dobradas para o interior. Estas estruturas esféricas são denominadas micelas, conforme pode ser visto na Figura 5 e Figura 6. A adição de óleo em água propicia a formação de micelas, pois o óleo é uma substância apolar (hidrofóbica), não solúvel em água (NITSCHKE; PASTORE, 2002).

Figura 5 – Formação de micela



Fonte: AKERMAN, 2016.

Figura 6 – Micela



Fonte: AKERMAN, 2016.

1.4 Tratamento de efluentes de lavagem de veículos

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (CNT), 74,3% das empresas que possuem sistema de tratamento de água de lavagem dispõe de Caixa Separadora de Água e Óleo (CSAO), 51,3% de etapa de sedimentação/decantação, como caixa retentora de areia, e 49,7% dispõe de filtro de areia (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, 2017).

Para evitar danos causados por sólidos grosseiros, são inseridos nos sistemas dispositivos como peneiras, grades ou crivos, para remoção dos

materiais em suspensão, em um processo denominado gradeamento. O material de dimensões maiores do que o espaçamento entre as barras é retido (CARVALHO, 2013).

Há grades grosseiras (espaços de 5 a 10 cm), grades médias (espaços entre 2 a 4 cm) e grades finas (entre 1 e 2 cm). As principais finalidades do gradeamento são: proteção dos dispositivos de transporte dos efluentes (bombas e tubulações); proteção das unidades de tratamento subsequentes; e proteção dos corpos receptores (BARSANO, 2012).

Em seguida deve haver a separação de sólidos de menores dimensões como areia, silte, argila, pequenos grãos por sedimentação. Assim, é inserida no sistema, após a grade, uma caixa ou tanque de detritos (“caixa de areia”) que é uma caixa gradeada que retém o material mais pesado e grosseiro. A velocidade de fluxo deve ser baixa para garantir a deposição de partículas no fundo da caixa. A lama retida e acumulada é normalmente destinada a aterros sanitários (MARQUES et al., 2014).

As finalidades básicas da remoção de areia são: evitar abrasão nos equipamentos e tubulações; eliminar ou reduzir a possibilidade de obstrução em tubulações, tanques, orifícios, sifões; e facilitar o transporte do líquido, principalmente a transferência de lodo, em suas diversas fases (BARSANO, 2012).

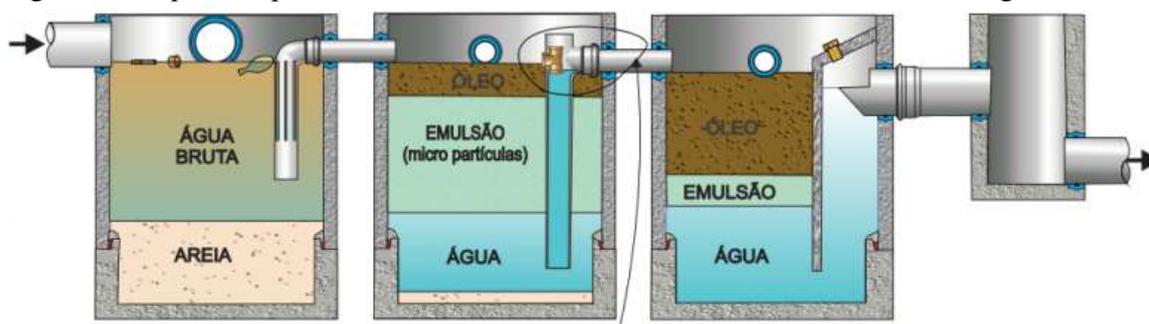
O terceiro fator que se deve observar é a presença de óleos e graxas. Para essa separação, são utilizados equipamentos como decantadores, que são tanques onde a água tem sua velocidade diminuída para que ocorra a deposição das partículas sólidas, ou seja, a separação das partículas sólidas em suspensão ou coloidais do líquido, por meio da sedimentação (MARQUES et al., 2014).

A caixa separadora de água e óleo (CSAO) é basicamente formada por uma caixa que reduz a velocidade do fluxo e retém a maior parte do óleo livre e pequena parcela de óleo emulsionado, especialmente as emulsões instáveis presente nos efluentes, permitindo a gradual separação do óleo da água, de forma física, através da separação por gravidade, formando camada superficial, uma vez que o óleo é menos denso que a água. O óleo vai para a superfície, onde é removido, a água é removida por um dreno no meio ou no fundo do CSAO (ZANETI; ETCHEPARE; RUBIO, 2013).

Este sistema é um pré-tratamento necessário para a grande maioria dos tratamentos de óleo. Deve ainda existir uma caixa de inspeção localizada no final do processo, onde a eficiência da remoção do óleo pode ser verificada, após esta caixa, o efluente segue para a rede de esgotos (MARQUES et al., 2014).

A CSAO, representada na Figura 7, apresenta como vantagem, o fato de ser simples, e como desvantagens o fato de não separar as moléculas emulsificadas quimicamente, nem partículas muito pequenas; exigência de alta frequência de purga, manutenção e retrolavagem de filtros, assim, se faz necessária melhoria a fim de diminuir as paradas do sistema e em caso de necessidade de lançamento do efluente, melhor clarificação do mesmo (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE, 2003).

Figura 7 – Esquema representativo de sistema de tratamento de efluentes contendo água e óleo



Fonte: DUARTE, 2013.

Alguns sistemas de tratamento apresentam como etapa complementar um dosador de cloro na saída do equipamento de pré-tratamento já descrito, com o propósito de desinfecção da água e de oxidação de compostos odorantes, como pode ser observado na . Para remoção de surfactante, são utilizados filtros e antiespumantes (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE, 2003). Essa adição de cloro apresenta como desvantagem o aumento gradual da concentração de sal, podendo tornar a água recuperada inadequada para reutilização (ASANO et al., 2007; ZANETI; ETCHEPARE; RUBIO, 2011). Esse risco químico (escalamento, formação pontual e corrosão) pode ser previsto e monitorado pela aplicação de uma balança de massa (MORELLI, 2005), utilizando SDT e cloreto como parâmetros de controle.

Figura 8 – Sistema de tratamento e reuso de água de lavagem de veículos



Fonte: BRASIL POSTOS, 2015.

A água recuperada pode ser usada em todo o processo de lavagem, exceto enxágue final, onde a aplicação de água doce ou sem mancha (água tratada com osmose reversa) é recomendada (ASANO et al., 2007; BROWN, 2000).

As empresas onde ocorre atividade de lavagem de ônibus relatam danos nos veículos decorrência da lavagem com água de reúso, como manchas nos vidros, corrosão no revestimento dos veículos e/ou incrustações, para evitar esses problemas, é recomendável que o efluente final, após o tratamento, seja o mais límpido possível. Examinar a composição desse recurso é uma ação gerencial preventiva (MORELLI, 2005).

Uma alternativa de otimização para este sistema bem difundida no Brasil é a via físico-química, pela sua robustez, é a que lança mão da flotação com ar dissolvido (ou outros processos de flotação), havendo mais de uma empresa comercializando o sistema de reciclagem (MORELLI, 2005). Algumas pesquisas realizadas na UNICAMP demonstraram a eficiência do sistema, mas o preço de comercialização do sistema parece ainda um pouco alto para o nível de lucratividade do setor (TEIXEIRA, 2003).

Existe um amplo espaço para utilização de novas tecnologias que visem otimização do tratamento. Dificilmente apenas um tipo de tratamento será capaz de alcançar a qualidade da água desejada, sendo necessário utilizar as tecnologias disponíveis em conjunto para alcançar um melhor resultado (CHERYAN; RAJAGOPALAN, 1998).

A fim de aumentar a eficiência do tratamento de efluentes gerados em área de lavagem de veículos, pode-se adotar como alternativa, a adsorção.

1.4.1 Aspectos do reuso de efluentes de lavagem de veículos

As empresas onde ocorre atividade de lavagem de veículos ao que tudo indica, estão mais conscientes da necessidade de tratamento de águas residuais oriundas nesta atividade e sua recuperação e reuso, sendo pela escassez de água (devido ao baixo índice ou à demanda excessiva deste recurso), fatores ambientais, econômicos (aumento dos preços da água), pela adoção de política de produção mais limpa ou pela obrigatoriedade existente na legislação, cada vez mais restritiva (JEFFERSON et al., 2004). Há ainda o fator de percepção do público que utiliza este serviço gerando maior interesse por empresas que utilizem o reuso (JEFFERSON et al., 2004).

Nos países em desenvolvimento, onde não há leis específicas que imponham o uso racional da água, várias unidades de lavagem de veículos implementaram sistemas de reciclagem, estimulados por um decréscimo de custo no consumo de água potável do abastecimento público (ETCHEPARE et al., 2012).

No Brasil, a prática ainda é embrionária, com poucos estudos realizados. É necessário implantar projetos pilotos, cujos resultados irão fornecer dados para o desenvolvimento de normas, diretrizes e padrões adaptados às condições e características brasileiras, quanto à qualidade das águas. Tais subsídios, fornecidos pelas diretrizes presentes nas legislações referentes ao tema, podem servir de base à criação de novas leis e normas que visem consolidar essa prática tão importante em épocas de escassez (FONSECA, 2001; TOSETTO, 2005).

A prática de reuso é baseada no conceito de substituição de fontes, permitindo que um volume maior de água permaneça disponível para outras finalidades, garantindo seu uso racional. Desta forma, há a redução da demanda de água sobre os mananciais, quando se utiliza água de qualidade inferior, geralmente oriunda de efluentes tratados, para o atendimento de finalidades que necessitem ou não de padrões de potabilidade (MORELLI, 2005).

Apesar da água de reuso ser imprópria para o consumo, ela pode ser utilizada com diversos propósitos em uma empresa, como por exemplo, limpeza das dependências da propriedade, descargas dos banheiros, áreas de jardinagem, combate a incêndio, refrigeração de equipamentos, lavagem de veículos, etc

(FEDERAÇÃO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2010).

A implantação de um sistema de tratamento e reutilização da água requer um estudo para que os investimentos sejam efetivamente aproveitados e o empreendimento tenha o retorno esperado, em conformidade com a abordagem de baixa tecnologia/ baixo custo/risco controlado. O que se torna um desafio em projetos de pesquisa científica e engenharia de saneamento (ANDERSON et al., 2001).

O estudo deve abordar alternativas de sistemas de aproveitamento e reuso de água, a fim de determinar a quantidade de água gerada (oferta) pelas fontes escolhidas, assim como a quantidade de água destinada às atividades fim (demanda) (SAUTCHUK et al., 2005).

Tomando-se por base estes valores, devem ser dimensionados os equipamentos, os volumes de reservas necessários, os possíveis volumes complementares de água, e escolhidas as tecnologias de tratamentos a serem empregadas. Com base nas alternativas de sistemas geradas, determinam-se quais as de maior eficiência, tanto no aspecto técnico quanto econômico (SAUTCHUK et al., 2005).

Zaneti; Etchepare; Rubio (2012) realizaram um estudo considerando seis diferentes cenários brasileiros, em relação ao custo-benefício da realização do reuso de efluente gerado em área de lavagem de veículos. Os resultados mostraram que a recuperação de água é altamente competitiva e que o período de retorno pode ser de apenas um ano, dependendo do preço da água e da demanda diária de lavagem.

Para um sistema de tratamento e reuso em área de lavagem de veículos, é necessário observar características como: área para implantação; controle para odores; minimização e tratamento de lodo gerado; minimização dos gastos para retorno do investimento (implantação e operação); diminuição da necessidade de purga; diluição com água limpa para manter a qualidade necessária da água a ser reciclada (BOHN, 2014).

Diversos estudos apresentam tecnologias para tratamento de efluentes gerados em área de lavagem de veículos, no entanto, não há critérios bem definidos para a qualidade da água de reuso para a lavagem de carros. Rosa et al. (2011) afirma que a água deve apresentar-se visualmente clarificada, com

ausência de sólidos suspensos, que causam danos estéticos à pintura dos veículos, ausência de microrganismos, odor e formação de espuma, uma vez que é potencial o contato primário do operador com a água. A qualidade da água para a lavagem de veículos tem que ser esteticamente aceitável, sem odor e ter turbidez de menos de 15 NTU (JEFFERSON et al., 2004). Forma mais restritiva é apresentada, com critérios para DBO5 inferior a 10 mg.L⁻¹, turbidez abaixo de 2 NTU e um nível não detectável de total ou inferior a 10 mg.L⁻¹ para coliformes fecais (PALMER, 2001 apud JEFFERSON et al., 2004).

No entanto, os padrões em outros países são ligeiramente menos restritivos e permitem concentrações mais altas dos diferentes parâmetros ou não os incluem de forma alguma. Brown (2002) afirma que a qualidade da água para a lavagem de veículos deve ser alta o suficiente para evitar danos aos equipamentos de lavagem, é importante observar a presença de sólidos grosseiros que poderiam prejudicar o funcionamento do sistema, com entupimentos e obstruções das linhas e bombas.

A Norma NBR 13969/1997 determina que as águas para lavagem de veículos devem possuir turbidez menor que 5 UT, densidade de coliformes fecais menor do que 200 NMP por 100 mL, teor de sólidos dissolvidos totais menor que 200 mg.mL⁻¹, valor de pH entre 6 e 8, além de possuírem teor de cloro residual entre 0,5 e 1,5 mg.L⁻¹ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

De acordo com a NT - 202 R.10, em caso de necessidade de lançamento de efluente gerado na purga e/ou na retrolavagem dos filtros do sistema de tratamento e reuso de água de lavagem, o padrão de lançamento para MBAS (surfactantes) é de 2mg.L⁻¹ e para OG de 20 mg.L⁻¹ (óleo mineral) (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE, 1986).

Uma estação de tratamento para reuso de efluente de lavagem de veículos pode custar entre R\$50 mil e R\$ 120 mil, se a empresa já possuir canaletas e caixas separadoras de água e óleo (CSAO), na área de lavagem de veículos. Este valor depende da vazão de água utilizada, ou seja, da capacidade de tratamento do sistema e tipo de tecnologia utilizada, e não inclui os custos com manutenção e operação do sistema. A manutenção e a operação destes sistemas podem ser realizadas pelo fornecedor, com custo de aproximadamente R\$ 2,65 por metro cúbico referente à mão de obra de assistência, produtos químicos e manutenção

periódica, preventiva e corretiva (FEDERAÇÃO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2010).

Considerando a tarifa aproximada de R\$ 20,00 por metro cúbico praticada pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) em 2018 e a lavagem de uma frota de 250 veículos, a utilização de 200 litros por veículo, tem-se um consumo de 1500 m³/mês de água e um custo estimado mensal de R\$ 30.106. Com a implantação de um sistema de reuso, tem-se uma estimativa de redução de 70 a 80% na conta de água; 50% na conta de esgoto; 50% no uso de produtos de lavagem (COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS DO RIO DE JANEIRO, 2018).

1.5 Resíduos Sólidos

Os resíduos podem ser classificados com base na lei nº 12.305/10, quanto a sua origem e periculosidade. A perlita reutilizada nesse estudo é um resíduo industrial, definido, quanto a sua origem, no item “f” da referida lei como “concebido na atividade de produção e instalações de fábricas/usinas” e quanto a sua periculosidade, na norma NBR 10.004, como classe II B (não perigoso e inerte) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Tomando por base o artigo 3º da Lei Federal 12.305/10, “resíduos sólidos são aqueles que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

A gestão ambiental adequada para resíduos sólidos deve englobar todos os aspectos envolvidos, da fonte geradora até a disposição segura, assim como os aspectos de reciclagem máxima dos resíduos, buscando, inclusive, incorporar as mudanças dos padrões de produção e consumo (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Ao ser gerado o resíduo, medidas de agregação de valor devem ser adotadas como reaproveitamento, reciclagem e ou valorização energética. O reaproveitamento é a reintrodução no processo produtivo, de produtos não mais

apropriados para o consumo, visando a sua recuperação, e recolocação no mercado, evitando assim, o seu encaminhamento para o lixo. Já a reciclagem constitui a reintrodução de um resíduo, para que possa ser reelaborado gerando novo produto (BARROS, 2002).

De acordo com o art. 9º da PNRS, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos conforme representado na Figura 9.



Fonte: RESIDUOALL, 2017.

Visando uma gestão ambiental adequada que contribua para uma produção mais limpa, alguns resíduos tem sido utilizados como alternativa nos processos de tratamento de efluentes. Assim, há um efeito amplificado, visto que são tratados dois aspectos ambientais concomitantemente, efluente gerado em área de lavagem de veículos e geração de resíduo industrial.

1.6 Perlita

“Um vazamento de toneladas de perlita, um pó branco usado como isolante em uma empresa de beneficiamento de gases, causou ontem uma neblina espessa, de aproximadamente 30 metros de altura. O acidente causou pânico entre os moradores, um acidente de trânsito e engarrafamento de 55,0 km” (O GLOBO, 2000).

“Em 2010, a equipe de manutenção predial da Fábrica de Equipamentos Criogênicos (FEC) passou a utilizar a perlita – um isolante térmico localizado entre o vaso interno e o externo dos tanques criogênicos de armazenamento – como complemento da areia na produção de concreto. Em vez de descartar esse material, que deve ser substituído quando perde sua propriedade isolante, os engenheiros produziram 35 m³ de concreto perlítico, usado para restaurar cerca de 100 m² de pisos das unidades” (FERNANDES et al, 2010).

A perlita é um mineral de origem vulcânica, composta de silicato de alumínio hidratado, de coloração branca (GHASSABZADEH et al., 2010). Segundo Vaou e Panias (2010) a perlita pode se apresentar em três variações possíveis: natural, semiexpandida e expandida (). Foi observado por estes autores que a forma de apresentação da perlita influencia no processo de adsorção.

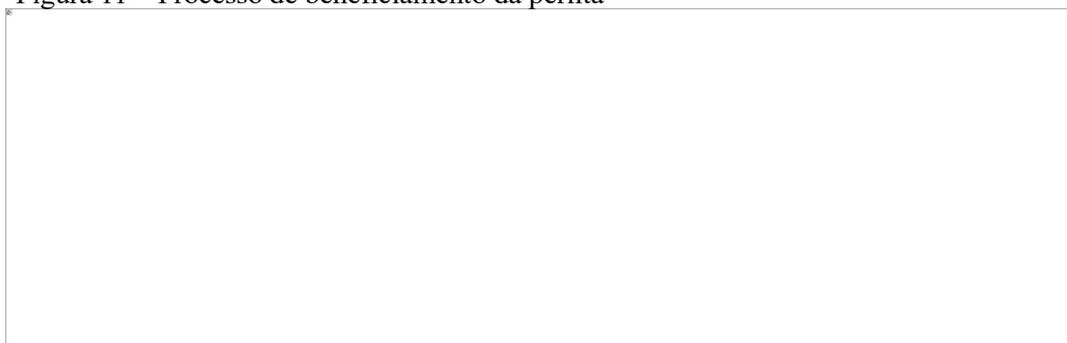
Figura 10 – Variações possíveis da perlita (natural, semiexpandida e expandida)



Fonte: RODRIGO, 2011.

