



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL**

EVELLE DUARTE CARVALHO OLIVEIRA

**REMOÇÃO DE GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA UTILIZANDO SISAL (*Agave
sisalana*) COMO ADSORVENTE EM SISTEMA DE ADSORÇÃO EM LEITO
DIFERENCIAL**

**CAMPINA GRANDE – PB
2017**

EVELLE DUARTE CARVALHO OLIVEIRA

**REMOÇÃO DE GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA UTILIZANDO SISAL (*Agave
sisalana*) COMO ADSORVENTE EM SISTEMA DE ADSORÇÃO EM LEITO
DIFERENCIAL**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) ao Curso de Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba como exigência para obtenção do título de Químico Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima

**CAMPINA GRANDE – PB
2017**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

O48r Oliveira, Évelle Duarte Carvalho.

Remoção de gasolina em corpos d'água utilizando sisal (Agave sisalana) como adsorvente em sistema de adsorção em leito diferencial [manuscrito] / Évelle Duarte Carvalho Oliveira. - 2017.

54 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima, Departamento de Química".

1. Adsorção. 2. Gasolina. 3. Sisal. I. Título.

21. ed. CDD 660.284 23

EVELLE DUARTE CARVALHO OLIVEIRA

REMOÇÃO DE GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA UTILIZANDO SISAL (*Agave sisalana*) COMO ADSORVENTE EM SISTEMA DE ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) ao Curso de Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba como exigência para obtenção do título de Químico Industrial.

Aprovada em: 11 / 07 / 2017.

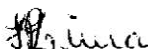
Nota: 40,0 (Dez. nov. 300)



Prof. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima (DESA/UEPB)
Orientadora



Prof. Dra. Vera Lúcia Meira de Moraes Silya (DQ/UEPB)
Examinadora



Prof. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima (CDSA/UFCG)
Examinadora

DEDICATÓRIA

A Deus, meus pais e meu marido. Vocês foram os meus alicerces nessa caminhada, me deram forças quando cansada, quando os meus olhos viam apenas dores.

Sou grata.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus por não me abandonar e fazer parte da minha vida. Foram muitos momentos árduos e muitas vezes de fraqueza, mas o senhor sempre esteve presente me apontando o caminho certo e que eu poderia ir além, obrigada por ter me guiado até aqui.

Ao meu pai Orlando Oliveira Santos, que durante esses anos esteve presente nessa batalha me apoiando e me lembrando do porquê de vir para tão longe, e que eu deveria superar todas as barreiras encontradas aqui.

À minha mãe Maria das Neves Duarte Carvalho, que mesmo estando distante sentia sua presença ao meu lado dando-me força, nunca ficamos um dia sem nos falar. Foi com a distância que descobrimos a nossa fiel amizade, com certeza és minha melhor amiga.

Às minhas avós Vicência Duarte Nobre e Rosa Maria de Oliveira, às minhas tias Conceição Valdira Duarte Carvalho e Eciene Edileuza D. Carvalho, por compreenderem minha ausência nas reuniões familiares.

A meu marido Alisson Gomes da Silva, a minhas primas Aristela Vitoria dos Santos e Isis Lima Duarte e à minha amiga e madrinha Amanda P. dos Santos, por todo apoio e incentivo durante todos esses anos.

À Coordenação do Curso de Química Industrial, representada pelos professores Helvia W. C. de Araújo e José Arimateia Nóbrega.

À professora Lígia Maria Ribeiro Lima, pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e por tudo que a senhora fez por mim durante a graduação, não tenho palavras e nem tão pouco gestos suficientes para retribuir, apenas meu muito obrigada por ter sido essa mãe acadêmica com tanta dedicação, tenha certeza que me lembrarei de todos os seus conselhos.

Às professoras Vera Lúcia Meira de Moraes Silva e Lenilde Mérgia Ribeiro Lima, por aceitarem participar da banca de avaliação dessa monografia de conclusão de curso, e por todo conhecimento transmitido.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio, em especial à minha amiga Martina Maia Sousa.

Aos funcionários e professores da UEPB, pela presteza e atendimento quando solicitados.

RESUMO

Os Impactos ambientais têm sido um dos grandes problemas para os países desenvolvidos e os em potencial crescimento, sendo seus desafios diminuir circunstancialmente os impactos ao meio ambiente causados por suas demandas industriais e, contribuir no tratamento de seus efluentes. Visto que é um dos maiores problemas para as águas do nosso planeta. O objetivo desse trabalho foi avaliar o poder adsorptivo do sisal (*Agave sisalana*) na forma de partículas (pó), derivado da mucilagem exposta ao sol, no processo de adsorção de gasolina presente em corpos aquáticos por meio das análises das curvas cinéticas de adsorção, das isotermas de equilíbrio e do estudo da adsorção utilizando processo de adsorção em leito diferencial, para o sistema água/gasolina/sisal. As etapas do desenvolvimento desse estudo constaram da caracterização morfológica do sisal e da interação do contaminante com o material adsorvente, por meio da obtenção experimental das curvas cinéticas e de equilíbrio. Os resultados iniciais obtidos para o estudo da cinética e do equilíbrio em adsorção utilizando sisal como adsorvente da gasolina, indicou que quando se colocou na proveta a mistura heterogênea, formou-se uma espuma sobrenadante atrapalhando a leitura na proveta, o que dificultou a quantificação da gasolina adsorvida. Para melhor visualização da quantidade adsorvida de gasolina, por meio de análise volumétrica (proveta), utilizando o sistema de adsorção em leito diferencial, foram realizados experimentos usando o adsorvente sisal com pré-tratamento térmico com o objetivo de diminuir ou até mesmo remover a espuma observada após o processo de adsorção. O estudo da adsorção em leito diferencial utilizando 5% do contaminante, em apenas 10 minutos atingiu 100% de remoção de gasolina presente no corpo d'água sintético. Utilizando 7,5% de contaminante, a partir dos 30 minutos já existia uma estagnação do desempenho adsorptivo do sisal. Com 10 % de contaminante foi possível observar uma quantidade de gasolina adsorvida variando entre 60 e 100%.

Palavras-chave: Adsorção; gasolina; sisal.

ABSTRACT

Environmental impacts have been one of major problems for developed and potential growth countries being its challenges reduce circumstantially impacts to environment caused by its industrial demands and contribute in treatment of its effluents. Since that are one of biggest problems for waters of our planet objective of this work was to evaluate adsorptive power of sisal (*Agave sisalana*) in form of particles (powder), derived from mucilage exposed to the sun in adsorption process of gasoline present in aquatic bodies, through analysis of adsorption kinetic curves equilibrium isotherms and adsorption study using a differential bed adsorption process for water/gasoline/sisal system. Development stages of this study included morphological characterization of sisal and interaction of contaminant with adsorbent material by experimentally obtaining of kinetic and equilibrium curves. Initial results obtained for kinetic and equilibrium study in adsorption using sisal as adsorbent of gasoline indicated that when heterogeneous mixture was placed in the test tube, a supernatant foam was formed, hindering reading on test tube, which made difficult quantification of adsorbed gasoline. In order to better visualize adsorbed amount of gasoline, by means of volumetric (test tube) analysis, using adsorption system in a differential bed, experiments were carried out using sisal adsorbent with thermal pretreatment, in order to reduce or even remove after adsorption process. The study of adsorption in a differential bed using 5% of contaminant, in only 10 minutes reached 100% removal of gasoline present in synthetic water body. Using 7.5% contaminant, from 30 minutes already there was a stagnation of sisal adsorptive performance. With 10% of contaminant, it was possible to observe an amount of gasoline adsorbed varying between 60 and 100%.

Keywords: Adsorption; gasoline; sisal.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2Objetivos Específicos.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 CONTAMINAÇÃO DE CORPOS AQUÁTICOS.....	13
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR DERIVADOS DO PETRÓLEO.....	14
2.2.1 Tipos de Plataformas de Petróleo	15
2.3 PETRÓLEO.....	15
2.3.1 Hidrocarbonetos	17
2.4 ADSORÇÃO.....	18
2.4.1 Definição	19
2.4.2 Mecanismo de Adsorção	20
2.4.3 Tipos de Adsorção	20
2.4.4 Fatores que Influenciam a Adsorção	21
2.4.4.1 <i>Área Superficial</i>	21
2.4.4.2 <i>Solubilidade</i>	21
2.4.4.3 <i>Natureza físico-química do adsorvente</i>	22
2.4.4.4 <i>Temperatura</i>	22
2.4.4.5 <i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i>	22
2.4.5 Cinética de Adsorção	23
2.4.6 Equilíbrio de Adsorção	24
2.4.6.1 <i>Isoterma de Langmuir</i>	25
2.4.7 Adsorção em Leito Diferencial	25
2.5 ADSORBATO.....	26
2.6 ADSORVENTE.....	27
2.6.1 Pré-Tratamento do Adsorvente	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 MATÉRIA-PRIMA.....	31
3.1.1 Biomassa Sisal	31
3.1.2 Adsorbato Gasolina	32
3.2 METODOLOGIA.....	32

3.2.1	Preparação da Biomassa Sisal.....	33
3.2.2	Análise Bromatológica do Sisal.....	33
3.2.3	Cinética de Adsorção.....	34
3.2.4	Isoterma de Equilíbrio.....	35
3.2.5	Tratamento Térmico do Sisal.....	36
3.2.6	Leito Diferencial.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	ANÁLISE BROMATOLÓGICA DO SISAL.....	40
4.2	CINÉTICA DE ADSORÇÃO.....	41
4.3	ISOTERMA DE ADSORÇÃO.....	44
4.4	PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA SISAL NA FORMA PARTICULADO....	46
4.5	ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL.....	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Muitas águas residuárias, causadoras de impactos ambientais, apresentam hidrocarbonetos originados dos processos de produção nas indústrias de plásticos, borrachas sintéticas, tintas, corantes, adesivos, solventes, detergentes, explosivos, produtos farmacêuticos, que derivam do petróleo. Além disso, pode-se citar a contaminação causada pelo petróleo, ocasionada pelo derramamento de petróleo bruto ou de seus produtos refinados, decorrentes de problemas nos tanques de armazenamento ou plataformas, vazamentos em navios ou explosões de poços (SOUZA *et al.*, 2011).

Devido a estas implicações ambientais, novas tecnologias têm sido pesquisadas para a degradação ou imobilização destes compostos. Desta forma, o desenvolvimento de métodos alternativos de tratamento de efluentes que combinem índices cada vez menores de substâncias tóxicas e baixo custo, é de extrema importância (PERIN *et al.*, 2006). A adsorção apresenta-se como um método alternativo ao tratamento destes efluentes. De acordo com Bernardo (2011) o estudo dessa técnica tem merecido grande importância, especialmente no desenvolvimento de novas tecnologias separativas. Estas tecnologias fazem uso da adsorção seletiva dos componentes a separar (adsorbatos), quando colocados em contato com um sólido poroso (adsorvente).

Novos materiais adsorventes têm despertado grande interesse no meio científico. Diversos trabalhos têm mostrado o estudo com materiais adsorventes para cátions, ânions e hidrocarbonetos, destacando-se aquitosana; argilas; zeólitas, leveduras; bactérias; carvão ativado; resíduos agroindustriais e compósitos (TAGLIAFERRO *et al.*, 2011). Também estão sendo estudadas biomassas obtidas de plantas originárias da região Nordeste, tais como bagaço-de-cana de açúcar e mandacaru (LIMA, 2010; SILVA *et al.*, 2014).

Com o aumento de subprodutos e resíduos oriundos de agroindústrias, tornou-se viável e promissor o uso de resíduos agroindustriais quando observados de um ponto de vista químico e/ou aspecto ambiental. Estes resíduos são renováveis e biodegradáveis e contém moléculas ricas em grupos hidroxila, que podem sofrer um grande número de modificações químicas para a produção de novos materiais (COSTA *et al.*, 2010).