A extração da perlita mineral ocorre em minas a céu aberto localizadas em zonas vulcânicas localizadas em diferentes regiões do mundo. O minério é triturado e peneirado em diferentes tamanhos para poder ser transformado posteriormente. Nos locais de beneficiamento, a perlita passa por processo de aquecimento para expandir. Algumas vantagens ambientais do processo de extração da perlita são: nenhum produto químico é utilizado, não há formação de subprodutos, são utilizadas todas as faixas granulométricas no processo de fabricação dos produtos, assim há minimização da geração de resíduos (PERLITE INSTITUTE, 2012). O processo de beneficiamento da perlita é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Processo de beneficiamento da perlita



Fonte: PERLITE INSTITUTE, 2012.

A energia utilizada no processo de extração da perlita pode ser compensada através de seus usos, visto que, como isolante térmico há economia de energia a longo prazo, ao ser utilizada na agricultura resulta em flora mais eficiente na absorção de gás carbônico, reduz o consumo de água na irrigação, a produção de tortas no processo de filtração com menor concentração de água permite um transporte de resíduo de filtração mais eficiente (PERLITE INSTITUTE, 2012).

A indústria global de perlita minera ativamente um total de menos de 8 km² (PERLITE INSTITUTE, 2012). Assim, as reservas estarão disponíveis por muitas gerações. Nos últimos 60 anos, menos de 1% do recurso foi utilizado. Na Tabela 4 são apresentados valores de produção de perlita e vermiculita do ano de 2005.

Tabela 4 – Dados de produção nacional de vermiculita e perlita em 2005.

Substância	Uso	Volume Produzido	Valor da Produção (R\$)	Estado de Maior Produção
Vermiculita e perlita	Isolante térmico acústico, lubrificante, concreto leve, lama de sondagem, agricultura	29.307 ton	4.175.486	Goiás

Fonte: BRANCO, 2009.

O transporte da perlita também se dá de forma eficiente, visto que sua expedição do local de origem se dá em sua forma natural e, posteriormente, a perlita pode ser expandida ampliando seu volume.

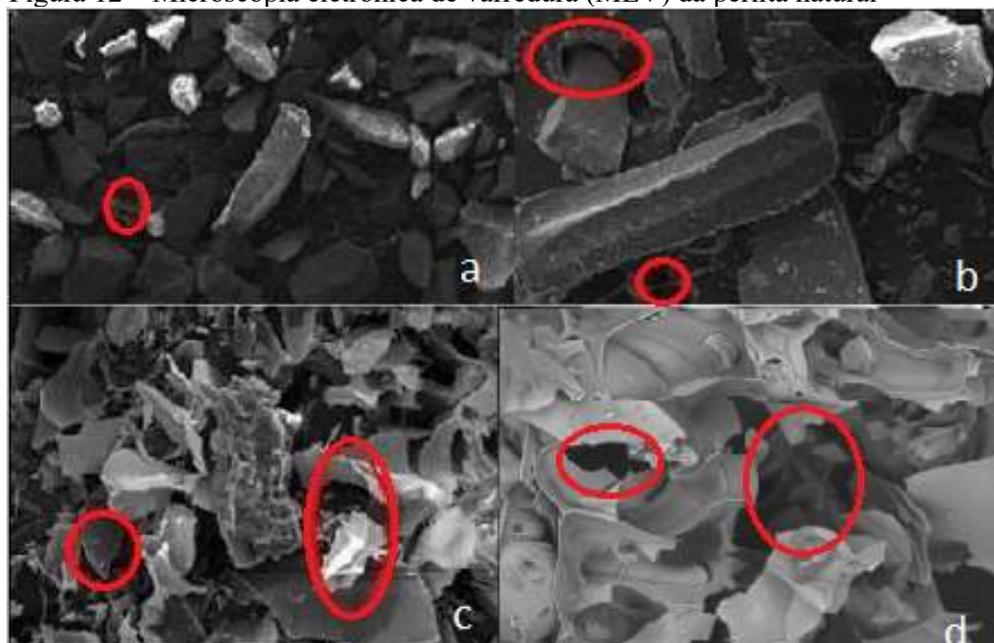
Souza (2010) afirma que a perlita é preferível a outros tipos de adsorventes minerais, porque é térmica e quimicamente inerte, porosa, abundante no planeta, acessível e ambientalmente correta.

O custo da perlita expandida é menor do que R\$13,00 por quilo no Brasil, tornando-a um candidato viável como adsorvente econômico para a remoção de contaminantes (GHASSABZADEH et al., 2010).

1.6.1 Caracterização da perlita

Na Figura 12 observa-se a microscopia eletrônica de varredura da perlita natural e expandida com diferentes ampliações. Os círculos vermelhos destacam a localização dos poros existentes na perlita natural e expandida.

Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da perlita natural



Legenda: Ampliações de 100 (a) e 200 vezes (b) e da perlita expandida com ampliações de 500(c) e 2000 vezes (d).

Fonte: BELARMINO, 2011.

A caracterização química da perlita é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição Química da Perlita.

Constituinte	%
SiO ₂	71,0-75,0
Al ₂ O ₃	12,5-18
Na ₂ O	2,9-4,0
K ₂ O	4,0-5,0
CaO	0,5-2,0
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5
MgO	0,03-0,5
TiO ₂	0,03-0,2

MnO ₂	0,0-0,1
SO ₃	0,0-0,1
FeO	0,0-0,1
Ba	0,0-0,1
PbO	0,0-0,5
Cr	0,0-0,1

Fonte: ALKAN; DOGˆANDOGˆAN, 1998.

A densidade desse aluminossilicato amorfo é de 32 Kg.m⁻³, quando no estado natural, após o processo de expansão sua massa específica gira na faixa de 30 a 240 kg.m⁻³, é quimicamente inerte, incombustível, possui alta resistência ao calor, é excelente isolante térmico e de ruído (ALKAN; DOGˆANDOGˆAN, 1998).

A Tabela 6 apresenta informações constantes na Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ) da perlita (TETRAQUÍMICA, 2006).

Nas moléculas da perlita, há aprisionamento de água de 2 a 5% (água de constituição ou de cristalização), onde após resfriamento e petrificação rápida, a perlita pode ser triturada, seca e classificada. Quando este mineral é aquecido de 800-1200°C há grande expansão, e suas partículas podem atingir 20 vezes o volume original (SILVA, 2016).

Tabela 6 – Propriedades físico-química da perlita de acordo com a FISPQ

Propriedade	Característica
Estado físico	Sólido
Forma	Pó / Granulado
Cor	Branco
Odor	Inodoro
pH	Neutro (5,0 a 7,5)
Ponto de fusão	1.200 – 1.300°C
Densidade	40 a 400 Kg/m ³
Solubilidade	Ácido hidrófluorídrico
Estabilidade e reatividade	Estável
Informação toxicológica	Não classificado como carcinógeno pelo National Toxicology Program (NTP) ou pela International Agency for Research on Cancer (IARC). Aspiração prolongada deste produto sem o uso de EPI indicado, pode causar problemas respiratórios.
Informação ecológica	Produto considerado quimicamente inerte no meio ambiente, de pH neutro, em mistura com o solo adquire a propriedade de aerador. Caso entre em contato com outras substâncias, ele adquirirá a classificação e o pH do produto mais impactante ao meio ambiente.

Fonte: TETRAQUÍMICA (2006).

Surge um material de baixa densidade, branco em forma de grãos denominado “perlita expandida”, com pouca semelhança com perlita no estado bruto. A água contida na perlita é evaporada no processo de aquecimento

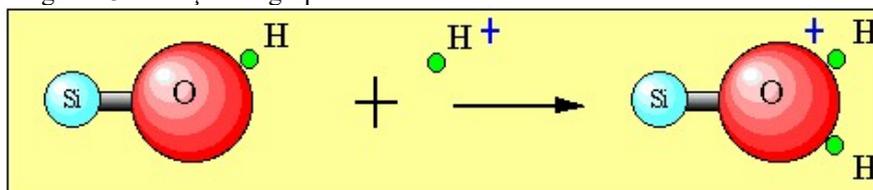
formando uma infinidade de bolhas de ar seladas e conectadas entre si. Essas bolhas são responsáveis por seu peso e excelentes propriedades físicas (KALYANI et al., 2005).

pH de Zero Carga (pHzpc)

A perlita é um alumino-silicato formado por grupos silanóis, com hidroxilas que podem ser protonadas e desprotonadas. O pH e a carga superficial negativa da perlita aumentam proporcionalmente, o que resulta da ionização destes grupos silanóis presentes na sua superfície (ALKAN; DOĞAN, 1998).

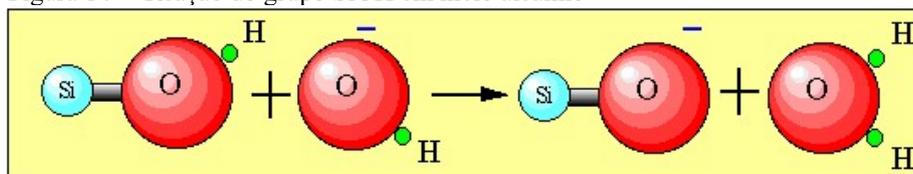
O pH do meio influencia na presença dos grupos silanóis, pois modifica os sítios ativos hidroxilas. Íons H^+ são cátions trocáveis presentes nos grupos Si-OH e Al-OH, em maior proporção na composição da perlita. A variação do pH no sistema pode afetar o comportamento de troca iônica controlado por forças eletrostáticas. Em soluções ácidas, a superfície sólida pode ter impacto positivo na carga superficial e negativo para soluções básicas, o que interfere no processo de adsorção (Figura 13 e Figura 14) (ALKAN; DOĞAN, 1998).

Figura 13 – Reação do grupo SiOH em meio ácido



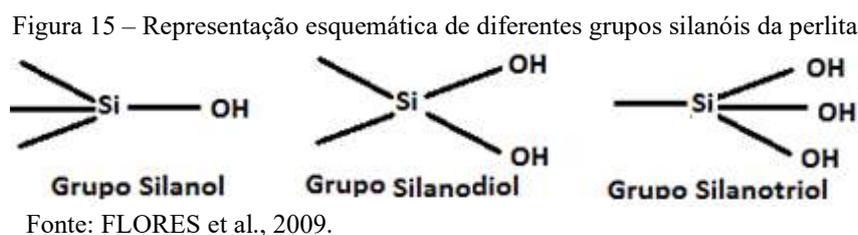
Fonte: MARKOS, 2006.

Figura 14 – Reação do grupo SiOH em meio alcalino



Fonte: MARKOS, 2006.

O pH de zero carga da perlita é o pH onde a superfície do mineral possui carga líquida igual a zero, e é utilizado para caracterizá-la. Este parâmetro é importante porque permite prever a carga na superfície do adsorvente em função do pH e, desta forma, avaliar porque dependendo do pH da solução a adsorção ocorre de maneira mais eficiente do que em outro (ALKAN; DOG˘ANDOG˘AN, 1998). A Figura 15 apresenta os diferentes grupos silanóis da perlita.



1 Principais usos da perlita

A vasta gama de aplicações da perlita inclui agricultura, como condicionador de solo, indústria da construção, como isolamento de telhado, tijolos refratários, isolamento de tubos e preenchimento de blocos de alvenaria, na indústria é utilizada no tratamento de água como filtro, retém partículas pelos efeitos de profundidade e adsorção; como abrasivo compõe tintas, esmaltes, vidro, plásticos, resinas, borrachas (ALKAN; DOG˘ANDOG˘AN, 1998; PICHÓR; JANIEC, 2009).

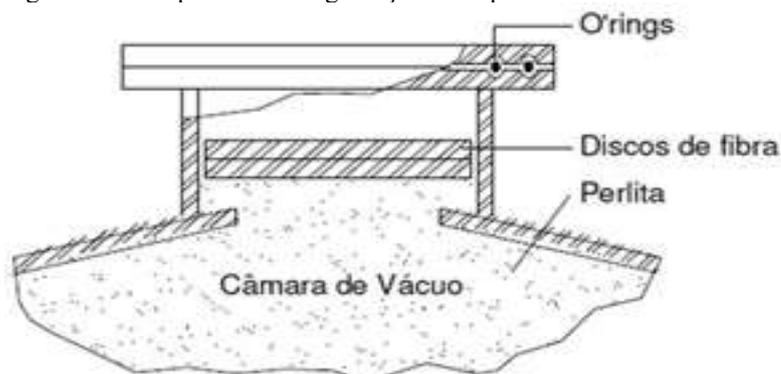
No processo de filtração, na torta formada pela perlita e impurezas, os poros permanecem, não compactam, aumentando a produtividade. A torta final possui menor peso, o que reduz os custos de disposição deste resíduo (PERLITE INSTITUTE, 2012).

A baixa condutividade térmica, facilidade de manipulação e não-inflamabilidade contribuem para sua aplicação no isolamento criogênico, unidades de separação de ar, caixas frias, tanques de nitrogênio, oxigênio e argônio (PERLITE INSTITUTE, 2012).

Nos tanques criogênicos, o sistema de isolamento é constituído por uma câmara entre os tanques interno e externo, neste espaço que é preenchido com perlita, é produzido vácuo, o que elimina a transmissão de calor por convecção e a

perlita em pó, praticamente elimina a transmissão de calor por radiação, conforme representado na Figura 16. Quando há necessidade de manutenções ou é atingida a vida útil o tanque pode ser desmontado e substituída, durante esse processo, a perlita é removida e pode ser reutilizada (DALPIAZ, 2010).

Figura 16 – Dispositivo de segurança do tanque externo.



Fonte: DALPIAZ, 2010.

Adsorventes são materiais muito porosos onde a adsorção ocorre inicialmente nas paredes dos poros ou nos sítios específicos dentro da partícula. A escolha do adsorvente ideal leva em conta o custo, facilidade de obtenção e abundância (ORTIZ, 2000).

Uso da perlita como adsorvente

A perlita é utilizada como adsorvente em estudos realizados que afirmaram seu poder de adsorção em sistemas (ALIHOSSEINI et al., 2010; FARD, 2018; SOUZA, 2010; TEAS ET AL., 2001; OLIVEIRA, 2016; RIBEIRO, 2013 e BELARMINO, 2011). A partir destes estudos, a perlita expandida foi selecionada para ser utilizada como adsorvente neste trabalho e será tratada de forma mais detalhada a seguir.

Alihosseini et al. (2010) estudaram a adsorção de petróleo bruto utilizando perlita expandida correlacionado com a isoterma de equilíbrio de Langmuir, Freudlich, Tempkin e três parâmetros das isotermas de Redlich-Peterson, os modelos foram comparados. Os resultados mostraram que o potencial da perlita

expandida é adequado para esse sistema e que o modelo de Redlich-Peterson pode representar melhor os dados de isoterma de equilíbrio para o petróleo bruto adsorvido por perlita expandida.

Fard (2018) estudou a adsorção de contaminantes da água de esgoto utilizando perlita, perlita modificada (silicada), zeólita e areia. Foi demonstrado que a perlita modificada removeu mais de 90% da turbidez e funcionou mais eficientemente do que outros materiais em caso de alta turbidez (mais de 100 NTU).

Souza (2010) avaliou o potencial de adsorção de petróleo utilizando perlita expandida e hidrofobizada com óleo de linhaça. Neste trabalho foram utilizadas técnicas de Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Análise Térmica Diferencial (DTA) para estudar o comportamento térmico. Os resultados obtidos por TG/DTG em atmosfera dinâmica de ar mostraram perdas de massa em uma única etapa para a perlita expandida pura adsorvida com petróleo, indicando que a adsorção de petróleo foi limitada e que a granulometria não interferiu nesse processo. A adsorção do petróleo na perlita pura expandida e na perlita hidrofobizada com óleo de linhaça não apresentou bons resultados, caracterizando um aumento de 0,5 a 4,6% na perlita pura e 3,3 % na perlita hidrofobizada de 32 a 60 mesh.

Teas et al. (2001) compararam a sorção de petróleo e de óleos de ciclo leve LCO (light cycle oil) e LGO (light gas oil) por diferentes materiais sorventes: três tipos de perlita expandida (1, 2 e 3) com diferentes mesh, PP e fibra celulósica. O PP (6,5-10,2 g.g⁻¹) apresentou resultados de sorção bem superiores aos obtidos pela sorventes de perlita expandida (2,0 a 3,5 g.g⁻¹) e fibra celulósica (2,3 a 3,8 g.g⁻¹). Os pesquisadores destacam que a substituição de sorventes sintéticos por materiais como a perlita é possível, porém, é preciso considerar fatores tais como a sua abundância na região de derramamento.

Oliveira (2016) estudou o processo de adsorção da ortofenantrolina pela perlita expandida. Utilizaram diferentes concentrações do adsorbato (0,005; 0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,25 e 0,5 mol.L⁻¹) e analisaram a solução final por espectrofotometria de absorção molecular na região Uv-vis e os resíduos sólidos, por Termogravimetria. Após avaliação dos resultados, constataram que o processo de adsorção não é eficaz para concentrações baixas, mas com o aumento da

concentração (0,1; 0,25 e 0,5 mol.L⁻¹) do adsorvato ocorre taxas maiores de adsorção sendo a adsorção máxima na concentração de 0,1 mol.L⁻¹.

Ribeiro (2013) estudou a adsorção de contaminantes da água de esgoto utilizando perlita. Foi demonstrado que houve redução de mais de 80% da turbidez.

1.7 Adsorção

A adsorção é um fenômeno que envolve um sólido (adsorvente) e um fluido, líquido ou gás (adsortivo), em que há interação intermolecular e os componentes retidos pela superfície (adsorbato) (GREGG E SING, 1982). Nesta operação de transferência de massa, as moléculas do fluido penetram sobre uma superfície, geralmente sólida, onde ocorre enriquecimento de componentes na região interfacial devido a um não balanceamento de forças (SILVA, 2016).

O tipo de adsorção, se fisissorção ou quimissorção, depende das forças de ligação envolvidas entre adsorbato e superfície do adsorvente (FOUST et al., 1982).

Ocorre uma fisissorção, quando há efeitos atrativos relativamente fracos, não específico, rápido e reversível entre o adsorvente e adsorbato, formando-se camadas mononucleares sobrepostas com a diminuição da força de adsorção à medida que o número de camadas aumenta, visto que o adsorbato encontra-se ligado à superfície somente por forças de van der Waals (FOUST et al., 1982).

Do ponto de vista termodinâmico, o calor envolvido na fisissorção está situado, em geral, abaixo de 10 kcal.mol⁻¹, ou seja, da ordem de uma condensação/vaporização (NASCIMENTO et al., 2014).

Já na quimissorção, a interação é mais específica ou seja, nem todas as superfícies sólidas possuem sítios ativos capazes de adsorver quimicamente o adsorvato e nem todas as moléculas presentes no fluido podem ser adsorvidas quimicamente, somente aquelas capazes de se ligar ao sítio ativo de adsorventes (ADAMSON; GAST, 1997). Além disso, a quimissorção é mais forte do que as forças de adsorção física e se limitam à cobertura monocamada, essas forças diminuem à medida que a extensão da superfície ocupada aumenta. Há

transferência de elétrons entre o sólido e a molécula adsorvida, formando uma ligação química entre adsorvente e adsorbato e surge um composto químico apenas na superfície do sólido (ATKINS, 1999). Na adsorção química, o calor de adsorção é da ordem do calor de reação, portanto acima de 20 kcal/mol.

Ocorrem interações específicas que resultam de estruturas moleculares que permitem atrações locais relativamente fortes entre partes permanentemente pobres em elétrons de uma estrutura química e partes permanentemente ricas em elétrons de outra molécula. São interações denominadas polares e possíveis quando parte das moléculas agem como doador de elétrons (receptor de $H^{\delta+}$) e outra como receptor de elétrons (doador de $H^{\delta-}$) (ALTHER, 2001).