O estudo de um processo de adsorção requer conhecer os dados de equilíbrio e a velocidade com que este alcança (FERNANDES, 2005).Dentre as alternativas propostas está o Processo de Adsorção em Leito Diferencial utilizando biomassa adsorvente, sistema projetado pelas professoras Lígia Maria Ribeiro Lima (DESA) e Vera Lúcia Meira de Moraes Silva (DQ), ambas Doutoradas na área de Adsorção, com o objetivo de aplicação em escala ampliada, no tratamento de resíduos industriais contaminados com compostos derivados do petróleo, como também na purificação de corpos d'água, usando biomassa a partir de plantas nativas da região Nordeste, como adsorvente.

O presente trabalho tem como finalidade, valorizar os resíduos agroindustriais e a técnica de remoção de contaminantes, que ao decorrer de estudos tem se mostrado uma alternativa viável, eficaz e econômica. Corroborando com as afirmativas descritas anteriormente, este trabalho tem como objetivo estudar e avaliar a capacidade adsortiva do sisal (*Agave sisalana*) para adsorção de derivados do petróleo, tais como a gasolina utilizada nesse estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o poder adsortivo do sisal (*Agave sisalana*) para remoção do contaminante orgânico gasolina, presente em corpos aquáticos, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter as curvas cinéticas de adsorção do sistema água/gasolina/sisal.
- Determinar as isotermas de equilíbrio para a mistura heterogênea água/gasolina/sisal.
- Quantificar o poder adsortivo do sisal em contanto com o contaminante gasolina, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTAMINAÇÃO DE CORPOS AQUÁTICOS

Nos últimos anos tem aumentado bastante a preocupação da sociedade quanto à preservação do meio ambiente. A poluição das águas, ocasionada pela negligência no tratamento de seus rejeitos ou por acidentes cada vez mais frequentes que acabam por lançar muitos poluentes nos ambientes aquáticos é um fato preocupante, sendo essencial o levantamento das condições de qualidade e o tratamento dos efluentes industriais (COSTA *et al.*, 2010).

A Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, publicada no DOU nº 053 de 18/03/2005, págs. 58-63, alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011, “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências” (www.mma.gov.br).

No contexto urbano brasileiro os problemas ambientais se acumulam e representam situações de risco, com impactos crescentes na qualidade do ar, da água, do solo e na saúde da população (GURGEL *et al.*, 2009). O art. 225 da Constituição Federal consagrou o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado como direito fundamental, criando o dever de o agente degradador reparar os danos causados e estabeleceu o fundamento de responsabilização de agentes poluidores, pessoas físicas e jurídicas (SION *et al.*, 2014).

No intuito de concretizar o comando constitucional, foram editadas, entre outras, a Lei 9.605/98 e a Lei 9.966/2002. A Lei 9.605/98 dispôs sobre as sanções penais e administrativas ambientais genéricas, destacando-se os artigos 54 (causar poluição), 56 (armazenar e transportar substância perigosa ou nociva à saúde humana ou ao meio ambiente, em desacordo com a legislação) e 60 (exercer atividade sem ou em desacordo com a licença ambiental). A seu turno, a Lei 9.966/2002 dispôs sobre a prevenção, controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas submetidas à jurisdição nacional (SION *et al.*, 2014).

Qualquer tipo de derramamento de petróleo nos oceanos é considerado uma catástrofe ambiental, os impactos ambientais causados são incalculáveis. A mancha de petróleo que se propaga pelo mar, além de contaminar a água, mata milhares de

aves, peixes e corais, conforme ilustrado na Figura 1 (www.google.com.br/acidentedepetroleo).

Figura 1 – Contaminação de corpos aquáticos.



Fonte: google.com.br/acidentedepetroleo

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR DERIVADOS DO PETRÓLEO

Nas regiões industriais destacam-se, por suas atividades potencialmente poluidoras, processos de extração, produção, transporte ou comercialização de produtos poluentes ao meio ambiente (LIMA, 2016). Como consequência destas atividades, tem-se observado uma expressiva queda da qualidade da água e perda de biodiversidade aquática, em função da desestruturação do ambiente físico, químico e alteração da dinâmica natural das comunidades biológicas (GURGEL *et al.*, 2009).

Dentre as principais atividades, o processo de produção do petróleo apresenta risco potencial na degradação do meio ambiente gerando impactos nocivos. Apesar dos avanços tecnológicos, as técnicas e equipamentos utilizados por essas indústrias continuam por comprometer as faixas de exploração.

As plataformas marítimas (Figura 2) estão entre as maiores fontes contaminadoras da indústria do petróleo, os impactos dessa degradação ambiental podem atingir as comunidades costeiras, o turismo e a economia local, e em casos mais graves poluir praias, manguezais e animais marinhos (OLIVEIRA, 2016).

Figura 2 - Plataforma de petróleo.

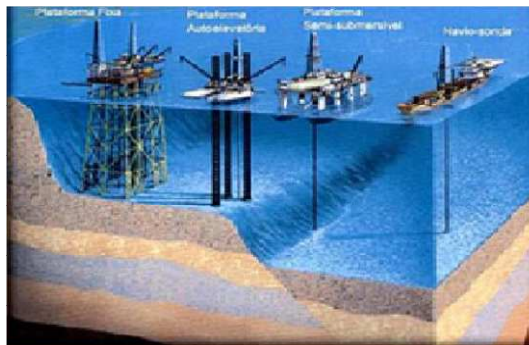


Fonte: brasilecola.uol.com.br

2.2.1 Tipos de Plataformas de Petróleo

No mar, a extração de petróleo pode ser feita com a utilização de equipamentos especiais de perfuração e extração por meio de bombas em plataformas e navios-sonda. Há vários tipos de plataformas para exploração de petróleo em alto-mar, variam de acordo com as características do mesmo (Figura 3).

Figura 3 – Tipos de plataformas de petróleo.



Fonte: brasilecola.uol.com.br

2.3 PETRÓLEO

Constituído basicamente por uma mistura de compostos químicos orgânicos (hidrocarbonetos), o petróleo no seu estado líquido é uma substância oleosa, inflamável, menos densa do que a água e possui cor variando do preto ao castanho claro. Seu estado físico varia com o tamanho das moléculas. Na fase gasosa, a mistura é predominantemente composta por moléculas pequenas já na fase líquida

possui moléculas maiores, nas condições normais de temperatura e pressão (OLIVEIRA, 2016).