2 Fatores que influencia na adsorção em superfície porosa

Temperatura

Por meio do acompanhamento da adsorção com o tempo, em diferentes temperaturas, são obtidas as constantes de velocidade de adsorção (NASCIMENTO et al., 2014).

A velocidade de vários processos físico-químicos aumenta consideravelmente com a temperatura e em geral, havendo elevação da temperatura há redução na adsorção, o que se deve, em parte, às moléculas adsorvidas terem maiores energias vibracionais, sendo desorvidas da superfície. No entanto, deve-se considerar que alguns sistemas podem ter esta capacidade elevada (COONEY, 1999).

Natureza do solvente (adsortivo)

A principal função do solvente (adsortivo) é sua participação na formação da interface, tendo um efeito bastante relevante, não podendo competir com a superfície do sólido em atrair o soluto. A adsorção de um soluto orgânico presente

em um solvente orgânico é muito menor do que quando o mesmo está presente em solução aquosa (COONEY, 1999). Além disso, como as espécies adsorvidas sofrem ionização no pH (potencial hidrogeniônico) da solução, as características da mesma influencia na adsorção (CURBELO et al., 2006).

Propriedades do adsorvato

O tamanho da espécie é sempre importante quando a taxa de adsorção é dependente do transporte intraparticular. A área superficial do adsorvente aumenta com o decréscimo do tamanho de partículas do adsorbato e assim, a taxa de adsorção aumenta (FAUST, 1983).

Outra característica de forte influência é a polaridade do adsorvato, o que determina se esse terá mais afinidade para o solvente ou para o adsorvente de acordo com suas características (NASCIMENTO et al., 2014).

Em geral, uma alta solubilidade indica uma forte interação entre soluto e solvente, neste caso, é esperado que a taxa de adsorção seja baixa devido à necessidade de quebra da interação soluto/solvente (FAUST, 1983).

pH e o potencial de zero carga (pH_{ZPC})

O pH do meio influencia na capacidade de adsorção, principalmente quando o composto a ser removido é ionizável. Assim, este fator afeta a adsorção na medida em que determina o grau de distribuição das espécies químicas, pois determina a carga da superfície do adsorvente e governa as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato (BAUTISTA-TOLEDO et al., 2005). Devido ao fato das cargas da superfície do adsorvente dependerem da sua composição e das características da superfície, a intensidade do efeito do pH pode ser maior ou menor conforme o adsorvente. O potencial de zero carga é o potencial no qual a carga superficial do adsorvente é nula (FIOL; VILLAESCUSA, 2009).

A importância desta variável na adsorção é que as cargas do adsorvato e do adsorvente devem ser opostas para que haja uma maior interação eletrostática entre ambos, pois, se as cargas forem iguais, o processo de adsorção será

prejudicado, pois haverá repulsão eletrostática (BAUTISTA-TOLEDO et al., 2005).

O pH do ponto de zero carga (pH_{zpc}), é o pH abaixo do qual as cargas superficiais do adsorvente são carregadas positivamente sendo a adsorção de ânions favorecida. Para valores de pH superiores ao pH_{zpc}, o material terá cargas superficiais negativas e a adsorção de cátions é favorecida (APPEL et al., 2003).

Natureza do adsorvente

Tendo em vista que, a substância a ser adsorvida deve mover-se dentro do adsorvente, que pode apresentar uma certa viscosidade, a natureza físico química do adsorvente é determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade, volume específico dos poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor (DOMINGUES, 2005).

Nos adsorventes empregados em processos onde a fase fluida é um gás, uma elevada capacidade de adsorção está ligada a uma superfície interna bastante desenvolvida. Quando os adsorventes estão em processos em meio líquido, sofrem inicialmente ação na superfície externa, assim, a superfície interna destes sólidos deve ser acessível através de poros ou capilares com diâmetros superiores aos necessários para uma adsorção rápida de gás (GREGG; SING, 1982).

Além da natureza do sólido influenciar nas cargas superficiais do adsorvente, também podem definir a afinidade deste com o adsorbato. Adsorventes polares, conhecidos como hidrofílicos, possuem afinidade com substâncias polares como a água e os álcoois. Adsorventes não-polares, hidrofóbicos, possuem maior afinidade com hidrocarbonetos e óleos (NASCIMENTO et al., 2014).

A estrutura do sólido é particularmente essencial, pois afeta a seletividade do adsorvente. Duas características do sólido são importantes e influenciam conjuntamente na adsorção: área superficial e o tamanho dos poros (NASCIMENTO et al., 2014).

Estrutura do poro

A acessibilidade da molécula de adsorbato para a superfície interna de adsorção é determinada pelo tamanho do poro. A estrutura do poro é importante devido ao seu diâmetro, que pode agir como agente controlador no processo de adsorção, permitindo que partículas de diâmetros menores possam penetrar no interior do sólido e excluindo aquelas com diâmetro superior (DOMINGUES, 2005).

Pode-se classificar os poros do material de acordo com seu tamanho (BART; GEMMINGEN, 2012).

- Microporos: Esses poros, geralmente, contribuem de maneira predominante para a capacidade de adsorção de moléculas pequenas. A molécula nunca escapa do campo de força da parede do poro, mesmo quando se encontra no centro do poro. Esses poros, geralmente, contribuem de maneira predominante para a capacidade de adsorção de moléculas pequenas. O transporte dentro desses poros pode ser severamente limitado por efeito estérico (BART; GEMMINGEN, 2012).

- Mesoporos: além de contribuírem para a capacidade adsorptiva, atuam como canais para fornecer acesso aos microporos menores, sendo este seu papel principal (BART; GEMMINGEN, 2012)..

- Macroporos: tem pouca contribuição na capacidade de adsorção, no entanto, contribuem para os efeitos cinéticos. Permite que as moléculas de adsorbato se difundam na superfície do adsorvente com o mínimo de resistência difusional até o sítio propriamente dito (BART; GEMMINGEN, 2012).

Pela definição da IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), o microporo tem menos de 20 Å (2,0 nm), mesoporo (de 20 a 500 Å) e macroporo (maior que 500 Å) (CURBELO, 2002).

Logo, há duas fases no adsorvente, aquela adsorvida na sua superfície, e uma outra fase fluida no interior do poro (LUZ, 2009).

Área superficial do adsorvente

A quantidade de sítios para a adsorção também é relevante, uma vez que os componentes adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa. Quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção (RUTHVEN, 1984).

A medida da área superficial é obtida através da quantidade de gás nitrogênio, que é uma molécula pequena, pode ser adsorvida à -196°C (ponto de ebulição do N_2). Quando o experimento visa a adsorção de molécula maior, parte considerável da área superficial interna está inacessível. A superfície de alguns adsorventes e, portanto, suas capacidades adsorptivas podem ser alteradas se algumas espécies são adsorvidas ou se alguns tratamentos são efetuados visando modificar drasticamente suas propriedades e carga superficial (COONEY, 1999).

A capacidade de adsorção dos sólidos adsorventes é proporcional a área superficial específica. No entanto, a área superficial específica apenas, não é adequada para explicar a capacidade de adsorção de sólidos porosos. Muitos dos microporos possuem dimensões moleculares. Assim, espera-se que a molécula de soluto penetre com facilidade num poro com determinado diâmetro crítico e seja excluída de poros menores do que as moléculas. A área superficial acessível para adsorção é influenciada pelo tamanho das moléculas, e somente poros acessíveis para a adsorção vão contribuir para o efeito da área superficial (FAUST, 1983).

A superfície que corresponde a 1 g de adsorvente é denominada superfície específica, sendo esta grandeza normalmente medida em $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. Os adsorventes ativos, ou seja, os que têm capacidade de adsorção elevada por modificações na superfície, possuem superfície específica bastante elevada (GREGG; SING, 1982).

3 Equilíbrio de adsorção

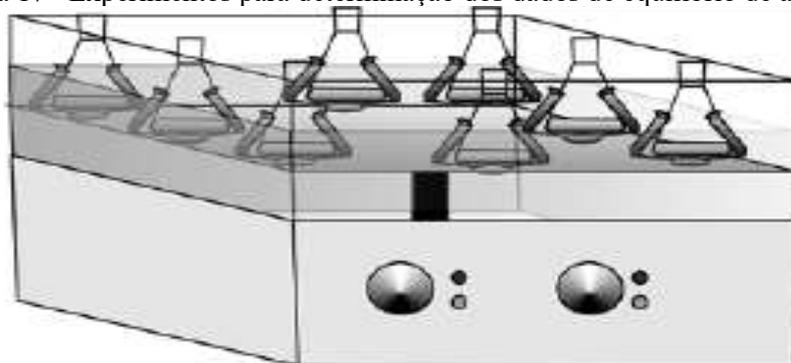
Experimentalmente, quando o adsorbato é colocado em contato com o adsorvente, as moléculas ou íons tendem a fluir do meio aquoso para a superfície do adsorvente. Um sistema adsorptivo-adsorvente é dito em equilíbrio quando não há variação nem na concentração da fase fluida e nem na concentração do adsorbato, sob condições definidas, ou seja, quando não ocorre mais a transferência (COONEY, 1999). Este equilíbrio de fases pode ser representado por isotermas (curvas à temperatura constante que relacionam os dados entre a concentração do adsorbato e a massa do adsorvente), ou por equações. Pode-se ainda determinar a capacidade de adsorção do adsorvente, que é a massa de soluto

adsorvida sobre a superfície do adsorvente por unidade de massa de adsorvente (q_e), expresso por $\text{mg adsorbato (soluto).g}^{-1}$ adsorvente (NASCIMENTO et al., 2014).

No estudo da adsorção, visando obter a eficiência de um determinado adsorvente e as melhores condições de adsorção, ensaios de equilíbrio em laboratório devem ser realizados.

Neste trabalho foram realizados experimentos em banho finito, onde uma massa conhecida do adsorvente (m) é adicionada a um certo volume (V) de solução de soluto com uma concentração inicial (C_0) sob agitação durante um certo tempo de contato e a uma dada temperatura como representado na Error: Reference source not found .

Figura 17 –Experimentos para determinação dos dados de equilíbrio de adsorção



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

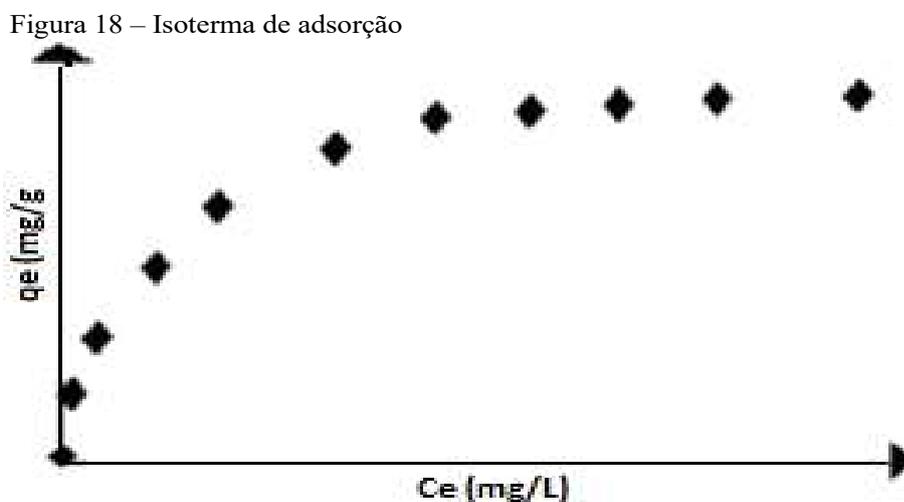
A queda da concentração do adsorbato, que se encontra diluído em um componente inerte ao longo do tempo, indica a quantidade que está sendo adsorvida no sólido (COONEY, 1999).

Os experimentos em batelada são mais simples de serem desenvolvidos e podem ser obtidas importantes informações para um experimento em coluna ou até mesmo em escala piloto. Para pequenos volumes e grandes tempos de contato o sistema em batelada é o mais adequado (NASCIMENTO et al., 2014).

Quando uma quantidade de adsorvente é colocada em contato com um fluido contendo o adsorbato, a adsorção ocorre até que o equilíbrio seja atingido

sob condições isotérmicas (NASCIMENTO et al., 2014). A obtenção de uma isoterma de adsorção pode ocorrer por um processo simples em que uma massa de adsorvente é adicionada em um determinado volume (V) de uma série de soluções com concentrações iniciais (C_0) diferentes e conhecidas.

Quando o equilíbrio de adsorção é atingido, tem-se a concentração final de soluto na solução em equilíbrio (C_e , em gramas ou mols por litro de solução) e a capacidade de adsorção do adsorvente (q , em massa ou mols de adsorvato, por unidade de massa de adsorvente). Assim, é possível obter um gráfico de q versus C_e como mostrado na Figura 18 (COONEY, 1999).



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

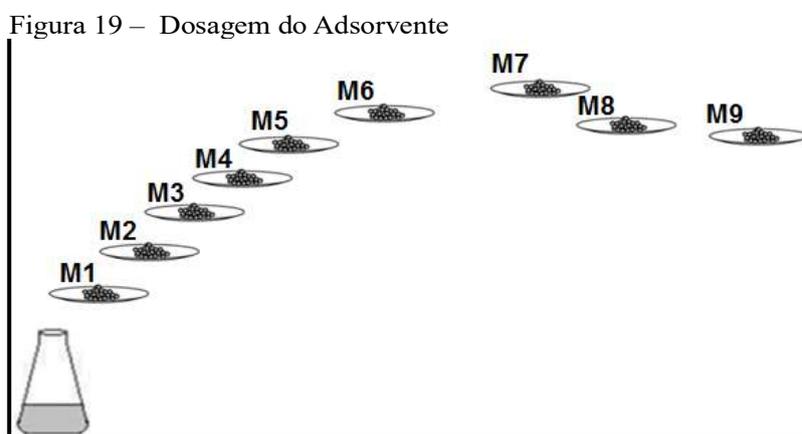
Visando conhecer os valores das variáveis C_e e q , realiza-se a separação do adsorvente da solução por meio de centrifugação, e analisa-se a solução sobrenadante para determinar a concentração residual de adsorvato (C_e), por meio de técnicas analíticas, dependendo do adsorvato utilizado, tais como: cromatografia gasosa ou líquida, espectrometria no ultravioleta ou visível, espectrometria de absorção ou emissão ou outros meios adequados (NASCIMENTO et al., 2014).

Para obter valores de q , deve-se fazer um balanço de massa, em que a quantidade de adsorvato no adsorvente deve ser igual à quantidade de adsorvato removido da solução, ou, em termos matemáticos (Equação 1) (NASCIMENTO, 2014).

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: q : capacidade de adsorção (mg.g^{-1}); C_0 : concentração inicial do adsorvato (mg.L^{-1}); C_e : concentração do adsorvato no equilíbrio (mg.L^{-1}); V : volume da solução (L); m : massa do adsorvente (g).

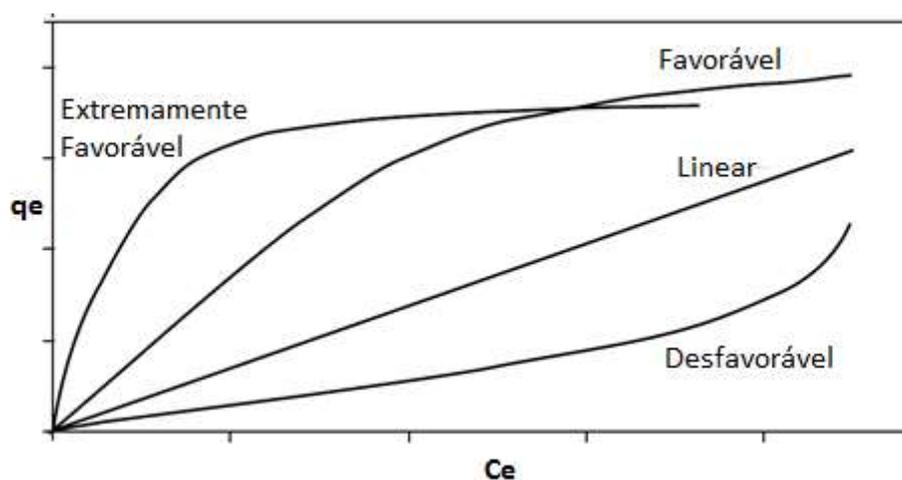
O estudo da isoterma pode ser realizado variando-se a massa de adsorvente e mantendo constante a concentração do adsorvato. O objetivo dos experimentos de dosagem do adsorvente (Error: Reference source not found) é verificar se, com o aumento da dosagem do adsorvente, é possível remover o adsorvato (poluente) para níveis aceitáveis de concentração, conforme valores da legislação (PERRY, 1998).



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

As diversas formas das isoterma, apresentam informações importantes sobre o processo de adsorção. As isotermas podem ser classificadas como representado na Figura 20:

Figura 20 – Formas possíveis de isotermas de adsorção



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

Isoterma linear: Ocorre quando a massa de adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é proporcional à concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida (MOREIRA, 2008).

Isoterma favorável e extremamente favorável: Representa a adsorção onde a massa do adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é alta para uma baixa concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida (MOREIRA, 2008).

Isoterma irreversível e Isoterma desfavorável: Ocorre quando a massa de adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente não depende da concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida, sendo pequena a massa de adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente, mesmo para uma alta concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida (MOREIRA, 2008).

4 Modelos de adsorção

Langmuir e Freundlich desenvolveram expressões matemáticas propondo a utilização de dois ou mais parâmetros para ajustar aos dados experimentais sobre os valores de q versus C_e , o que torna mais fácil a sua utilização (SOUSA NETO et al., 2011).

A escolha pela utilização das isotermas de Langmuir e Freundlich ocorreu devido ao fato de se prever a capacidade máxima de adsorção do material, a

capacidade de descrever o comportamento dos dados experimentais e o fato de elas apresentarem apenas dois parâmetros.

Modelo de Langmuir

A isoterma de Langmuir apresenta os seguintes pressupostos (COONEY, 1999):

1. A adsorção ocorre em monocamada (adsorção monomolecular), portanto, cada molécula pode ser abrigada em um sítio ativo;
2. Existe um número definido de sítios de localização bem definida, sendo portanto, a adsorção das moléculas localizada;
3. Os sítios têm energia de adsorção (força de ligação entre moléculas de adsorbato e superfície do adsorvente) equivalente, não havendo interação entre as moléculas adsorvidas.
4. As moléculas adsorvidas em sítios vizinhos não interagem. Assim, a adsorção ocorre até que a condição de equilíbrio seja atingida, o que representa a condição de uma completa cobertura monocamada, pois o número de sítios por unidade de peso é fixo.

A Error: Reference source not found é representativa do modelo (NASCIMENTO et al., 2014):

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

q_e é a quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio em (mg.g^{-1});

q_{max} : capacidade máxima de adsorção (mg.g^{-1});

K_L : constante de interação adsorbato/adsorvente (L.mg^{-1});

C_e : concentração do adsorbato no equilíbrio (mg.L^{-1}).

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

q_e : massa de soluto adsorvido por unidade de massa do adsorvente (mg.g^{-1});

C_e : concentração de equilíbrio (concentração final do soluto na solução) (mg.L^{-1});

$1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície, n é geralmente, maior que 1;

K_F : constante de capacidade de adsorção de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} (\text{g}^{-1}) \text{L}^{1/n}$).

Uma forma linear é descrita pela Error: Reference source not found:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{Equação 3})$$

Construindo o diagrama de $\log q_e$ versus $\log C_e$, a partir de regressão linear, pode-se determinar os parâmetros K_F e $1/n$, a partir do coeficiente angular (n) e da interseção da reta com o eixo das coordenadas (K_F). O valor de n (constante de Freundlich) permite fazer algumas inferências a respeito do processo adsorptivo, quanto maior este valor (menor valor de $1/n$), mais intensa a ligação entre adsorvente e adsorvato. Quando o valor de n está entre 1 e 10, significa a ocorrência de uma adsorção favorável (FEBRIANTO et al., 2009)..

Para o valor $\frac{1}{n}$ igual a 1, tem-se a adsorção linear, as energias são idênticas para todos os sítios de adsorção. Quando o valor de $\frac{1}{n}$ for maior do que 1, a afinidade do solvente com o adsorvente é maior, há uma forte atração intermolecular entre os dois (SITE, 2001).

5 Adsorvente

A substância em cuja superfície se dá a adsorção é denominada adsorvente. As moléculas do adsorbato quando adsorvidas, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção (SEADER; HENLEY; ROPER, 1998).

Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas, entretanto, poucos sólidos que são capazes de adsorver gases e líquidos apresentam seletividade e poder suficiente para torná-los adsorventes comerciais. (RUTHVEN, 1984).

6 Tipo de adsorventes

Adsorventes amorfos: As áreas específicas dos adsorventes amorfos, como sílica gel, alumina ativada e carvão ativado estão em torno de 200 a 1000 m².g⁻¹ (NASCIMENTO et al., 2014). O efeito de possuir área específica muito elevada para os carvões ativados é a perda de força física, limitando sua utilização. Partículas com grande área superficial contêm grande proporção de microporos, o que as torna inadequadas para aplicações envolvendo adsorção de grandes moléculas (LEE, 2006). A distribuição do tamanho do poro, no adsorvente amorfo típico, pode ser vasta, medindo de poucos nanômetros a até um micrômetro. Essa divisão é arbitrária, pois é o tamanho dos poros relativo ao tamanho da molécula de adsorbato, e não o tamanho absoluto dos poros que determina o comportamento do processo adsorptivo, no entanto, o conceito geral é útil (LEE, 2006).

Adsorventes cristalinos: Compõem essa classe de adsorventes, as zeólitas, silicatos, fosfatos. A estrutura cristalina determina os tamanhos dos microporos. Não havendo uma gama de tamanho de poros (NASCIMENTO et al., 2014). Um certo nível de controle é exercido algumas vezes pela troca iônica. Tais materiais tem portanto uma distribuição de tamanhos de poros bem definida com os microporos intracristalinos (alguns décimos de nanômetro) ligados entre si através

de uma rede de macroporos com um diâmetro da mesma ordem do tamanho do cristal (próximo de $1\mu\text{m}$) (BART, 2012).

Dessecantes: São sólidos adsorventes que apresentam grande capacidade de adsorção de umidade, são usado para adsorção seletiva de umidade de um fluxo de gás ou líquido. Área específica elevada (poros pequenos) e superfície altamente polar são características de um dessecante eficiente. Exemplos de dessecantes utilizados: alumina ativada, sílica gel e zeólitas ricas em alumínio (NASCIMENTO et al., 2014).

7 Adsorventes mais utilizados industrialmente

Algumas características favoráveis de eficiência são necessárias para aplicação comercial de um adsorvente, como resistência mecânica, inércia química, seletividade, custo, perda de carga, densidade, aglomeração (GOMIDE, 1988). Alguns adsorventes de uso industrial são listados a seguir.

Carvão Ativado

O carvão ativado é o carvão sólido obtido termicamente que apresenta forma microcristalina, não grafitica, áreas de superfície interna elevada (geralmente variando de 500 a $2000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) devido ao processo de ativação para aumentar a porosidade interna que é comparável a uma rede de túneis que se bifurcam em canais menores e assim sucessivamente (CLAUDINO, 2003).

O processo de produção do carvão ativado envolve uma etapa de pirólise ou decomposição térmica de materiais carbonáceos seguida de uma etapa de oxidação (COONEY, 1999). O carvão resultante da pirólise ou é ativo ou pode ser ativado utilizando-se agentes oxidantes, como CO_2 , ar ou, a elevadas temperaturas (700 a 1100°C) com a finalidade de formar a estrutura porosa (RUTHVEN, 1984).

A afinidade por substâncias orgânicas do carvão ativado se deve ao fato de ser uma substância não polar, assim, é usado na adsorção de compostos orgânicos para purificação de água, no branqueamento de soluções de açúcar e em sistemas para recuperação de solventes (COULSON e RICHARDSON, 1982).

Embora haja uma multiplicidade de aplicações, algumas desvantagens dos carvões ativados limitam sua utilização, como: alto custo, dificuldade e alto custo de regeneração, não-seletividade, ineficácia de certos tipos de adsorvatos (SAVOVA et al., 2001). Estes aspectos desfavoráveis são as principais razões para o estudo de desenvolvimento de adsorventes alternativos de baixo custo, tais como residual de frutas, argila, resíduos industriais (MORAIS, 2007).

Silica-gel

O composto dióxido de silício, Si O_2 , é denominado sílica, podendo ter estrutura cristalina ou amorfa. Um polímero inorgânico inerte, resistente, duro, granular e amorfo, a sílica-gel apresenta grande porosidade obtida pela precipitação da sílica. No processo de secagem, há a aglomeração de partículas formando uma estrutura microporosa, o tamanho das micropartículas originais determinam o tamanho dos poros da sílica (GOMIDE, 1988; BART, 2012).

Moléculas polares tem maior afinidade para serem adsorvidas pela sílica. A maior aplicação deste silicato é como dessecante para recuperação de vapores de solventes orgânicos, remoção de umidade de correntes gasosas, refino de produtos destilados de petróleo, purificação de gases (GOMIDE, 1988).

A sílica gel possui relevante função na geração de uma gama de substâncias com extensa aplicabilidade prática devido à presença de grupo silanóis, em sua superfície, que permite modificação química (PRADO; AIROLDI, 2002).

Vermiculita

A vermiculita, um silicato da família das micas, é encontrada nas rochas ígneas, onde há predomínio de feldspato, nas grandes folhas nos diques de pegmatito e em muitas lavas felsíticas e pórfiros, em alguns gnaisses e xistos (CURBELO, 2002).

Possui estrutura constituída de folhas de mica interestratificada com moléculas de água, sendo constituída principalmente por potássio, magnésio, ferro, alumínio, cálcio hidratado. No processo de aquecimento (temperatura superior à 150°C) perde água, e expande-se perpendicularmente ou esfolia-se aumentando seu volume até 20 vezes (SILVEIRA, 2005).

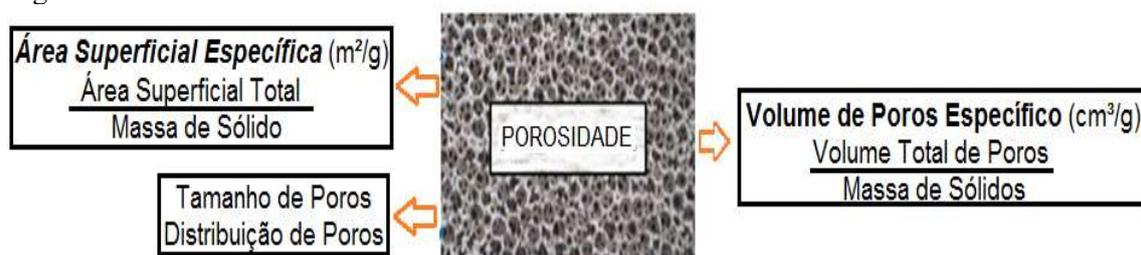
8 Técnicas analíticas para avaliação de adsorventes

Metodo BET

As propriedades de superfícies são de grande importância para diversas áreas de pesquisas associadas à deposições em superfícies, como é o caso da adsorção (GOMES TEIXEIRA; COUTINHO; GOMES, 2001).

A área superficial específica é composta pela área superficial interna e área superficial externa. A primeira é formada pelas paredes dos sulcos, poros e cavidades com profundidades maiores do que o comprimento, e com abertura para o exterior. A segunda, pela superfície dos meso e macroporos, e aumenta quando a superfície do sólido apresenta imperfeições na forma de sulcos e fissuras com dimensões maiores em comprimento do que em profundidade (HOWARD; MIDGLEY, 1981). A Figura 21 indica características dos adsorventes.

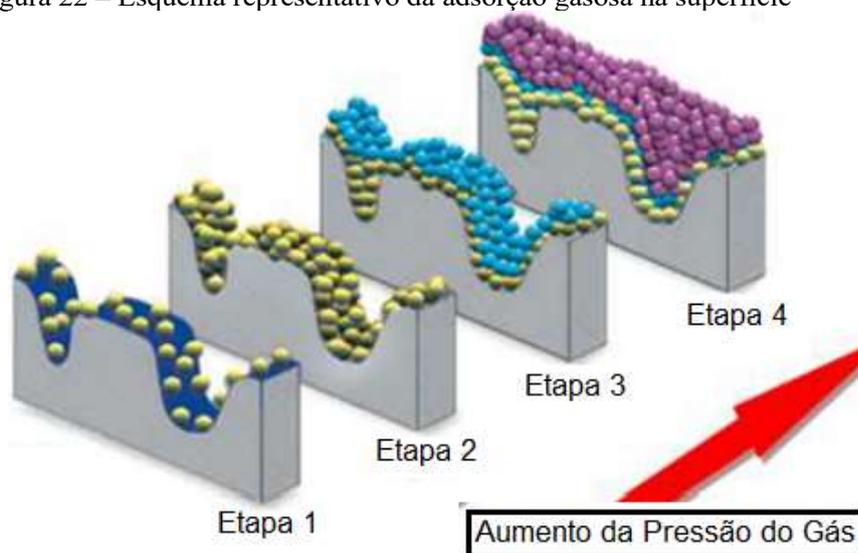
Figura 21 – Características dos Adsorventes



Fontes: DOMINGUES (2005).

O método desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller (BET) tem sido utilizado para avaliação da área superficial específica em partículas sólidas. O método consiste em determinar a quantidade de um adsorvato, um gás, necessária para recobrir uma monocamada na superfície de um adsorvente (GOMES TEIXEIRA; COUTINHO; GOMES, 2001). Quando um sólido é exposto a um gás em um sistema fechado à temperatura constante, o sólido passa a adsorver o gás, como se observa na Error: Reference source not found. Após um determinado tempo, a massa do sólido e a pressão do gás assumem um valor constante e a quantidade de gás adsorvido pode ser calculada pela diminuição da pressão por meio da aplicação das leis dos gases ou pela massa de gás adsorvida pelo sólido.

Figura 22 – Esquema representativo da adsorção gasosa na superfície



Fonte: ANDRADE (2014).

Em um experimento utilizando como gás, o nitrogênio, a uma determinada pressão mínima, os poros menores são cheios com esse gás, que ao preenchê-los fica no seu estado líquido (LLEWELLYN, 2000); os maiores vão sendo cheios (início do processo de multicamada) com o incremento da pressão / até seu preenchimento total (LLEWELLYN, 2000; ROUQUEROL, ROUQUERON e SING, 1999). No caso em que o poro seja suficientemente amplo, as moléculas irão se adsorvendo numa única camada (monocamada) e na medida em que a quantidade adsorvida aumenta, o adsorvato irá se ordenando em camadas sucessivas (multicamada).

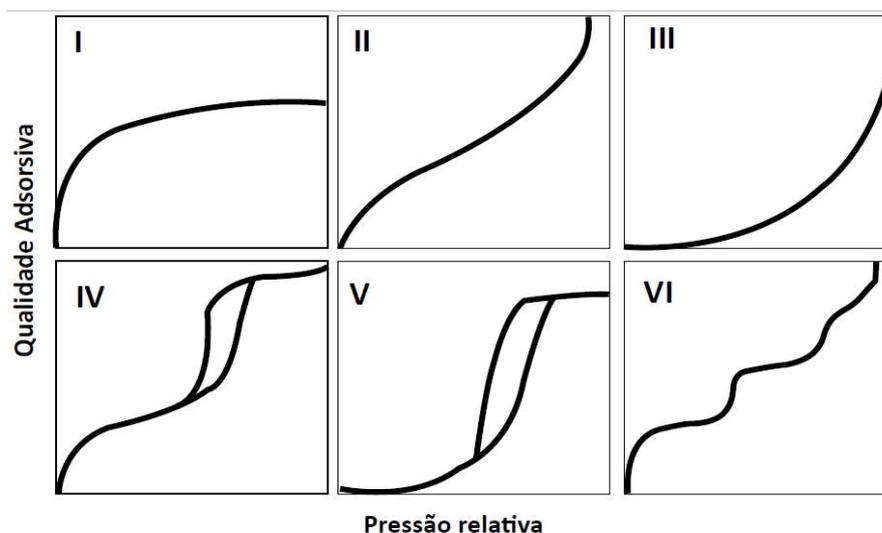
A quantidade total dos poros é determinada pela quantidade de gás adsorvido na pressão final ou pressão de saturação. Ao abaixar a pressão, o processo de desorção começa seu curso. Dado que o processo é realizado numa única temperatura, é possível obter gráficos das isotermas de adsorção e desorção do processo, ou seja, a medida da quantidade adsorvida nas diferentes pressões de equilíbrio do gás (SING, 1985), e cuja forma depende das propriedades da superfície e porosidade (FULVIO, 2009).

As isotermas são curvas de volume de Nitrogênio adsorvido (medido em cm^3/g) versus pressão relativa p/p_0 , onde p é a pressão de vapor do nitrogênio e p_0 é a pressão de saturação de N_2 adsorvível e que foi registrada continuamente durante a adsorção/desorção (HERNÁNDEZ, 2003).

Dependendo do tipo de porosidade no material, as isotermas possuirão uma geometria diferente, a IUPAC classifica as isotermas conforme Figura 23:

- a) A isoterma do tipo I é característica de sólidos com microporosidade.
- b) As isotermas do tipo II e IV são típicas de sólidos não porosos e de sólidos com poros razoavelmente grandes, respectivamente. As isotermas do tipo IV são típicas de materiais mesoporosos.
- c) As isotermas do tipo III e V são características de sistemas em que moléculas do adsorvato apresentam maior interação entre si do que com o sólido. Estes dois últimos não são de interesse para análise de estrutura porosa. A isoterma tipo V é aplicável a materiais mesoporosos.
- d) A isoterma do tipo VI é obtida através de adsorção do gás por um sólido não poroso de superfície quase uniforme.

Figura 23 – Classificação das isotermas de acordo com a IUPAC



Fonte: NASCIMENTO et al., 2014.

Termogravimetria

A termogravimetria (TG) é uma análise termoanalítica na qual é realizado o registro contínuo das alterações na massa da amostra (perda ou ganho) em atmosfera controlada, em função da temperatura (IONASHIRO, 2004).

A análise térmica possibilita ampla faixa de aplicação para medidas de propriedades físicas, estudo de reações químicas, avaliação da estabilidade térmica, estudo de decomposição térmica de minerais, estudos sobre corrosão de metais em atmosfera controlada, estudos sobre a velocidade de evaporação de líquidos e sublimação de sólidos, determinação da composição de materiais e desenvolvimento de metodologia analítica (HEMMINGER, 1994).

Espectrofotometria

A espectrofotometria é uma das técnicas analíticas mais empregadas, em função de robustez, custo relativamente baixo e grande número de aplicações e está fundamentada na lei de Lambert-Beer que estabelece relação linear entre a concentração da amostra (estado líquido, gasoso ou sólido) e a absorvância (nas regiões, visível, ultravioleta e infravermelho do espectro eletromagnético),

possibilitando determinar a concentração de uma amostra através de sua curva de calibração (absorbância versus concentração).

O analito é excitado aplicando-se energia na forma de calor, energia elétrica, luz, partículas ou por uma reação química. A excitação dos elétrons provocada pelo estímulo aplicado sob a amostra pode ou não proporcionar a emissão de luz através de transições eletrônicas (SKOOG et al., 2006).

A radiação eletromagnética que uma amostra absorve pode revelar algumas de suas características e é importante ferramenta para determinação de parâmetros físico-químicos, tais como constantes de equilíbrio e de velocidade de reações (ROCHA; TEIXEIRA, 2004).

A espectroscopia eletrônica (UVVis) baseia-se em transições eletrônicas intra-atômicas ou moleculares, responsáveis pela absorção de radiação luminosa na região do ultravioleta (200 a 400 nm) e no visível (400 a 800 nm) (HARRIS, 2008).

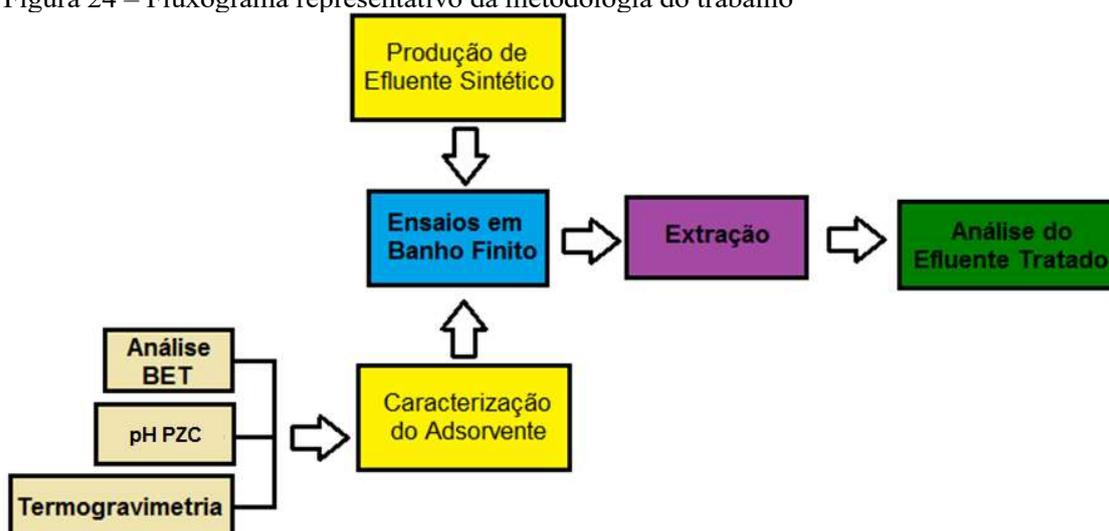
Para medidas de absorção de radiação em determinado comprimento de onda, tem-se: $A = \log(I_0 / I) = \epsilon bc$, onde A é a absorvância, I_0 é a intensidade da radiação monocromática que incide na amostra e I é a intensidade da radiação que emerge da amostra. A absorvidade molar (ϵ) é uma grandeza característica da espécie absorvente, cuja magnitude depende do comprimento de onda da radiação incidente. O termo c é a concentração da espécie absorvente e b , a distância percorrida pelo feixe através da amostra (ROCHA; TEIXEIRA, 2004).