A composição química do petróleo é uma combinação complexa de hidrocarbonetos (carbono e hidrogênio), podendo conter também quantidades pequenas de nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos. Um exemplo comum, que pode variar de amostra para amostra, da proporção entre os componentes do petróleo seria: Carbono (82%) - elemento predominante no petróleo; hidrogênio (12%) - atua com o carbono formando as moléculas; nitrogênio (4%) - encontrado na forma de amina; oxigênio (1%) - muito pouco é encontrado; sais (0,5%) - raramente aparecem; metais (ferro, cobre) (0,5%) - considerados como resíduos (www.anp.gov.br).

A indústria de petróleo, em todas as fases do processo produtivo, tem potencial para causar impactos sobre o ambiente e a saúde das populações, em especial à saúde dos trabalhadores, em função dos riscos específicos no ambiente de trabalho (GURGEL *et al.*, 2009). Os principais contaminantes capazes de impactar o meio ambiente em casos de derramamentos de combustíveis são os hidrocarbonetos mono aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos - BTEX) e os policíclicos aromáticos, como naftaleno e benzopireno. O benzeno é sabidamente carcinogênico, sendo os outros, tolueno, etilbenzeno e os xilenos, considerados tóxicos (FORTE *et al.*, 2007).

Na Figura 4 encontra-se ilustrado um acidente de petróleo com grandes proporções de impactos ambientais.

Figura 4 – Acidente ambiental com derramamento de petróleo.



Fonte: Sion *et al.* (2014).

Dos seus derivados as frações mais leves, tais como gasolina, querosene e óleo diesel contêm hidrocarbonetos aromáticos. Parte deles se evaporam, e outra parte, antes de se evaporar, se dissolve na água, agravando ainda mais o problema. De um modo geral, pode-se dizer que as gasolinas e naftas são mais tóxicas que óleos diesel e combustíveis, e que estes últimos são mais tóxicos que o petróleo cru (MARIANO, 2001).

Entres os principais impactos causados por seus derivados ao meio ambiente, estão: Formação de película de petróleo na superfície da água, que dificulta a troca gasosa entre ar e água; vedação dos estômatos das plantas e órgãos respiratórios dos animais e a ação de substâncias tóxicas neles contidas para muitos organismos (CARVALHO, 2014).

A indústria do petróleo é mundialmente reconhecida como uma das atividades econômicas com o maior potencial de impacto ao meio ambiente. Os eventuais derramamentos de petróleo, principalmente, após o desastre no Golfo do México no ano de 2010, aumentaram a preocupação ambiental mundial no que diz respeito ao desenvolvimento de materiais e métodos que tenham a capacidade de remover, recuperar e degradar o óleo (RADETIC *et al.*, 2008; CALDAS, 2017).

2.3.1 Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos constituídos exclusivamente de moléculas formadas por átomos de hidrogênio e carbono. A quase totalidade dos hidrocarbonetos que constituem o petróleo pertence a quatro grandes séries ou famílias: Hidrocarbonetos parafínicos, nafténicos, aromáticos e asfálticos.

Em casos de contaminação por hidrocarbonetos de petróleo, a película observada nos corpos aquáticos persiste superficialmente pela presença das interações fortes atrativas entre moléculas não polares, como no caso dos hidrocarbonetos e a água. Tais interações pertencem a uma classe de importantes fenômenos, denominados efeitos hidrofóbicos (CAMPBELL; FARREL, 2009).

Os principais hidrocarbonetos presentes no petróleo estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5 – Hidrocarbonetos do petróleo.



Fonte: www.engenharia-quimica.blogspot.com.br

Os hidrocarbonetos aromáticos (BTEX) possuem como característica o anel benzênico na sua estrutura, são produzidos durante o processo de destilação e estão associados aos produtos de petróleo refinados, como a gasolina, o óleo diesel e o querosene, eles são considerados produtos não aquosos menos densos que a água (MORAIS, 2012). De acordo com Tavares (2007), esses constituintes presentes nos efluentes aquosos apresentam um risco para a preservação do meio ambiente.

A interação dos hidrocarbonetos entre si e a sua solubilidade na água, dependerão da polaridade de suas moléculas. Geralmente, quanto maior é a sua polaridade maior será a sua solubilidade na água e o seu ponto de ebulição. Os hidrocarbonetos aromáticos são mais solúveis na água e menos voláteis do que os hidrocarbonetos parafínicos com o mesmo número de átomos de carbono correspondentes (TAVARES, 2007).

2.4 ADSORÇÃO

A contaminação química da água a partir de uma ampla gama de poluentes orgânicos e inorgânicos, tais como: Metais tóxicos; benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX); hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs); ânions, desencadeou a necessidade de desenvolver tecnologias no intuito de remover esses poluentes encontrados em resíduos líquidos e gasosos. A adsorção tornou-se, então, um dos métodos mais populares para este fim, ganhando importância nas últimas décadas como um processo de separação e purificação (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A bioadsorção ou bioissorção é o fenômeno de adsorção observado na biomassa, que tem ganhado credibilidade pelo reconhecimento da biomassa como um material adsorvente de baixo custo e abundante na região estudada. A estrutura química da biomassa vegetal possui diferentes grupos funcionais, como carboxil, carbonil, cetona, sulfato, fosfato e amino, responsáveis pela bioissorção (YAMAURA *et al.*, 2008).

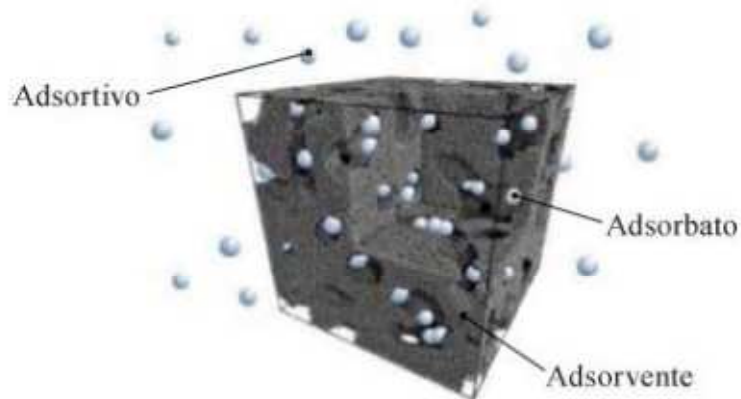
A propriedade altamente hidrofóbica de biomassas, somada à elevada porosidade, desenvolve uma força capilar no sentido da adsorção de óleos. Tecidos vegetais, com alta área superficial e com grandes poros, adsorvem contaminantes orgânicos por mecanismos químicos de uma maneira semelhante a do carvão ativado (RUBIO *et al.*, 2003).

2.4.1 Definição

A adsorção é uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. 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. Por isso, geralmente, os adsorventes são sólidos com partículas porosas. A espécie que se acumula na interface do material é normalmente denominada de adsorvato ou adsorbato; e a superfície sólida na qual o adsorbato se acumula, de adsorvente ou adsorbente (RUTHVEN, 1984).

Na Figura 6 está ilustrado o processo espontâneo e reversível que ocorre quando a superfície de um sólido é exposta a um fluido, gás ou líquido, compreendendo a impregnação desse fluido na interface do sólido em contato com o fluido.

Figura 6 - Processo adsorptivo espontâneo e reversível que ocorre quando a superfície de um sólido é exposta a um fluido, gás ou líquido.



Fonte: www.engenhariaearquitetura.com.br

2.4.2 Mecanismo de Adsorção

A separação pelo processo de adsorção baseia-se em três mecanismos distintos: Mecanismos estéricos; de equilíbrio e cinéticos. No mecanismo de separação estérico, o sólido poroso tem aberturas específicas tal que permite que as moléculas pequenas entrem enquanto impedem a entrada das moléculas grandes. O mecanismo de equilíbrio é baseado nas diferentes capacidades que o sólido tem para acomodar espécies diferentes, isto é, o adsorbato mais forte preferencialmente será removido pelo sólido. O mecanismo cinético consiste nas diferentes taxas de difusão de diferentes espécies nos poros adsorventes, assim, controlando o tempo de exposição, a espécie de difusão mais rápida é preferencialmente removida pelo sólido (DO, 1998).

2.4.3 Tipos de Adsorção

Dependendo da natureza das forças envolvidas, a adsorção pode ser classificada quanto a sua intensidade em dois tipos: Adsorção física (fisissorção) e adsorção química (quimissorção). No caso de adsorção física, a ligação do adsorbato à superfície do adsorvente envolve uma interação relativamente fraca que pode ser atribuída às forças de van der Waals, que são similares às forças de coesão molecular. Diferentemente, a quimissorção envolve a troca ou partilha de elétrons entre as moléculas do adsorbato e a superfície do adsorvente, resultando em uma reação

química e, portanto, bem mais forte que no caso da fisissorção (NASCIMENTO *et al.*,2014).

2.4.4 Fatores que Influenciam a Adsorção

Os fatores que influenciam o processo de adsorção são: Área superficial; propriedades do adsorvente e do adsorbato; temperatura do sistema; natureza do solvente; solubilidade do soluto; temperatura e potencial hidrogeniônico (pH) do meio. O sucesso da adsorção como processo de separação, depende da escolha do material adsorvente e da otimização das variáveis do processo (RUTHVEN, 1996).

2.4.4.1 Área Superficial

A intensidade da adsorção é proporcional à área superficial específica, visto que a adsorção é um fenômeno de superfície. Para partículas maiores, a resistência à difusão é menor e grande parte da superfície interna da partícula não é disponibilizada para adsorção (NASCIMENTO *et al.*,2014). Entretanto, deve-se ter em mente que a medida da área superficial é normalmente obtida por meio da quantidade de nitrogênio que pode ser adsorvido, durante a quantificação utilizando equipamento apropriado para medição.

O nitrogênio é uma molécula pequena que quando o processo visa a entrada de uma molécula maior, uma boa parte da área superficial pode estar inacessível (COONEY, 1999). Conclui-se então, que nem sempre o tamanho da área superficial será proporcional à quantidade de adsorbato adsorvido.

2.4.4.2 Solubilidade

A solubilidade do soluto impede a atração para a superfície do adsorvente. Grupos polares tem alta afinidade com a água e isto, geralmente, diminui a adsorção a partir de soluções aquosas (CARVALHO, 2014).

2.4.4.3 Natureza físico-química do adsorvente

A natureza físico-química do adsorvente é fator determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade, volume específico de poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

2.4.4.4 Temperatura

A elevação da temperatura aumenta a velocidade de difusão das moléculas de soluto como consequência da diminuição da viscosidade da solução. Esta elevação da temperatura favorece o aumento na difusão das moléculas na camada periférica externa e nos poros internos das partículas do adsorvente. Dessa forma, uma mudança na temperatura provoca uma alteração na capacidade de adsorção de um adsorvente por um adsorbato (SILVA, 2005).

2.4.4.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH afeta a adsorção na medida em que determina o grau de distribuição das espécies químicas. A intensidade desse efeito pode ser maior ou menor conforme o adsorvente, uma vez que as cargas da superfície deste adsorvente dependem da sua composição e das características da superfície. Um índice conveniente da tendência de uma superfície se tornar positiva ou negativamente carregada em função do pH é o valor do mesmo requerido para que a carga líquida do adsorvente seja nula, denominado de ponto de carga zero (pHPZC). Para valores de pH inferiores ao pHPZC, a carga superficial é positiva e a adsorção de ânions é favorecida, enquanto, para valores de pH superiores ao pHPZC, a carga superficial é negativa e a adsorção de cátions é favorecida (AL-DEGS *et al.*, 2000; APEEL *et al.*, 2003).