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia deste trabalho engloba procedimentos experimentais realizados para avaliação da possibilidade de uso da perlita como adsorvente de óleos e graxas presentes no efluente sintético que simulou as características físico-químicas de efluente gerado em área de lavagem de veículos, conforme Figura 24.

Pretendeu-se estudar, principalmente, a remoção de óleos e graxas presentes na água produzida em laboratório, com o intuito de que, após o tratamento, a mesma apresentasse melhores condições para reuso.

Figura 24 – Fluxograma representativo da metodologia do trabalho



Fonte: O autor, 2019.

2.1 Materiais Utilizados

O adsorvente utilizado neste trabalho foi a perlita após ter passado pelo processo de expansão. A amostra de perlita foi adquirida de uma indústria química em Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro, onde foi anteriormente utilizada como isolante térmico em torres criogênicas. O Quadro 1 apresenta os principais insumos utilizados na realização dos experimentos.

Quadro 1 – Solventes e reagentes utilizados.

Equipamentos	Utilização
Ácido clorídrico P.A. da Vetec.	Acidificação para Emulsificação da Água Produzida
Óleo Selenia Perform 5W – 30 API SN	Preparo de Água Produzida
Cloreto de Sódio P.A. da Alpha Química	Emulsificação de Água Produzida
Detergente Comercial de Uso Doméstico	Emulsificação de Água Produzida
Ácido clorídrico 1 M	Variação de pH para determinar pH(zpc)
Hidróxido de Sódio 1 M	Variação de pH para determinar pH(zpc)
Clorofórmio P.A. Quimex	Extração do óleo

Fonte: O autor, 2019.

O Quadro 2 mostra os principais equipamentos utilizados durante os experimentos:

Quadro 2 – Equipamentos utilizados durante os procedimentos experimentais.

Equipamentos	Utilização
Analizador de área superficial (BET) Micrometrics ASAP 2020	Determinação da Area superficial pelo método BET
Agitador Mecânico IKA RW 20 digital	Preparo da água produzida
Centrífuga FANEM Excelsa II Modelo 206BL	Centrifugação para separação da fase orgânica
Balança Marte Modelo AW220 sensibilidade 0,0001 g	Pesagem da massa do adsorvente, óleo, NaCl
Agitador Magnético solidSteel	Extração de fase orgânica em clorofórmio
pHmetro TECNOPON, modelo Mpa - 210	Medição de pH da água produzida
Espectrofotômetro UV - visible Mini 1240 Shimadzu	Determinação da absorbância
Shaker Orbital LOGEN	Ensaio em banho finito
Centrífuga Refrigerada Novatecnica	Centrifugação para remoção do adsorvente
Forno Elétrico Rotativo CHINO	Processo de Expansão da Perlita

Fonte: O autor, 2019.

2.2 Métodos

Caracterização do adsorvente

pH de zero carga (pHzpc)

A determinação foi realizada utilizando 6 g de perlita em 1 L de solução aquosa sob diferentes condições de pH inicial (2, 4, 6, 7, 8 e 10). Foram utilizados diferentes tempos de agitação e rotação de 230 rpm. Em intervalos de 10 minutos, foram retiradas alíquotas de 100 mL e medido o pH, o tempo de estabilização foi de 40 minutos. Todos os valores tiveram como referência o trabalho de Santos (2011). A acidificação do meio foi possível pela adição de HCl 1 M e a alcalinidade foi obtida por meio de uma solução de NaOH, com concentração 1 M.

Foi traçado o gráfico de pH final menos pH inicial versus pH inicial. A literatura informa que o ponto de zero carga corresponde à faixa onde o pH final é igual ao pH inicial.

Processo de expansão

Neste processo, uma amostra de 125 g de perlita, foi pesada e colocada em fôrma de cerâmica, logo após foram levadas ao forno elétrico rotativo da CHINO e submetido a uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ até a temperatura de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, permanecendo nessa temperatura durante 30 min (condições baseadas em Pinto, 1994) com o objetivo de eliminar a umidade adsorvida na perlita nas condições ambientais.

Técnicas analíticas para avaliação de adsorventes

Método BET

Para avaliar a contribuição dos poros para a área superficial específica, traçam-se isotermas de adsorção de um gás, usualmente nitrogênio (STORCK; BRETINGER; MAIER, 1998). Para tal, o catalisador é inserido em uma câmara (imersa em banho de nitrogênio líquido) onde se permite a entrada de quantidades conhecidas de nitrogênio gasoso. Com isotermas de adsorção de N_2 em regiões de baixa pressão, é possível calcular a área superficial específica de um sólido, conhecendo-se o volume do gás necessário para recobrir a superfície em monocamada e a área ocupada pela molécula do gás (GREGG; SING, 1982).

Os dados de adsorção na fase gasosa foram obtidos por um porosímetro marca MICROMERITICS, modelo ASAP 2020, interfaciado a um microcomputador (Figura 25 a e b). O modelo emprega técnicas de adsorção de nitrogênio a 77 K para determinar a área superficial, o volume e tamanho dos poros de sólidos. Foi utilizado uma amostra de aproximadamente $0,2500\text{ g}$ do material em estudo. Pesado em balança analítica, que foi aquecido a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e degaseificado a vácuo para perder umidade e outros contaminantes e, em seguida, foi realizada a análise.

Figura 25 - Porosímetro - ASAP 2020



Legenda: Porosímetro - ASAP 2020 (a) e inserção da amostra (b).
Fonte: O autor, 2019.

Termogravimetria (TG)

As análises de decomposição térmica foram realizadas em termos de perda de massa total das amostras usando um analisador termogravimétrico, TA Instruments, modelo TGA Q50, equipamento que detecta a perda de peso com precisão de 0,1 μg . Para obter as curvas termogravimétricas, foram utilizados cerca de 10 mg da amostra e submetidos ao aquecimento não isotérmico sob fluxo de gás nitrogênio (99,99%) a 100 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, razão de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

Ensaio para determinação do equilíbrio de adsorção

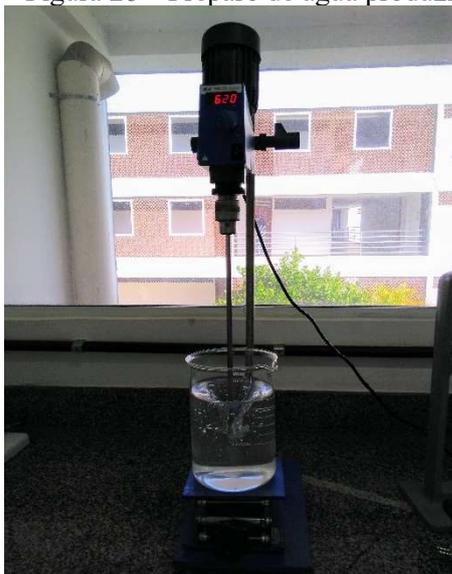
Foi desenvolvido um procedimento experimental, onde ocorre a elaboração do efluente sintético, a elaboração da curva de calibração para determinação da concentração final de óleos e graxas, o contato do efluente sintético com a perlita por tempo necessário para o equilíbrio, a extração dos óleos e graxas contidos na fase aquosa (amostra) para uma fase solvente e a análise da fase solvente, no

espectrofotômetro UV - visible Mini 1240 Shimadzu UV-visível (aproximadamente 286 nm).

Produção da água de lavagem de veículos (efluente sintético)

A água produzida utilizada neste trabalho foi elaborada em um agitador mecânico a 620 rpm, conforme Figura 26, utilizando óleo de motor de veículos Selenia Perform 5W – 30 API SN com concentração inicial na faixa de 1000 ppm. Foram produzidos 3 L de solução inicial, em duplicata, para a realização dos experimentos.

Figura 26 – Preparo de água produzida



Fonte: O autor, 2019.

Para emulsificar o óleo foram utilizados cloreto de sódio (NaCl , 35g.L^{-1}), detergente comercial e ácido clorídrico P.A. (1 mL.L^{-1}) para atingir pH 2 e para evitar a aderência das gotículas nas paredes do recipiente ou coagulação das mesmas.

Elaboração da curva de calibração e determinação da concentração final de óleos e graxas

Elaboração da Curva de calibração

A concentração de óleo presente na fase aquosa foi determinada através de análises de absorvância utilizando o Espectrofotômetro de UV – Visível.

Inicialmente, foi plotada uma curva de calibração de absorvância versus concentração utilizando quatro concentrações diferentes conhecidas do óleo de motor de veículos Selenia Perform 5W – 30 API SN. Essas concentrações variaram de 0 a 7290 ppm e o solvente utilizado para a extração foi o clorofórmio que apresenta resposta (pico significativo) quando realizada varredura em espectrofotômetro UV – visível no comprimento de onda de 286 nm, conforme observado na curva de calibração. Este procedimento de execução teve a finalidade de padronizar a determinação do teor de óleos e graxas.

Determinação da concentração de óleos e graxas em água produzida

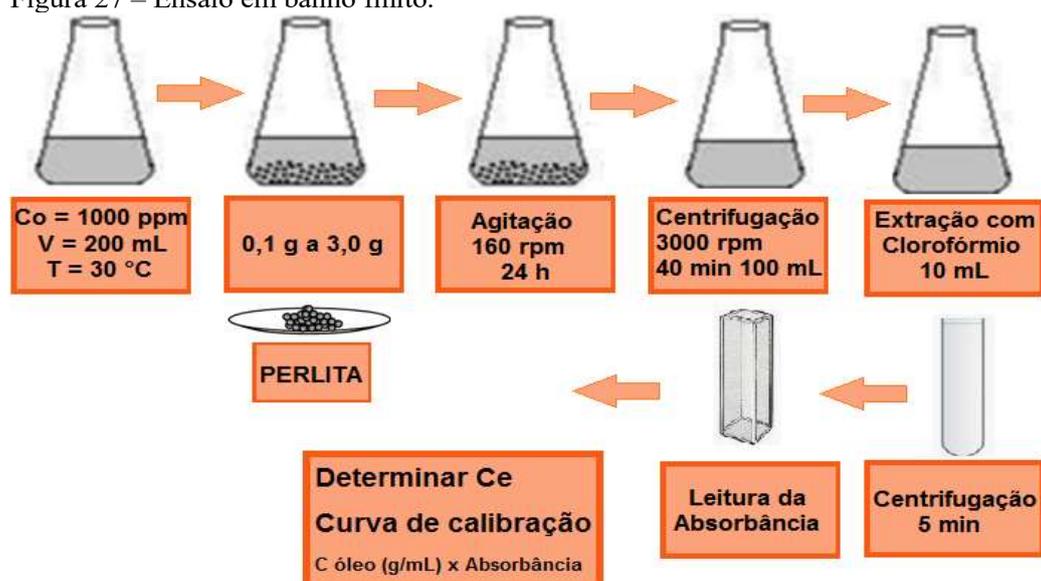
A determinação da concentração de óleos e graxas em água produzida foi realizada por meio de espectrofotometria, por se tratar de uma técnica de simples realização e apresentar resultados em curto espaço de tempo.

A determinação dos teores de óleos e graxas dispersos na água produzida é um ponto de grande importância para o trabalho, visto que, nas técnicas de extração utilizadas usualmente, necessita-se de um equipamento específico de custo muito elevado ou de uma técnica que demanda um tempo longo para obtenção do resultado.

Ensaio em banho finito

Os experimentos de adsorção do óleo na perlita realizados no banho finito foram conduzidos em erlenmeyers de 250 mL na temperatura ambiente (30°C), conforme a Figura 27.

Figura 27 – Ensaio em banho finito.



Fonte: O autor, 2019.

Seguindo as determinações da Norma ASTM D 3860/98, a fim de se obter a isoterma, cada corrida foi realizada com doze amostras contendo, em cada erlenmeyer, massas variáveis do adsorvente (0,1 g; 0,25 g; 0,5 g; 0,75 g; 1,0 g; 1,25 g; 1,5 g; 1,75 g; 2,0 g; 2,25 g; 2,5 g e 3,0 g) e volume constante de 200 mL de água produzida com concentração inicial conhecida.

A solução foi transferida do becker em que foi produzida para os erlenmeyers utilizando-se um funil de separação, conforme Figura 28.

Figura 28 – Transferência da água produzida



Fonte: O autor, 2019.

Logo após, os erlenmeyers foram levados a mesa agitadora sob agitação de 160 rpm, tempo de contato entre adsorbato e adsorvente de 24 h e temperatura ambiente de aproximadamente 30°C, constantes com a finalidade de garantir o equilíbrio.

Durante a realização dos experimentos, a perlita foi utilizada em sua forma original, não foi realizada análise granulométrica, visto que, no sistema real, essa classificação também não será realizada.

A mistura foi deixada em repouso durante tempo suficiente para que houvesse a separação da perlita, conforme Figura 29.

Figura 29 – Suspensão de perlita e água produzida



Fonte: O autor, 2019.

Posteriormente, foram separados 100 mL dessa suspensão e levados a centrifugação por 40 minutos em rotação de 3000 rpm para que houvesse total separação da perlita remanescente na suspensão.

Em seguida, a água produzida separada, foi submetida ao processo de extração do óleo e com isto a concentração de óleo extraído de cada erlenmeyer foi determinada previamente por uma curva de calibração de concentração do óleo ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) versus absorvância usando clorofórmio como solvente (CURBELO, 2002).

Extração pelo Método do Clorofórmio

Os métodos comumente utilizados para determinação do teor de óleos e graxas são: Gravimétrico, Clorofórmio e Horiba. Para a realização deste trabalho, foi utilizado o métodos do Clorofórmio. O método gravimétrico não foi utilizado devido ao grande tempo necessário para se determinar a concentração em cada amostra. O método do Horiba não foi utilizado uma vez que a Universidade não dispõe do equipamento utilizado para esta técnica. Foram coletados 100 mL de cada amostra e adicionados a essas aliquotas, 10 mL de solvente (clorofórmio). A solução é então agitada por 5 minutos e é coletada a fase solvente, após separação de fases Figura 30.

Figura 30 – Adição de clorofórmio e agitação da solução



Legenda: adição de clorofórmio na amostra (a) e agitação para extração (b)

Fonte: O autor, 2019.

A fase solvente é centrifugar a durante 5 minutos para separação das gotículas de água dispersas, se houver, evitando a interferência na leitura da absorvância no espectrofotômetro. Então é realizada a leitura da absorvância, em aproximadamente 286 nm, no espectrofotômetro e determinada a concentração do óleo através da curva de calibração.

A definição da técnica de determinação do teor de óleo em amostras de água produzida baseou-se nos valores de quantidade de solvente utilizada na etapa de extração, tempo de agitação, número de etapas de extração e comprimento de onda da leitura apresentados por (CURBELO, 2002).

A partir dos resultados, plotou-se um gráfico relacionando a concentração do adsorvato na fase líquida com a na fase sólida. Por meio das isotermas de adsorção, é possível obter a capacidade máxima de adsorção e como a interação adsorvente-adsorvato se comporta com a temperatura. Estas informações são essenciais para os dimensionamentos em escala piloto e industrial. As capacidades de adsorção (q) foram calculadas utilizando a Error: Reference source not found (pág. 40).

Os ensaios de adsorção foram realizados à temperatura ambiente (30°C) devido às condições operacionais dos lava jatos serem também ambientais (temperatura e pressão) e devido a operação de adsorção poder ser conduzida a temperatura ambiente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, estão apresentados os resultados experimentais obtidos na realização deste trabalho e sua discussão de acordo com os métodos utilizados.

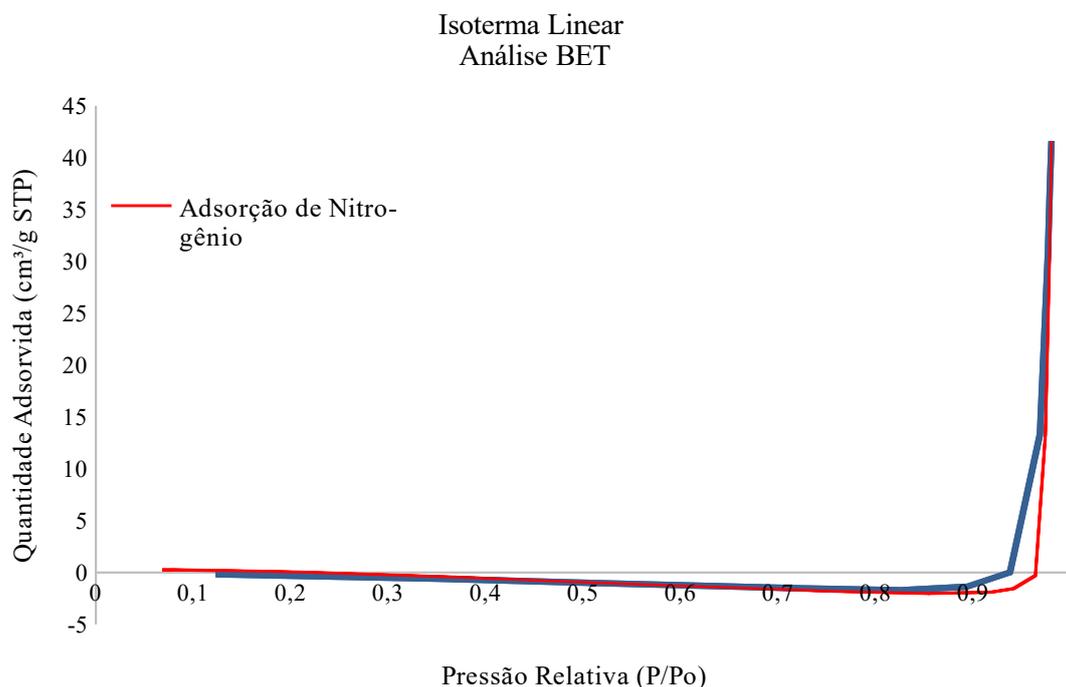
Processo de expansão

Neste processo, a perlita foi submetida à expansão em forno mufla onde ocorreu, aproximadamente, 74% de perda de água, sendo a massa inicial de 117,90 g e a massa final de 30,66 g.

Metodo BET

A determinação de área superficial do adsorvente ocorreu pelo modelo BET (Figura 31).

Figura 31 – Ensaio BET



Fonte: O autor, 2019.

Por meio do método BET foi obtida uma isoterma de adsorção do Tipo II, que é característica de materiais macroporosos e substrato heterogêneo. O ponto de inflexão da isoterma evidencia a formação da primeira camada de gás adsorvida (monocamada em baixas pressões) e com o aumento da pressão relativa, ocorre a formação de multicamada (em altas pressões) até o ponto de saturação.

A área superficial encontrada foi de 2,47m².g⁻¹ (BJH) e largura média do poro de adsorção 776,36 Å (BJH).

A Tabela 7 apresenta resultados de caracterização de adsorventes encontrados na literatura.

Tabela 7 – Caracterização de adsorventes obtida na literatura

Adsorvente	Perlita (a)	Vermiculita (b)	Crisotila (c)	Fibra de Carbono (c)	Carvão (c)	Casca de Arroz (d)
Área Superficial (m ² .g ⁻¹)	5,39	4,865	13,28	72,72	519,4	2,545
Tamanho do poro (Å)	15,54	-	3,6	3,124	3,6	6,818
Volume dos poros (cm ³ .g ⁻¹)	6,76.10 ⁻³	-	4,78.10 ⁻³	-	0,2464	3,422
Taxa de adsorção (g.g ⁻¹)	Adsorção de metais	0,0254	0,04653	0,53535	0,1039	1,63 a 1,91

Fonte: O autor, 2019.

Na Tabela 8 foram apresentados os valores encontrados experimentalmente para a caracterização da perlita.

Tabela 8 – Caracterização da perlita (experimento)

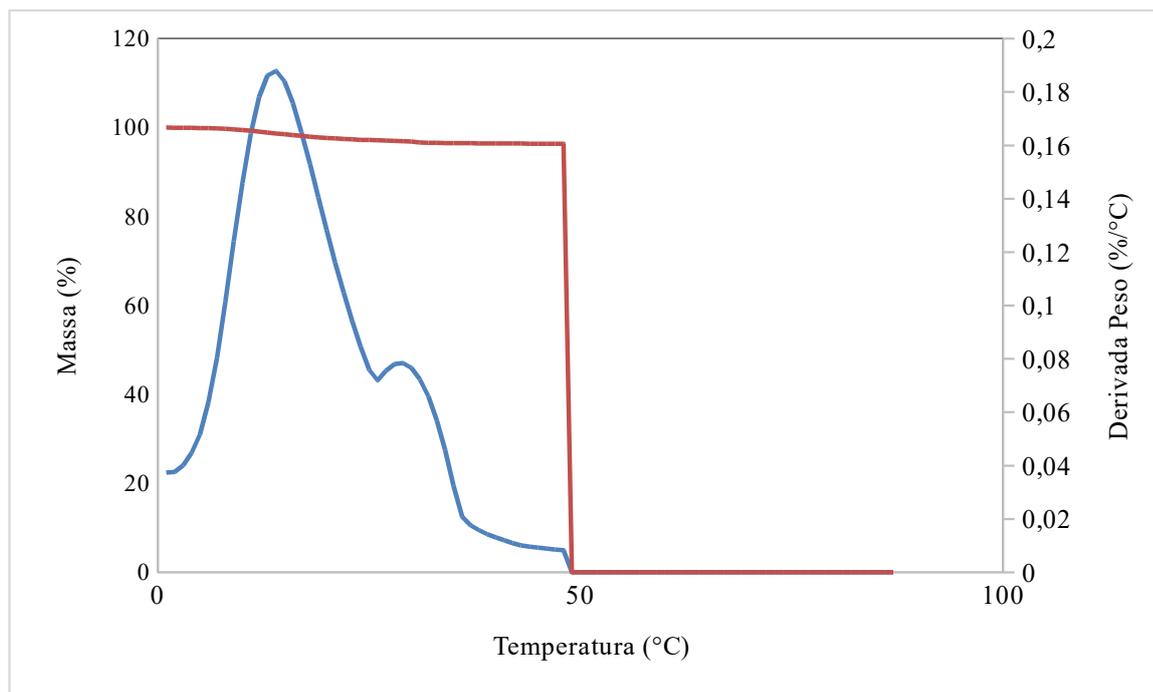
Área superficial ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Tamanho do poro (Å)	Volume dos poros ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	Taxa de adsorção ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
2,47	776,36	$1,892 \cdot 10^{-3}$	0,06459

Por meio desses resultados é possível observar que a perlita apresenta a menor área superficial e volume de poros entre os adsorventes comparados. O que justifica sua baixa taxa de adsorção. No entanto, apresenta o maior tamanho do poro, o que pode justificar uma maior taxa de adsorção entre a vermiculita e a crisotila.

Termogravimetria (TG)

A Figura 32 mostra a análise Termogravimétrica da perlita. Observa-se que ocorreram duas etapas de decomposição. A 1ª etapa ocorre na faixa de temperatura de 90°C a 190°C, correspondente a perda de provavelmente de água (CORDEIRO, 2015). A 2ª etapa ocorre na faixa de 310°C a 355°C, que pode referir-se a uma transformação de fase de algum dos elementos da perlita ou desidroxilação de estruturas (CORDEIRO, 2015).

Figura 32 – Curva termogravimétrica de decomposição da perlita

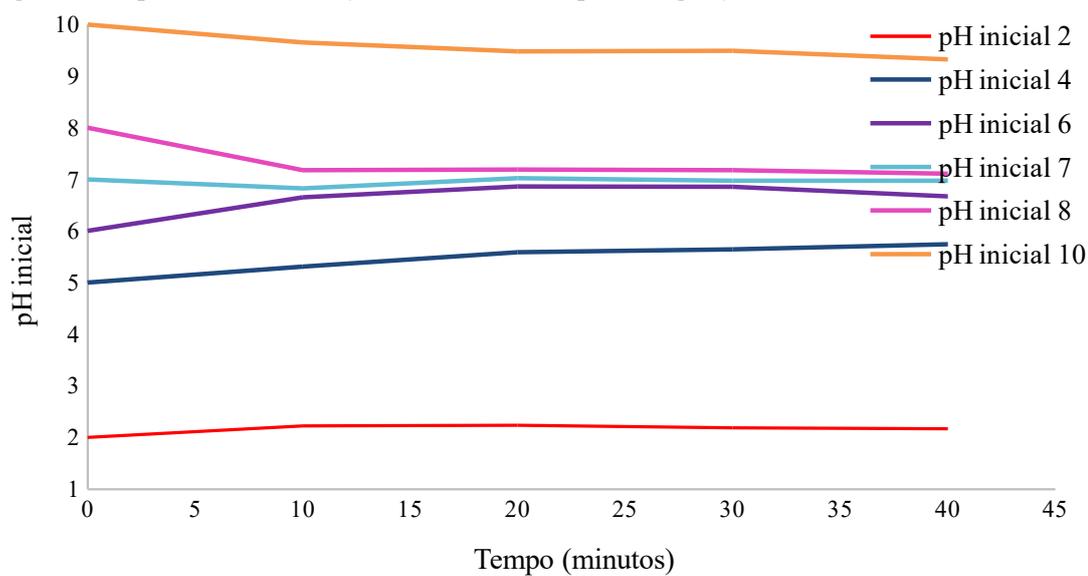


Fonte: O autor, 2019.

pH de zero carga

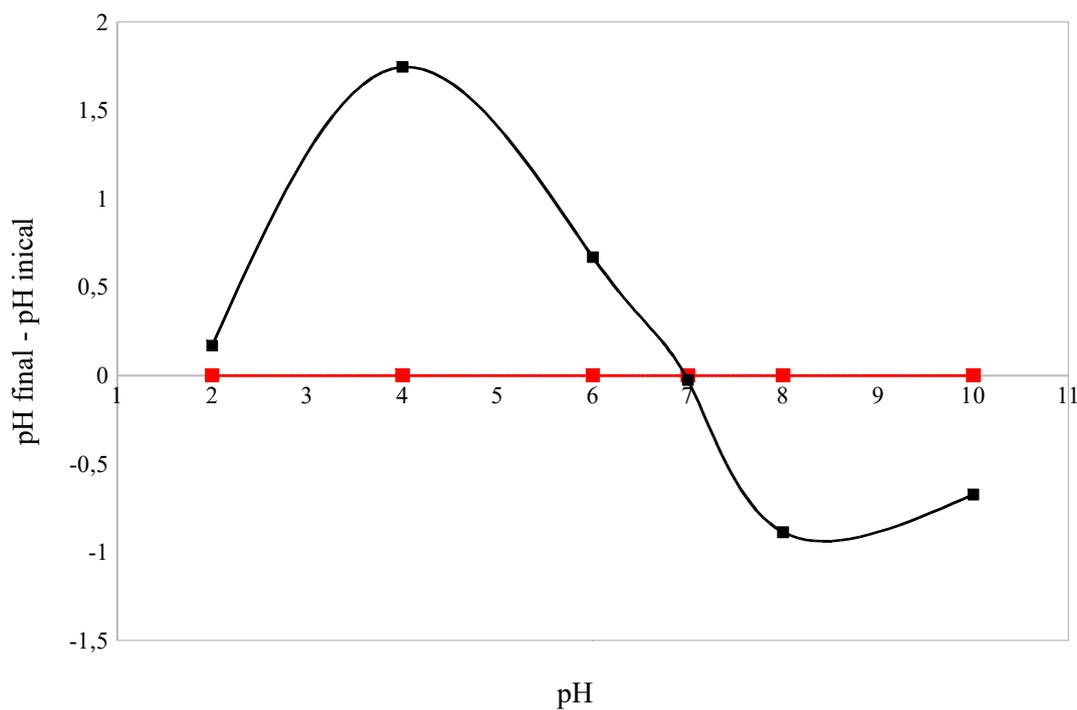
A Figura 33 mostra o comportamento do pH inicial em função do tempo de agitação. E a Figura 34 o pH de zero carga, o pH (pH_{zpc}) encontrado para a perlita é equivalente ao pH 7. Na elaboração do efluente sintético, foi utilizado detergente doméstico para simular o efluente gerado em área de lavagem de veículo. O detergente comercial tem em sua composição, tensoativos aniônicos. Em pH ácido, a superfície da perlita adquire carga positiva, favorecendo a adsorção de ânions.

Figura 33 – pH inicial em função de diversos tempos de agitação.



Fonte: O autor, 2019. Fechar as laterais do gráfico

Figura 34 – Diferença entre pH final e pH inicial em função do pH inicial

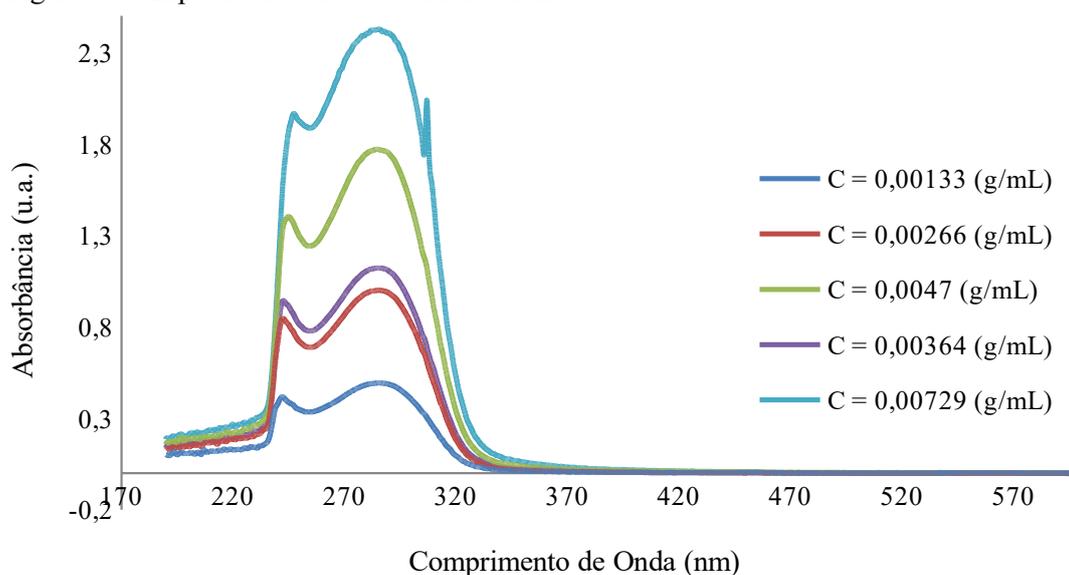


Fonte: O autor, 2019.

Elaboração da Curva de calibração

A Figura 35 mostra a varredura das amostras elaboradas utilizando óleo Selenia Perform 5W – 30 API SN para a curva de calibração.

Figura 35 – Espectro de Varredura Óleo Selenia

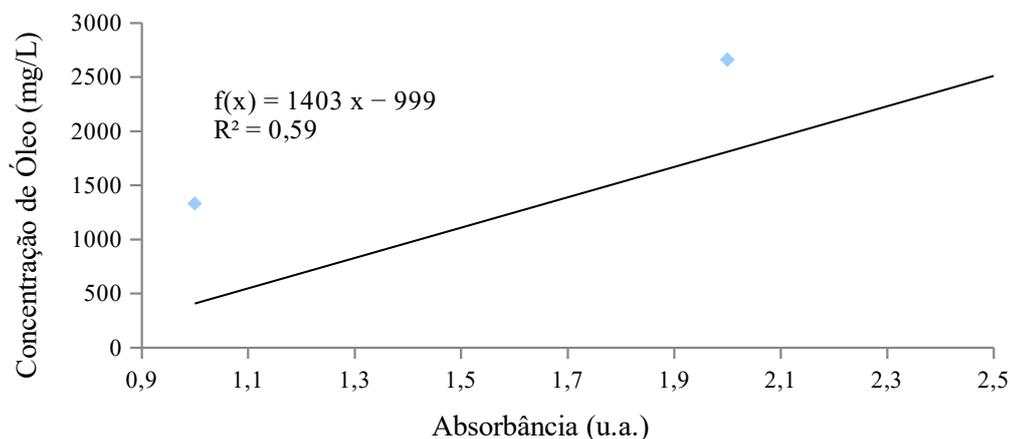


Fonte: O autor, 2019.

A absorvância no comprimento de onda 262 nm é comumente usada para estimar a concentração de óleo em amostras de água (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1985; ARAÚJO, 2004) e, também, em águas produzidas, pois este comprimento de onda mede as faixas de C-H de aromáticos presentes no meio.

A curva de calibração, para determinação da concentração de óleo Selenia Perform 5W – 30 API SN, apresentou dois picos, um próximo a 262 nm e outro no comprimento de onda de 286 nm. O último foi utilizado para a construção da curva de calibração, pois apresentou melhores resultados para as isotermas (Figura 36).

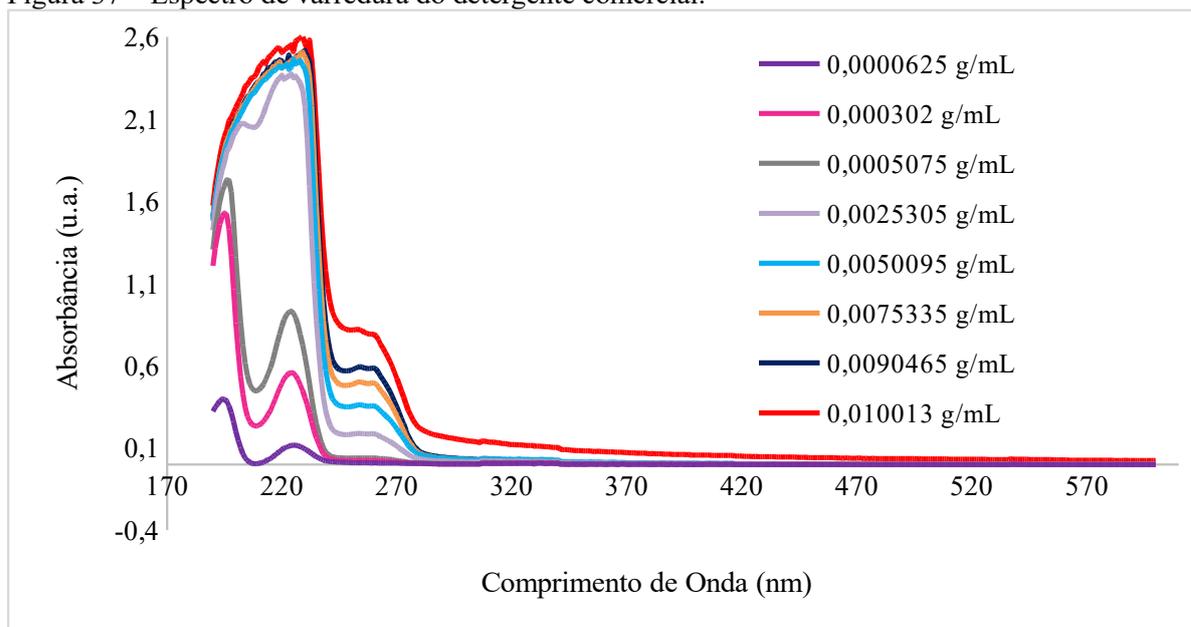
Figura 36 – Curva de calibração do óleo Selenia Perform 5W – 30 API SN



Fonte: O autor, 2019.

O espectro de varredura para o detergente comercial, apresentou dois picos, um próximo ao comprimento de onda 220 nm e outro próximo de 270 nm, conforme Figura 37. O que demonstra que não houve interferência do detergente na leitura da absorbância do óleo.

Figura 37 – Espectro de varredura do detergente comercial.

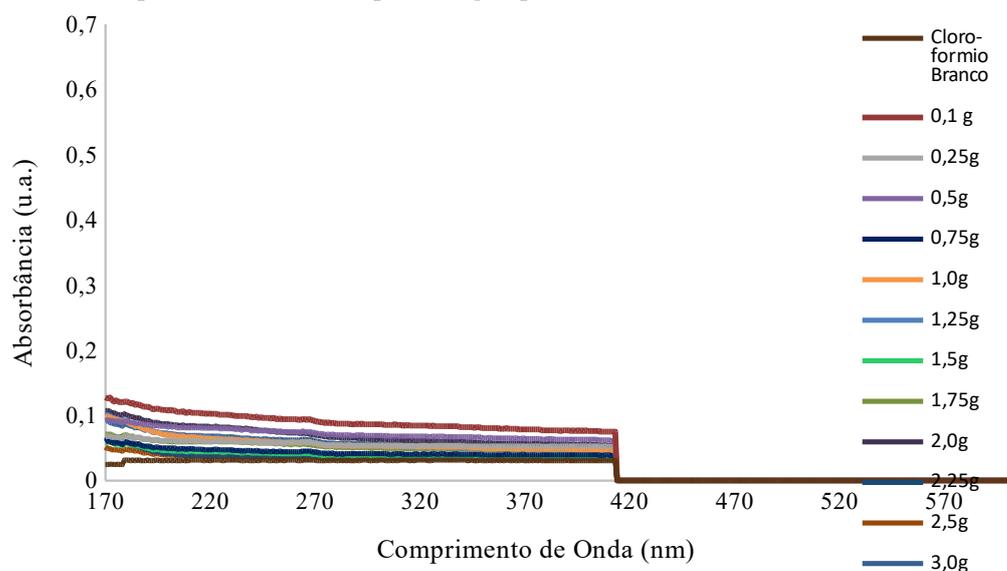


Fonte: O autor, 2019.

4.2 Espectro de varredura perlita/água produzida.

Nos ensaios em banho finito, a temperatura ambiente ($T \approx 30^\circ \text{C}$), para cada massa de adsorvente utilizada, foi obtido o espectro de varredura, para avaliar em qual comprimento de onda se daria o pico máximo, conforme a Figura 38.

Figura 38 – Espectro de varredura perlita/água produzida



Fonte: O autor, 2019.