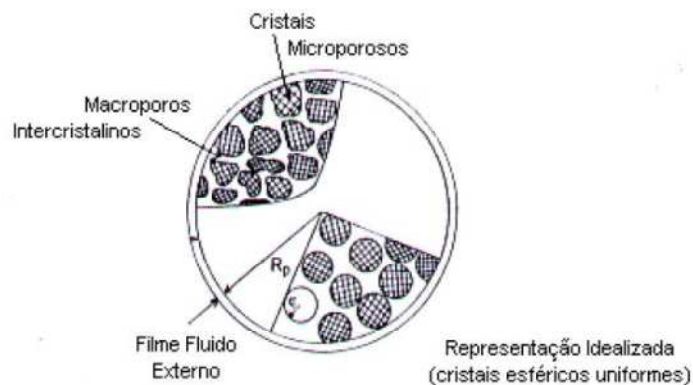
No estudo da adsorção devem-se compreender outros processos relacionados que incluem estudo de equilíbrio, cinética, mecanismo de adsorção em leito diferencial, estes se fazem necessários para o desenvolvimento de novos materiais com boa capacidade de adsorção. Quanto a aplicação do processo de adsorção para a escala industrial utilizando adsorventes, alguns fatores podem determinar a

viabilidade econômica desse material: Baixo custo, disponibilidade, eficiência e capacidade regenerativa.

2.4.5 Cinética de Adsorção

Os estudos de adsorção em condições estáticas se complementam com estudos de cinética de adsorção para determinar a resistência à transferência de massa e o coeficiente efetivo da difusão, assim como estudos de adsorção em coluna. O fenômeno de adsorção de um adsorbato sobre um sólido poroso pode englobar várias etapas de transferência de massa. Na direção da adsorção do componente químico percorre-se um caminho entre o seio do fluido e a superfície do sólido cristalino. Os efeitos de transferência de massa podem promover o aparecimento de três resistências: Resistência do filme líquido externo que circunda a partícula, resistência difusional no mesoporo ou no macroporo do sólido e resistência no microporo dos cristais adsorventes ou micropartículas (LIMA, 2010). Estas resistências podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 - Diagrama esquemático de *pellet* adsorvente.



Fonte: Ruthven (1984).

A resistência oferecida pelo filme líquido externo pode ser eliminada se o sistema for submetido à agitação.

A transferência de massa pode ser controlada pela combinação de todas as resistências, ou apenas por uma delas, dependendo das condições a que esteja submetido o sistema em estudo.

Na interpretação dos dados da taxa de adsorção, torna-se necessário conhecer o regime controlador que pode ser determinado por meio de mudanças nas condições operacionais como, por exemplo, o tamanho da partícula (RUTHVEN, 1984).

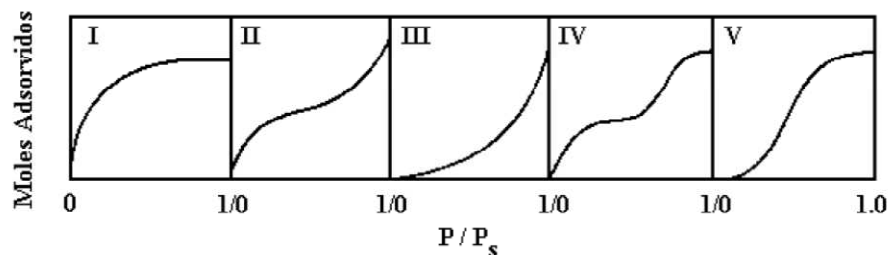
2.4.6 Equilíbrio de Adsorção

O estudo de um processo de adsorção requer conhecer os dados de equilíbrio e a velocidade com que este alcança. Os dados de equilíbrio são obtidos das isotermas de adsorção, as quais são utilizadas para avaliar a capacidade de diferentes biomassas para adsorver uma determinada molécula. As isotermas de adsorção em fase líquida são apresentadas por curvas de concentração do soluto na fase sólida, em função da concentração do soluto na fase fluida, em uma determinada temperatura (FERNANDES, 2005).

A obtenção das isotermas é sem dúvida, a maneira mais conveniente para se especificar o equilíbrio de adsorção e o seu tratamento teórico. Portanto, as isotermas constituem a primeira informação experimental que se utiliza para escolher entre diferentes adsorventes, o mais apropriado para uma aplicação específica (FERNANDES, 2005).

As informações das isotermas de equilíbrio podem fornecer a estimativa da quantidade aproximada de adsorvente necessária para um dado processo e conseqüentemente, o tamanho do equipamento requerido para a operação de adsorção em condições de equilíbrio. Brunauer, Emmett e Teller, em 1938, destacaram que as isotermas de equilíbrio poderiam ser classificadas em cinco tipos, conforme ilustração contida na Figura 8 (LIMA, 2010).

Figura 8 - Classificação das isotermas de BET.



Fonte: Ruthven (1984).

Na Figura 8 estão descritos os seguintes tipos de isotermas: a) Isotermas do tipo I: São características de sólidos microporosos com superfícies externas relativamente pequenas. A quantidade adsorvida tende a um limite; b) Isotermas dos tipos II e III: A quantidade adsorvida tende a um valor infinito, correspondendo à adsorção em múltiplas camadas sobrepostas, e ocorre em sólidos não porosos ou

macroporosos; c) Isotermas dos tipos IV e V: São obtidas para sólidos que apresentam mesoporos nos quais ocorre o fenômeno de condensação capilar, ou seja, o gás se condensa no interior dos mesoporos, o que não acontece se o adsorbato for líquido (RUTHVEN, 1984).

2.4.6.1 *Isoterma de Langmuir*

O modelo matemático de Langmuir pode ser considerado como o mais eficaz para a representação de isotermas em que há uma interação forte entre a superfície do adsorvente e o soluto, para um único componente. Este modelo considera que há um número fixo de sítios e aderem na superfície do adsorvente em sítios definidos e localizados. Cada sítio pode acomodar uma, e somente uma entidade adsorvida, satisfazendo assim a regra da monocamada. A energia da entidade adsorvida é a mesma em todos os sítios da superfície e não depende da presença ou ausência de outras entidades adsorvidas nos sítios vizinhos (RUTHVEN, 1984).