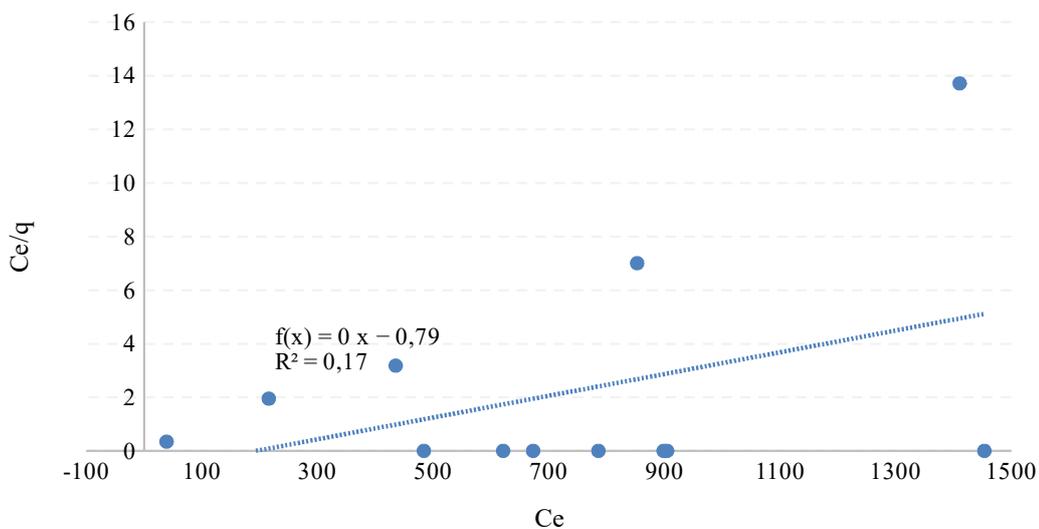
O espectro de varredura perlita/água produzida, apresentou dois picos, um próximo a 240 nm e outro em 286 nm, tendo sido utilizado o segundo por ser o resultado também encontrado na obtenção da curva de calibração.

Isotermas de adsorção

A partir dos valores de absorvância, no comprimento de onda de aproximadamente 286 nm e a curva de calibração, foi possível obter as concentrações de equilíbrio para cada massa de adsorvente utilizada e, posteriormente, a isoterma de adsorção foi construída.

O processo de adsorção do óleo na perlita foi realizado em banho finito e os modelos de Langmuir e Frenluich foram utilizados para ajustar os dados experimentais, as e mostram os resultados destes ensaios.

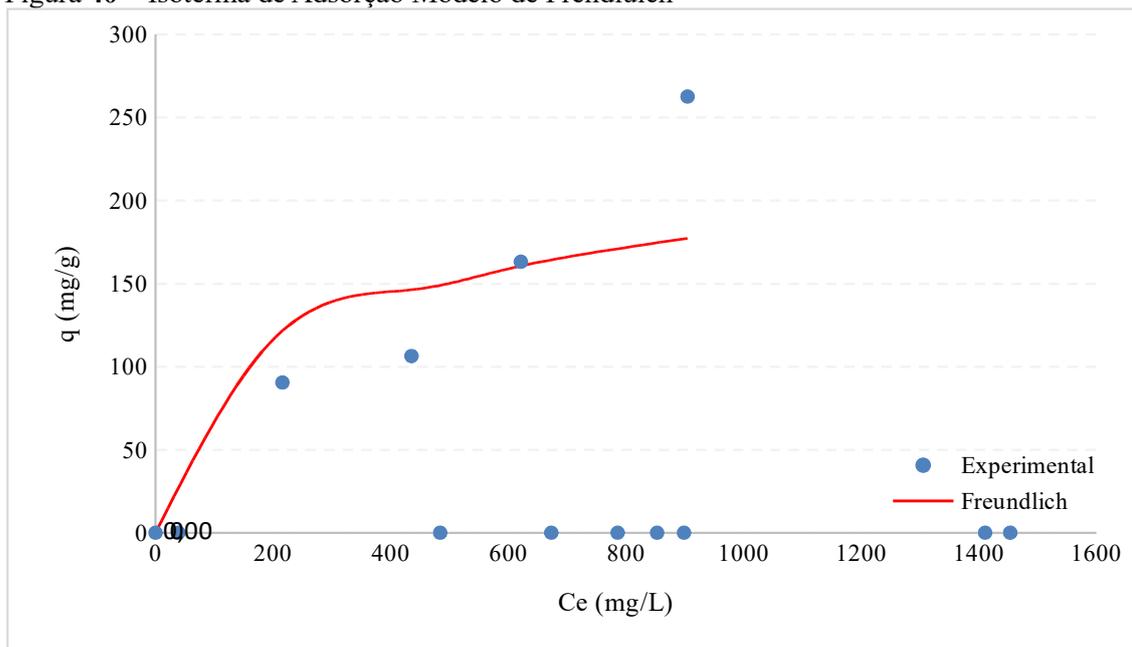
Figura 39 – Isoterma de Adsorção Modelo de Langmuir



Fonte: O autor, 2019.

Apartir da aplicação do modelo de Langmuir aos dados experimentais, valores negativos para as constantes K_L e R_l foram obtidas, representando fraca capacidade de adsorção, e por isso, essa isoterma foi rejeitada. A aplicação do modelo de Freundlich aos dados experimentais obteve valores para n igual a 3,81 ($1 < n < 10$) e K_f igual a 29,64, sendo este o modelo que mais se adequou aos dados experimentais (Quadro 3).

Figura 40 – Isoterma de Adsorção Modelo de Freundlich



Fonte: O autor, 2019.

Quadro 3 – Parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir.

Isotermas	Equação	Parâmetros
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	n = 3,81 (1 < n < 10) Kf = 29,64.
Langmuir	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	KL = -0,02101 RI = -0,84128

Fonte: O autor, 2019.

O processo adsorptivo é favorável, visto que o parâmetro n está entre 1 e 10, não ideal, reversível e não restrito à formação da monocamada, devido ao valor de Kf encontrado.

Baseado no modelo de adsorção de Freundlich, é possível ter uma estimativa da quantidade de perlita a ser utilizada para atender ao requerimento do processo de tratamento de água de lavagem. Para uma empresa que efetue lavagem de 80 veículos/dia, levando em consideração o consumo de 262 L por veículo, haverá um consumo diário de 20,96 m³ por dia.

Pela Equação do Modelo de Freundlich, $q_e = 29,64 * C_e^{(\frac{1}{3,81})}$, observa-se que para $C_e = 20 \text{ mg.L}^{-1}$ tem-se q (mg.g⁻¹) igual a 64,59 mg.g⁻¹. Com isso, para uma concentração final no efluente de 20 mg.L⁻¹ de água de lavagem, utilizando-se apenas um tanque, a quantidade de perlita a ser utilizada para tratar 21 m³ por dia será de aproximadamente 316 kg perlita por dia, ou seja, 15,14 kg perlita por m³ efluente.

$$(262) \frac{L}{\text{Veículo}} \cdot 80 \frac{\text{Veículos}}{\text{dia}} = 20.960 \frac{L}{\text{dia}} = 20,96 \frac{m^3}{\text{dia}}$$

$$(1000 - 20) \frac{mg}{L} \cdot 20.960 \frac{L}{\text{dia}} = 20.540.800 \frac{mg}{\text{dia}}$$

$$20.540.800 \frac{mg}{\text{dia}} \cdot \frac{g}{64,97 \text{ mg}} = 318.018,26 \frac{g}{\text{dia}} \approx 316 \frac{Kg}{\text{dia}}$$

Para um sistema com dois tanques em série, uma concentração intermediária de 490 mg.L⁻¹ e concentração final no efluente de 20 mg.L⁻¹ de água de lavagem, a quantidade de perlita a ser utilizada para tratar 21 m³ por dia

será de aproximadamente 223 kg perlita por dia, ou seja, 10,63 kg perlita por m³ efluente.

Para o primeiro sistema:

$$(1000 - 490) \frac{mg}{L} \cdot 20.960 \frac{L}{dia} = 10.689.600 \frac{mg}{dia}$$

$$q_e = 29,64 * 490^{\left(\frac{1}{3,81}\right)} = 150,21 \frac{mg}{g}$$

$$10.689.600 \frac{mg}{dia} \cdot \frac{g}{150,21 mg} = 71.164,37 \frac{g}{dia} \approx 71,16 \frac{Kg}{dia}$$

Para o segundo sistema:

$$(490 - 20) \frac{mg}{L} \cdot 20.960 \frac{L}{dia} = 9.851.200 \frac{mg}{dia}$$

$$q_e = 29,64 * 20^{\left(\frac{1}{3,81}\right)} = 64,97 \frac{mg}{g}$$

$$9.851.200 \frac{mg}{dia} \cdot \frac{g}{64,97 mg} = 151.626,90 \frac{g}{dia} \approx 152 \frac{Kg}{dia}$$

Assim, para um sistema com dois tanques em série, a quantidade de perlita necessária é de:

$$71,16 \frac{Kg}{dia} + 152 \frac{Kg}{dia} = 223,16 \frac{Kg}{dia} .$$

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade de uso da perlita como adsorvente de óleos e graxas no processo de adsorção em banho finito. A partir dos estudos realizados é possível concluir que:

1. A taxa de adsorção encontrada de $0,06459 \text{ g.g}^{-1}$ é condizente com os dados obtidos na caracterização do adsorvente pelo método BET, área superficial $2,47 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, tamanho de poro em $776,36 \text{ \AA}$, volume dos poros $1,892.10^{-3} \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$;
2. Por meio do método BET foi obtida uma isoterma de adsorção do Tipo II, que é característica de materiais macroporosos o que corrobora com a taxa de adsorção obtida;
3. Através dos experimentos foi possível calcular a remoção de OG pelo processo de adsorção por meio da aplicação da perlita como adsorvente;
4. A isoterma de Freundlich é a que melhor se ajusta aos dados experimentais de equilíbrio do sistema óleo-água-perlita;
5. Pelo método da termogravimetria foi possível estimar as fases de decomposição térmica da perlita em 90°C a 190°C devido a perda de água e em 310°C a 355°C devido a transformação de fase de algum dos elementos da perlita ou desidroxilação de estruturas;
6. A quantidade de perlita a ser utilizada para atender ao requerimento do processo de tratamento de água de lavagem de veículos é de 316 kg por dia para o sistema com um tanque e $223,16 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}$ para dois tanques em série;
7. Apesar da perlita apresentar um potencial moderado no processo de adsorção para tratamento de água de lavagem de veículos, esta surge como uma alternativa para esse processo por se tratar de um resíduo industrial (rejeito) proveniente de uma indústria química.

REFERÊNCIAS

- ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. *Physical Chemistry of Surfaces*. 6. ed. California: Wiley, 1997.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. *Contas econômicas ambientais da água no Brasil. 2013 – 2015*. Brasília, 2018. Disponível em: https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-spr/contas_economicas.pdf. Acesso em: 10 ago. 2018.
- AKERMAN, R. *Curso operação de ETE*. 2016. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/akerman22/curso-operao-de-ete-70070702>. Acesso em jun. 2018
- ALIHOSSEINI, A. et al. *Equilibrium sorption of crude oil by expanded perlite using different adsorption isotherms at 298.15 K*. International Journal of Environmental Science and Technology., v. 7, n. 3, p. 591–598, 2010.
- ALKAN, M. *Surface Titrations of Perlite Suspensions*. Journal of Colloid and Interface Science, 1998. v. 207, p. 90-96.
- ALL.BIZ. *Equipamento de lavagem de carro automático rollover yadong*. Publicado em 2019. Disponível em: <https://all.biz/br-pt/equipamento-de-lavagem-de-carro-automtico-rollover-g111147CN#.XUBKNfJKjIU>. Acesso em: 03 jul. 2019.
- ALTHER, G. R. *How to Remove Emulsified Oil from Wastewater with Organoclays*. WATEREngineering & Management, v. 1, n. 1, p. 3, 2001.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for examination of water and wastewater*. 16th Edition, eds. A. E. Greenberg, R. R. Trussell and L. S. Clesceri, pp. 498- 499. APHA, Washington, DC, 1985.
- ANDERSON, J. et al. *Climbing the ladder: A step by step approach to international guidelines for water recycling*. Water Science and Technology, v. 43, n. 10, p. 1–8, IWA Publishing. 2001.
- ANDRADE, R. C. *Preparação e Caracterização de Carvão Ativado a Partir de Material Alternativo Lignocelulósico*. Dissertação (Mestrado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.
- APPEL, C. et al. *Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility*. Geoderma, v. 113, p. 77-93, abr. 2003.
- ARAÚJO, V. S. *Estudo de Sistemas Microemulsionados para Remediação de Solos Contaminados com Óleo Diesel*. 2004. 94 f. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.
- ASANO, T. et al. *Water reuse : issues, technologies, and applications*. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2007. (New York, USA).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13.969/1997: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004: resíduos sólidos. Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.
- ATKINS, P. W. *Físico-química*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. v. 3.
- ATKINS, P.; DE PAULA, J. *Physical Chemistry*. 7ª Edição, 2001.
- AZEVEDO, J. B.; DE CARVALHO, L. H.; FONSECA, V. M. *Efeito da degradação em motor automotivo nas propriedades termogravimétricas de óleos lubrificantes minerais e sintéticos*. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, n. 3, p. 6, 2005.

- BADER, M. S. H. *Seawater versus produced water in oil-fields water injection operations*. Desalination, v. 208, n. 1–3, p. 159–168, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407000689>. Acesso em 15 jun. 2018.
- BARROS, C.J. *Os resíduos sólidos urbanos na cidade de Maringá: Um modelo de gestão*. Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá, PR, Brasil, 2002.
- BARSANO, P. R. *Ética e Cidadania Organizacional - Guia Prático e Didático*. 192 f. 2012. ERICA. SARAIVA.
- BART, H.-J. R.; GEMMINGEN, U. VON. *Adsorption*. Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- BAUTISTA-TOLEDO, I. et al. *Bisphenol A removal from water by activated carbon. Effects of carbon characteristics and solution chemistry*. Environmental Science and Technology, v. 39, n. 16, p. 6246–6250, 15 ago. 2005.
- BELARMINO, L. D. *Avaliação da potencialidade da perlita natural e expandida na adsorção de metais*. 2011. 126 f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.
- BERTI, A. P. et al. *Efeitos da contaminação do ambiente aquático por óleos e agrotóxicos*. SaBios Rev. Saúde e Biol., v. 4, n. 1, p. 45–51, 2009. Disponível em: <http://revista.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios2/article/view/152>. Acesso em 05 jul. 2018.
- BOHN, F. P. *Tratamento do efluente gerado na lavagem de veículos*. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Departamento de Ciências Exatas e Engenharias. Panambi, 2014.
- BORGES, L. Z. *Caracterização da água cinza para promoção da sustentabilidade dos recursos hídricos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2003.
- BRANCO, P. DE M. *Dicionário de Mineralogia e Gemologia*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas-Rede-Ametista/Canal-Escola/Producao-Mineral-Brasileira-1300.html>. Acesso em: 05 jul. 2018.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos*, DF: Casa Civil, 2010. 22 p.
- BRASIL. *Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado, 1988. 140 p.
- BRASIL POSTOS. *Sistema de tratamento e reuso de água de lavagem de veículos*. Publicado em: 2015. Disponível em: <https://www.brasilpostos.com.br/noticias/legislacao-2/haddad-vai-multar-e-cassar-alvara-de-posto-se-nao-usar-agua-de-reuso/> Acesso em: 03 ago. 2018.
- BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. *Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil*. Cerâmica, v. 61, n. 358, p. 178–189, 15 ago. 2015.
- BROWN, C. *Water use in the Professional Car Wash Industry*. Report for International Car Wash Association, Washington D.C., USA. 2000.
- CARVALHO, P. C. T. *Despoluição de recursos hídricos o caso da Baía da Guanabara. Juiz de Fora, 2013*. Graduação em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- CECCATO. *Sistema de lavagem tipo túnel*. Publicado em 2016. Disponível em: <http://www.ceccato.com.br/brasil/index.php>. Acesso em: 03 ago. 2018.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS DO RIO DE JANEIRO. *Estrutura Tarifária Dez/2018*. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.cedae.com.br/estruturatarifaria>. Acesso em: 10 ago. 2018.

- CESSA, R. M. A., et al. *Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos*. Revista Brasileira de Ciência. 2009.
- CHERYAN, M.; RAJAGOPALAN, N. *Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction*. Journal of Membrane Science, v. 151, n. 1, p. 13–28, 1998.
- CLAUDINO, A. *Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes*. 2003. 101 f. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Química). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2003.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. *Sondagem CNT de gestão hídrica: transporte rodoviário coletivo de passageiros 2017*. Brasília, 2017.
- [CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE](#). *RESOLUÇÃO N° 20*, de 18 de junho de 1986. Diário Oficial da União. p. 1–13, 1986. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 1986. 15 p.
- CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. *RESOLUÇÃO N° 54*, de 28 de novembro de 2005. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 3 p.
- COONEY, D. O. *Adsorption design for wastewater treatment*. 1. ed. New York Washington,: Lewis Publishers, 1999.
- CORDEIRO, G. L. *Estudo de síntese de catalisadores de Níquel suportados em Alumina-Lantânia para aplicação na produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do etanol*. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais)-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2015.
- COSTA, M. T. et al. *Estudo da cinética de adsorção no tratamento de água de produção de petróleo utilizando bagacilho como agente adsorvente*. Revista de Ciências da Exatas, v. 33, n. 1, p. 53–61, 2014.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. *Tecnologia Química*. 3ª Edição, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, V.3, 1982.
- [CURBELO, F. D. S. et al.](#) *Oil removal in produced water using expanded and hydrophobized vermiculite as adsorbent*. Afinidad (Barcelona), Barcelona, 2006, v. 63, n°. 521, p. 35-39.
- CURBELO, F. D. D. S. *Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada*. 2002. 88 f. Dissertação (Mestrado), Pós graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2002.
- DALPIAZ, L. D. M. *Análise do fornecimento dos produtos da destilação criogênica do ar*. 2010. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2010.
- DELLE-SITE, A. *Factors affecting sorption of organic compounds in natural sorbent/water systems and sorption coefficients for selected pollutants*. A review. Journal of Physical and Chemical Reference Data, v. 30, p. 187-439, 2001.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. *Relatórios estatísticos. Frota de veículos, 2018*. Disponível em: <https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8558-frota-de-veiculos-2018.html>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Estatística. Frota por tipo de veículo. Rio de Janeiro, 2019*. Disponível em: http://www.detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/02.asp. Acesso em: 02 ago. 2019.
- DIAS, J.M., ALVIM-FERRAZ, M.C.M., ALMEIDA, M.F., RIVERA-UTRILLA, J. AND SÁNCHEZ-POLO, M. *Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review*, Journal of Environmental Management, v. 85, p. 833–846, 2007.

- DIYTRADE. *Automatic Tunnel Car Wash Machine with 5/7/9 brushes*. Publicado em 2014. Disponível em: https://www.diytrade.com/china/pd/12509169/Automatic_Tunnel_Car_Wash_Machine_with_5_7_9_brushes.html. Acesso em: 03 jun. 2018.
- DOGAN, M. et al. *Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption onto perlite*. Journal of Hazardous Materials, 2004, v. 109, p. 141-148.
- DOMINGUES, V. M. F. *Utilização de um produto natural (cortiça) como adsorvente de pesticidas piretróides em águas*. 2005. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2005. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12811/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- DORIGON, E. B.; TESSARO, P. *Caracterização dos efluentes da lavagem automotiva em postos de atividade exclusiva na região AMAI-Oeste catarinense*. Unoesc & Ciência. ACBS, v. 1, n. 1, p. 13–22, jan. 2010.
- DUARTE, B. *Artefatos de concreto para construção civil*. 2013. Disponível em: <http://caixa-gordura-passagem-fossaseptica.blogspot.com.br/2013/>. Acesso em jun. 2018.
- [EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA](#). *Nota técnica DPG-SPT N° 04/2018. Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil*. Rio de Janeiro, 2018.
- ETCHEPARE, R. et al. *Integração de processos no tratamento de efluentes de lavagem de veículos para reciclagem de água*. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS 2012, 133 p.
- FALL, C. et al. *Carwash wastewaters: characteristics, volumes, and treatability by gravity oil separation aguas*. Revista Mexicana de Ingeniería Química, v. 6, n. 002, p. 175–184, jul. 2007.
- FARD, A. R. T. *Application of advanced composite modified perlite for degradation of particle size and turbidity in treatment of sewage water*. Drinking Water Engineering and Science Discussions, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia. p. 1–14, 3 jan. 2018.
- FAUST, S. D. and O. M. ALY: *Chemistry of Water Treatment*. Kent, Butterworth & Co., Publ. Lt., 1983, 723 S., 227 Abb., 175 Tab., £ 48.
- FEBRIANTO, J. et al. *Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies*. Journal of Hazardous Materials. v. 162, p. 616-645, 15 mar. 2009.
- FEBRIANTO, J. et al. *Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies*. Journal of Hazardous Materials, v. 162, p. 616-645, 15 mar. 2009.
- FEDERAÇÃO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Reuso de água em garagens de ônibus*. [Centro Universitário Anhangüera \(UNIFIAN\)](#). Rio de Janeiro, 2010.
- FERNANDES, M. et al. *Aplicação de tanino como coagulante no reuso da água de lavagem de automóveis e a utilização do lodo na agricultura*. Revista Eletrônica do PRODEMA Fortaleza, 2015, v. 9, n. 1, p. 51-61.
- FERNADES, C. *Relatório de Sustentabilidade 2010/2011*. White Martins. 2010. 62 f. Disponível em: <http://www.praxair.com.br/-/media/corporate/praxair-brazil/documents/sd-brazil/relatorio-de-sustentabilidade-2010.pdf?la=pt-br>. Acesso em: 03/01/2019.
- FIOL, N.; VILLAESCUSA, I. *Determination of sorbent point zero charge: Usefulness in sorption studies*. Environmental Chemistry Letters, v. 7, n. 1, p. 79–84, 2009.
- FLORES, A. B. et al. *Características superficiales de un vidrio volcánico cubano y remoción de Cu²⁺ desde disoluciones acuosas*. Revista Latinoamericana de Recursos

- Naturales. Centro de Ingeniería de Procesos. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echevarría”. Habana Cuba, 2009.
- FONSECA, A. F. *Disponibilidade de nitrogênio, alterações nas características químicas do solo e do milho pela aplicação de efluente de esgoto tratado*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.
- FOUST, S. A. et al. *Princípios das Operações Unitárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.
- FULVIO, P. F. Synthesis and characterization of ordered mesoporous inorganic nanocomposite materials. Ohio, p. 210. 2009. Doctoral Thesis.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE. *Norma Técnica NT-202.R-10*, de 04 de dezembro de 1986. Rio de Janeiro, RJ, 3 p. dez. 1986.
- GHASSABZADEH, H. et al. *Adsorption of Ag, Cu and Hg from aqueous solutions using expanded perlite*. Journal of Hazardous Materials, v. 177, n. 1–3, p. 950–955, maio 2010.
- GIORDANO, G. *Tratamento e controle de efluentes industriais*. Apostila de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- GOMES, D. A. A. *Aplicação de microemulsões na solubilização de frações pesadas de petróleo*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Natal, RN. 2009.
- GOMIDE, R. *Operações Unitárias*. 1ª Ed. V. 4, Cap. IV, pág. 311-331. São Paulo 1988.
- GREGG, S. J.; SING, K. S. *Adsorption, Surface Area and Porosity*. 2. ed. LONDON: Academic Press INC (LONDON) LTD, 1982. 303p.
- GUERASIMOV, Y. A., et al. *Curso de Química Física*. 2ª Edição, Moscou: Editorial Mir, V. 1, Capítulo XVI, pág. 441-466, 1977.
- HARRIS, D. C. *Análise química quantitativa*. Rio de Janeiro. LTC, 2008.
- HEMMINGER, W. *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers*; Mathot, M.B.F., ed.; Hanser: Munique, 1994, p. 18-45.
- HERNÁNDEZ, M. A. *Evaluación de Mesoporos y Caracterización de Arcillas del Estado de Puebla, México*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, México, v. 4, n. 19, p. 183-190, 2003.
- HONG, A.; FANE, A. G.; BURFORD, R. *Factors affecting membrane coalescence of stable oil-in-water emulsions*. Journal of Membrane Science, v. 222, n. 1–2, p. 19–39, 1 set. 2003.
- HOWARD, G. J.; MIDGLEY, C. A. *The Formation and Structure of Vulcanizates*. Journal of Applied Polymer Science, v. 26, n. 1, p. 3845–3870, 1981.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. *Lei 6.034* de 08 de setembro de 2011. Rio de Janeiro, RJ, 1 p. set. 2011.
- IONASHIRO, M. *Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial*. 1. ed. Araraquara: Giz Editorial, 2004.
- ISTOBAL. *A funcionalidade, em primeiro. Pórtico de lavagem*. Publicado em 2019. Disponível em: <https://www.istobal.com/br/produto/portico-de-lavagem/m1/>. Acesso em: 03 jun. 2018.
- JEFFERSON, B. et al. *Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse*. Water Science and Technology, v. 50, n. 2, p. 157–164, 2004.
- JIMENEZ, R. S.; DAL BOSCO, S. M.; CARVALHO, W. A. *Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolécita - Influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares*. Química Nova, v. 27, n. 5, p. 734–738, set. 2004.

- KALYANI, S. et al. *Removal of copper and nickel from aqueous solutions using chitosan coated on perlite as biosorbent*. Separation Science and Technology, v. 40, n. 7, p. 1483–1495, 2005.
- LEÃO, A. S. et al. *O reuso da água: um estudo de caso na lavagem de veículos em lava-jato de Belém /PA*. Revista Águas Subterrâneas. São Luís, MA. 2010.
- LEE, S. *Encyclopedia of Chemical Processing*. Vol. 1. Sunggyu Lee Department of Chemical Engineering University of Missouri. Columbia. Missouri, U.S.A.
- LIRA, O. O. *Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS*. 1. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2014.
- LLEWELLYN, P. L. E. A. *Critical Appraisal of the Use of Nitrogen Adsorption for the Characterization of Porous Carbon*. Studies in Surface Science and Catalysis, v. 128, p. 421-427, 2000.
- LUZ, A. D. *Aplicação de processos adsorptivos na remoção de compostos btx presentes em efluentes petroquímicos*. Dissertação (Mestrado [Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química](#)). [Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química](#). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009. 174 f.
- MALINOWSKI, A. *Aplicação de metodologia para a estruturação de diretrizes para o planejamento do reúso de água no meio urbano*. 2006. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- MALLMANN, R. A. *Avaliação da viabilidade de reúso de efluentes para lavagem de veículos*. Especialize IPOG Revista On Line, p. 1–16, jan. 2013.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. *Reúso de água*. Barueri-SP. Manole, 2003.
- MARKOS, R. *Água: Um olhar integrado*. 2006. Disponível em: http://www.c2o.pro.br/vis_int_agua/ar01s09.html. Acesso em: 18 out de 2018.
- MARQUES, D. S. R. et al. *Postos de serviços Orientações para o controle ambiental*. Série Gestão Ambiental. Instituto Estadual do Ambiente, 2ª edição, 2014.
- MORAIS, W. A. *Estudos de sorção de um corante aniônico modelo em partículas de quitosana reticulada*. 2007. 109f. Dissertação (Mestre em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- MOREIRA, S. D. A. *Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo*. 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) - Pós- graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- MORELLI, E.B. *Reuso de água na lavagem de veículos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- NASCIMENTO, R. F. et al. *Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais*. 1. ed. Fortaleza, 2014. Imprensa Universitária, 2014. 256 p. : il. ; 21 cm.
- NEVES, A. A. C. *Estudo sobre resíduos sólidos em postos de combustíveis, funilarias e estabelecimentos de lavagem automotiva no município de São Carlos, visando Indicadores de Sustentabilidade*. 2010. 184 f. Tese Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2008.
- NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. *Biossurfactantes: Propriedades e aplicações*. Química Nova. Sociedade Brasileira de Química, 2002, Vol.25, Nº.5, 772-776. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=5359. Acesso em 10 jul. 2018.
- NOVONEGÓCIO. *Sistema de tradicional com jato manual (2016)*. Disponível em: <https://novonegocio.com.br/ideias-de-negocios/como-montar-um-lava-jato/>. Acesso em: 13 ago. 2018.
- NUNES, R. T. S. *Conservação da água em edifícios comerciais: potencial de uso racional e reúso em shopping center*. 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado em Programa de

- Planejamento Energético). Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- ODUM, E. P.; BARRET, G. W. *Fundamentos de ecologia*. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- OENNING JR., A. *Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica*. 2006. 223 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2006.
- O GLOBO. *Acidente com pó cobre de branco Volta Redonda*. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <https://acervo.oglobo.globo.com/busca/?busca=perlita>. Acesso em: 16 ago. 2018.
- OLIVEIRA, E. S. et al. *Avaliação da adsorção da ortofenantrolina na perlita expandida utilizando a termogravimetria e espectrofotometria de absorção molecular uv-vis*. Anais do 56º Congresso Brasileiro de Química. Belém, PA, 2016. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2016/trabalhos/4/9656-20239.html>. Acesso em 10 jul. 2018.
- OLIVEIRA, L. I.; LOUREIRO, C. O. *Contaminação de aquíferos por combustíveis orgânicos em belo horizonte: avaliação preliminar*. Anais do X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 10, 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22287>. Acesso em 10 jul. 2018.
- ORTIZ, N. *Estudo da utilização de magnetite como material adsorvedor dos metais Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} e Cd^{2+} em solução*. 2000. 176p. Tese (Doutorado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear, Aplicações). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-15022002-115714/pt-br.php> Acesso em 06 de agosto de 2018.
- PERLITE INSTITUTE. *Perlite Aggregate for Lightweight Insulating Concrete*. EUA, 2014. Disponível em: <https://www.perlite.org/> Acesso em 31 jul. 2018.
- PERRY, J. *Manual del Ingeniero Químico*, Capítulo 16, Mc Graw Hill, 6 Ed, 1998.
- PICHÓR, W.; JANIEC, A. *Thermal stability of expanded perlite modified by mullite*. *Ceramics International*, v. 35, n. 1, p. 527–530, jan. 2009.
- PINTO, C. H. C., *Vermiculita Hidrofobizada como agente adsorvente de óleo em águas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 1994.
- PIO, A.A.B. *Conservação e reuso de água em edificações*. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/municípioverdeazul/DiretivaHabitacaoSustentavel/ManualConservacaoReusoAguaEdificacoes>. pdf. Acesso em 8 de novembro de 2018
- PRADO, A. G. S.; AIROLDI, C. *Different neutral surfactant template extraction routes for synthetic hexagonal mesoporous silicas*. *Journal of Materials Chemistry*, v. 12, n. 12, p. 3823–3826, 1 dez. 2002.
- RESIDUOALL. *Formas de disposição final de resíduos*. Publicado em 8 de junho de 2017. Disponível em: <http://residuoall.com.br/tag/residuos-quimicos/>. Acesso em: 08 jan. 2019.
- RIBEIRO, E. L. D. O. C. *Estudo preliminar sobre a viabilidade da reutilização da perlita expandida como adsorvente para remoção de matéria orgânica de esgoto doméstico*. 2013. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.
- ROCHA, F. R. P.; TEIXEIRA, L. S. G. *Estratégias para aumento de sensibilidade em espectrofotometria UV-VIS*. *Quim. Nova*, v. 27, n. 5, p. 807–812, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422004000500021>. Acesso em 01 set. 2018.
- RODRIGO M. L. *Manual de Jardinagem. Perlita. 2011*. Disponível em: <http://manualdejardinagem.blogspot.com.br/2011/07/perlita.html>. Acesso em: 03 jan. 2019.

- ROSA, L. G. et al. *Caracterização de águas residuais oriundas de empresas de lavagem de veículos e impactos ambientais*. Revista Ambiente e Água, v. 6, n. 3, 179-199, 2011.
- ROSA, L. G. et al. *Pré-tratamento das águas residuárias provenientes de empresas de lavagem de veículos*. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, p. 11, jul. 2014.
- ROUQUEROL, J.; ROUQUERON, F.; SING, K. *Adsorption by Powders and Porous Solids*. London: Academic Press, 1999. Cap. 4, p. 93 - 113.
- RUTHVEN, D. M. *Principles of adsorption and adsorption process*. USA: John Wiley & Sons Inc., 1984.
- SANTOS, E. V. *Adsorção de Mn (II) e Zn (II) em soluções aquosas usando perlita expandida revestida com quitosana*. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Físico-Química). Centro De Ciências Exatas E Da Terra Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- SAUTCHUK, C. et al. *Conservação e Reuso da Água em Edificações*. 1. ed. São Paulo: ANA - Agência Nacional de Águas, 2005.
- SAVOVA, D. et al. *Biomass conversion to carbon adsorbents and gas*. Journal Biomass and Bioenergy. [Vol. 21, Issue 2](#), 133-142, August 2001.
- SCHRAMM, L. L. *Emulsions: Fundamentals and applications in the petroleum industry*. Advanced Chemistry Series 231. Washington: ACS, p. 79-129, 1992.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. *Separation process principles*. Chemical and Biochemical Operations. Capítulo 15, pág. 778-879. 3. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. *Ideias de negócios sustentáveis*. Lava Jato, 2012. Disponível em: <http://extranet2.pr.sebrae.com.br/portal/sustentabilidade/Lava%20jato.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- SECRON, M. B. *Avaliação de sistemas separadores água e óleo do tratamento de efluentes de lavagem, abastecimento e manutenção de veículos automotores*. 2006. 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SECRON, M. B.; GIORDANO, G.; FILHO, O. B. *Controle da poluição hídrica gerada pelas atividades automotivas*. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, RJ, 2010. 74p.
- SHONS, E. M. *Desestabilização de emulsões visando a redução do teor de óleo em água*. 2008. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- SILVA, R. N. A. *Membranas de quitosana/perlita no uso da adsorção de corantes*. 2016. 146 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Química Industrial). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2016.
- SILVEIRA, D. M. *Utilização de diferentes materiais como adsorventes na remoção de nitrogênio amoniacal*. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2015.
- SILVEIRA, E. L. C. et al. *Determinação de metais em óleos lubrificantes, provenientes de motores de ônibus urbano, utilizando a FAAS*. Revista Química Nova, v. 33, n. 9, p. 1863–1867, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000900008. Acesso em 10 jul. 2018.
- SING, K. S. W. E. A. *Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems. With special reference to the determination of surface area and porosity*. Pure and Applied Chem.-IUPAC, Great Britain, , v. 57, n. 4, p. 603-619, 1985.

- SITE, A. D. *Factors Affecting Sorption of Organic Compounds in Natural Sorbent Water Systems and Sorption Coefficients for Selected Pollutants*. A Review. J. Phys. Chem., v. 30, n. 1, p. 253, 2001.
- SKOOG, D. A. et al. *Fundamentos de química analítica*. Tradução da 8ª Edição norte-americana, Editora Thomson, São Paulo-SP, 2006.
- SMITH, D.; SHILLEY, H. *Residential car washwater monitoring study*. 2009. Disponível em: <https://www.carwash.org/docs/default-source/watersavers-pdfs/2009-fw-car-wash-water-monitoring-study.pdf>. Acesso em: 14 set. 2018.
- SOEIRO, E. C. *Tratamento de Efluentes de Lava-jato via processo oxidativo avançado*. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo e Gás). Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Petróleo e Gás. Universidade Potiguar. Natal, RN. 2014.
- SOHN, S.; KIM, D. *Modification of Langmuir isotherm in solution systems – definition and utilization of concentration dependent factor*. Chemosphere, v. 58, p. 115-123, jan. 2005. Disponível em: <http://
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653504007520?via%3Dihub>>. Acesso em: 2 set. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.091>
- STORCK, S.; BRETINGER, H. & MAIER, W.F. *Characterization of micro and mesoporous solids by physisorption methods and pore-size analysis*. Applied Catalysis A: General, 174:137-146, 1998.
- SOUSA NETO, V. O. et al. *Use of Coconut Bagasse as alternative adsorbent for separation of copper (II) ions from aqueous solutions: Isotherms, kinetics and thermodynamic studies*. Bioresources, v. 6, p. 3376-3395, 2011.
- SOUZA, H. Y. S. *Estudo termoanalítico da perlita hidrofobizada com óleo de linhaça*. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado em Físico-Química; Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- TEAS, C. et al. *Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up*. Desalination, v. 140, p. 259-264, 2001.
- TEIXEIRA, P. C. *Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando à reciclagem da água*. 2003. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, SP, 2003.
- TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, A. S. *Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno*. Revista Química Nova. vol. 24. n.º.6. São Paulo Nov./Dec. 2001. Disponível em: http://www.quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=809. Acesso em: 10 set. 2018.
- TETRAQUIMICA. *Ficha de informações e segurança de produtos químicos. Perlav-Max*. Doc. PQ.08.02. Emitido 01/07/2006 - Revisão 00. Disponível em: http://www.tetraquimica.com.br/PDFS/13_Perlav/FISPO-8-PERLAV-MAX.pdf. Acesso em 10 ago. 2018.
- TOLEDO, B. I. et al. *Bisphenol a removal from water by activated carbon, Effects of carbon characteristics and solution chemistry*. Environmental Science Technology, v. 39, p. 6246-6250, 9 jul. 2005.
- TOSETTO, M. S. *Tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reuso urbano*. 2005. 250 f. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas. Campinas, SP. 2005.
- UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. *Development Document for Effluent Limitations guidelines and standards for the auto and other laundries point source category*. EPA 820-B-80-100, Office of Water and Waste Management, Washington, D.C., 1980.

- VAOU, V.; PANIAS, D. *Thermal insulating foamy geopolymers from perlite*. Journal Minerals Engineering, v. 23, n. 14, p. 1146–1151, nov. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687510001962>. Acesso em 06 de agosto de 2018.
- VIVACQUA, M. C. R. *Qualidade da água do escoamento superficial urbano: revisão visando o uso local*. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia da Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2005.
- VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, v.01. Minas Gerais: ABES, 1995.
- ZANETI, R.; ETCHEPARE, R.; RUBIO, J. *Car wash wastewater reclamation. Full-scale application and upcoming features*. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 11, p. 953–959, 2011.
- ZANETI, R.; ETCHEPARE, R.; RUBIO, J. *More environmentally friendly vehicle washes: Water reclamation*. Journal of Cleaner Production, v. 37, p. 115–124, 2012.
- ZANETI, R. N.; ETCHEPARE, R.; RUBIO, J. *Car wash wastewater treatment and water reuse - A case study*. Water Science and Technology, v. 67, n. 1, p. 82–88, 2013.
- ZOTTER, K. A. *“End-of-pipe” versus “process-integrated” water conservation solutions: A comparison of planning, implementation and operating phases*, Journal of cleaner production, vol. 12, pp. 685-695, 2004.
- WAEKENS, B. E. *Tratamento de efluentes industriais mediante a aplicação de argila organifílica e carvão ativado granular*. São Paulo, 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, 2010.
- WASHTEC. *Conveyor tunnel system – tailored solutions for every site*. Publicado em 2014. Disponível em: <https://www.washtec-uk.com/conveyor-tunnel-system/>. Acesso em: 03 jun. 2018.