2.4.7 **Adsorção em Leito Diferencial**

Adsorção é uma operação de transferência de massa do tipo sólido-fluido na qual se explora a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em soluções líquidas ou gasosas, o que permite separá-las dos demais componentes destas soluções. Diante dessa característica é possível utilizar um sistema de leito diferencial para adsorver contaminantes na superfície de um corpo aquático.

O processo de adsorção tem demonstrado ser um método eficaz e econômico no tratamento de efluentes com poluentes orgânicos, sendo necessária a pesquisa de materiais de baixo custo para serem utilizados como adsorventes na indústria (MOREIRA *et al.*, 2000). O sucesso da adsorção como processo de separação, depende da escolha do material adsorvente e da otimização das variáveis do processo (RUTHVEN, 1984).

De acordo com Salame; Baandorz (2003) o processo de adsorção depende de vários fatores, os quais incluem: Natureza do adsorvente e do adsorbato e as condições de adsorção. A adsorção sofre influência das características da biomassa como a distribuição e o volume dos poros, da área do adsorvente, e das condições

operacionais como vazão, tempo de contato, pH, temperatura, pressão, concentração do contaminante e o teor de sólidos suspensos no afluente (FLORIDO, 2011).

A adsorção é um método eficaz e econômico utilizado na purificação de efluentes que pode ser aplicado de várias formas, sendo o processo de adsorção em leito diferencial o foco desta pesquisa. O sistema de adsorção em leito diferencial consiste em uma camada fina de espessura específica de adsorvente, posta em contato com o efluente que se deseja purificar. Esse processo é preferencialmente aplicado para remoção de material líquido sobrenadante.

2.5 ADSORBATO

A denominação adsorbato, é a parte da fase fluida que será adsorvida. No caso específico do trabalho, o adsorbato refere-se ao contaminante presente em um corpo aquático, podendo ser orgânico ou inorgânico. Recentemente em Minas Gerais foi divulgado um alerta sobre a água e o solo de 642 áreas do Estado, por estarem contaminados por derivados de petróleo ou por metais presentes em resíduos industriais. A ocorrência de vazamentos e infiltrações desses materiais aumentou cerca de 21% nos últimos cinco anos, como mostra o Inventário de Áreas Contaminadas e Reabilitadas em Minas Gerais no ano de 2016, realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). A maior parte da contaminação vem de postos de combustíveis e de indústrias metalúrgicas (hoje.vc/un7q).

A gasolina consiste na mistura complexa de hidrocarbonetos voláteis e inflamáveis derivados do petróleo, predominantemente com 4 a 12 átomos de carbono e temperatura de ebulição entre 30 e 225°C (SILVA *et al.*, 2009). Pode ser encontrada comercialmente na forma tipo A (sem álcool), comum e aditivada. Atualmente, toda a gasolina comercializada em território nacional recebe a adição de 25% de etanol anidro, por determinação da legislação (CIMA, nº37; Lei 10.203/2001) (FERREIRA, 2010).

A gasolina aditivada apresenta-se na cor verde, é proveniente da gasolina do tipo comum com adição de detergentes-dispersantes, para manter limpo o sistema de alimentação do veículo. O detergente desprende a sujeira e o dispersante faz com que ela seja quebrada para ser eliminada pelo sistema de combustão. Os constituintes presentes na gasolina aditivada são os mesmos encontrados na gasolina comum, e

incluem hidrocarbonetos aromáticos como benzeno, tolueno e xileno (MARIANO, 2001).

Uma característica de forte influência é a polaridade do adsorbato, uma vez que uma espécie polar terá mais afinidade para o solvente ou para o adsorvente, conforme a polaridade. Os grupos polares (hidroxilas, carboxílicos, aminas) são bastante comuns em materiais lignocelulósicos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

2.6 ADSORVENTE

A biotecnologia tem surgido como alternativa viável na busca de métodos e materiais adsorventes com menor impacto ambiental e de menor custo, com resultados satisfatórios. Apesar do termo biomassa ter surgido para caracterizar fontes orgânicas usadas para produzir energia a partir da energia capturada do sol pelas plantas, por meio da fotossíntese, transformando-a em energia química (ANEEL, 2002), a qual pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor; hoje as biomassas têm sido estudadas para outros fins que não apenas como combustíveis.

No Brasil, em particular, a grande diversidade e abundância de biomassa, como algas marinhas e resíduos agrícolas, torna o processo de bioadsorção bastante promissor, principalmente devido à alta afinidade desse material, além do potencial de aplicação de vários ciclos de adsorção/dessorção, permitindo a recuperação seletiva do uso de efluentes específicos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A procura por novos adsorventes é focada nos biomateriais por serem viáveis economicamente, biodegradáveis e provirem de recursos renováveis. Diferentes tipos de biomassa, como subprodutos agrícolas e madeiras, algas, bactérias, fungos, também têm a capacidade de reter por meio de adsorção, levando vantagem sobre as resinas comerciais, por serem viáveis no ponto de vista técnico/econômico (PAGNANELLI *et al.*, 2001; VAUGHAN *et al.* 2001).

A natureza físico-química do adsorvente é fator determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade, volume específico de poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor (BARROS, 2001; NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Nos últimos anos estão sendo estudadas biomassas obtidas de plantas originárias da região Nordeste, tais como bagaço-de-cana de açúcar, mandacaru (LIMA, 2010; LIMA *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2014) e mucilagem de sisal (LIMA *et al.*, 2016). O sisal é a principal fibra dura produzida no mundo, correspondendo a aproximadamente 70% da produção comercial de todas as fibras desse tipo. Uma parte dessa planta vira resíduo agroindustrial. Com o objetivo de reaproveitamento e sabendo-se que a região Nordeste é responsável por grande parte dessa plantação, foi proposto nesse trabalho desenvolver o estudo do poder adsorptivo do sisal, do gênero *Agave Sisalana* visto que o mesmo possui propriedades fibrogenitas, semelhantes a outras biomassas já estudadas, tais como: Mesocarpo de coco e bago de cana-de-açúcar.

O sisal (Figura 9) é originário da península de Yucatã, no México, é a principal fibra dura produzida no mundo contribuindo com mais da metade da produção comercial de todas as fibras desse tipo. A produção no Brasil concentra-se no Nordeste, nos estados da Bahia, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, geralmente cultivado em áreas onde as condições de clima e de solo são pouco favoráveis à exploração de outras culturas que ofereçam resultados econômicos satisfatórios. Estima-se que nesses estados o sisal seja responsável pelo emprego e renda de aproximadamente meio milhão de pessoas (EMBRAPA,2011).

Figura 9 – Plantio de Sisal (*Agave sisalana*).



Fonte: www.wildmadagascar.org/images/sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é a espécie cultivada de maior predominância; em média, cada planta é capaz de produzir anualmente entre 20 e 40 folhas, durante um ciclo vegetativo de 8 a 10 anos, com uma produção total de 180 a 250 folhas aproveitáveis sob o ponto de vista industrial. O peso individual da folha varia entre 350

e 600 gramas, sendo que o rendimento de fibra seca se situa entre 3 e 5% deste peso. O comprimento da folha e a resistência da fibra são qualidades intrínsecas importantes deste material (EMBRAPA, 2011).

Martin (2008) destacou que Medina, no ano de 1954, realizou um estudo para a determinação da composição química da fibra do sisal, em que a fibra analisada era constituída de 65,8% de celulose, 12% de hemicelulose, 9,9% de lignina e 0,8% de pectina.

No trabalho realizado por Mwaikambo *et al.* (2002), utilizando a fibra do sisal, os resultados obtidos foram 73% de celulose, 13% de hemicelulose, 11% de lignina e 2% de pectina.

Diante do exposto podemos justificar essa diferença nas porcentagens das composições químicas da fibra do sisal, aos diferentes solos e formas de plantio.

2.6.1 Pré-Tratamento do Adsorvente

Vários métodos de pré-tratamentos têm sido propostos e desenvolvidos com o objetivo de reduzir a suspensão observada ao final do processo de adsorção, no entanto, o pré-tratamento hidrotérmico tem chamado atenção por não fazer uso de reagentes químicos, o que o torna interessante do ponto de vista ambiental e econômico. Vários estudos foram realizados utilizando esse método de pré-tratamento em diferentes biomassas, tais como a palha de trigo, a palha de milho e o bagaço de cana-de-açúcar (SANTOS *et al.*, 2014).

O uso do pré-tratamento do sisal irá alterar a estrutura da biomassa lignocelulósica e, conseqüentemente, tornar os grupos hidroxila (OH) da celulose mais acessíveis, além de remover lignina e hemicelulose aumentando a porosidade e a área superficial do material (CANILHA *et al.*, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2014), beneficiando a adsorção do contaminante.

Caldas (2017) estudou o resíduo de coco (*Cocos nucifera L.*) como sorvente em derramamento de óleo no ambiente marinho. Os resultados evidenciaram que, além da boa capacidade de sorção de óleo com grande presença de n-alcanos, o uso das fibras de coco sem tratamento térmico é melhor, enquanto a fibra de coco com tratamento térmico é mais adequada para óleo com grande presença de resinas e asfaltenos. A pesquisa com o resíduo de coco apresentou resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciando que o tratamento térmico promove uma

limpeza na superfície das fibras, melhorando a adesão matriz/fibra. As fibras de *Cocos nucifera L.* apresentaram maior afinidade com a amostra constituída por óleo leve, com elevado ponto de fluidez e menor densidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA-PRIMA

3.1.1 Biomassa Sisal

A biomassa estudada como adsorvente na técnica de separação de contaminante por adsorção foi o sisal do gênero *Agave*, da espécie *Agave sisalana* (Figura 10). O sisal foi obtido na forma de partículas (pó), derivado da mucilagem exposta ao sol (Figura 11), adquirido na Embrapa localizada no município de Monteiro no Estado da Paraíba.

Figura 10 - Sisal (*Agave sisalana*).



Foto: www.infoteca.cnptia.embrapa.br

Figura 11 - Mucilagem exposta ao sol.



Fonte: infoteca.cnptia.embrapa.br

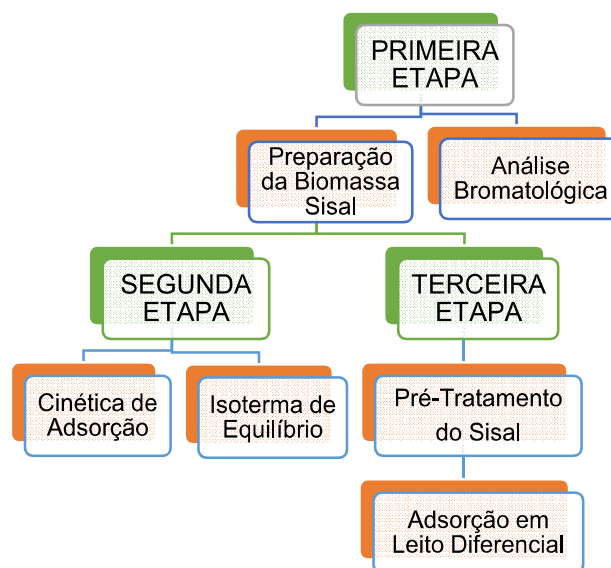
3.1.2 Adsorbato Gasolina

O contaminante estudado como adsorbato para simular um efluente sintético foi à gasolina tipo C, comprada em posto de gasolina situado na cidade de Campina Grande, no Estado da Paraíba. Derivada do petróleo, a gasolina possui características orgânicas provenientes de uma combinação complexa de hidrocarbonetos que apresentam afinidade com o adsorvente a ser utilizado.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo consistiu em quatro etapas: Na primeira preparou-se a biomassa sisal na forma particulada (pó) sem pré-tratamento térmico, para análise físico-química; na segunda o efluente sintético com a dispersão água/gasolina, para realização das análises de cinética e de equilíbrio da dispersão água/gasolina/sisal sem pré-tratamento, e na terceira foi feita a medição da quantidade adsorvida de gasolina em contato com a biomassa sisal com pré-tratamento, por meio de análise volumétrica, após adsorção em sistema de leito diferencial. Na Figura 12 está representado um fluxograma com as etapas desenvolvidas nessa pesquisa, com as metodologias descritas nos itens a seguir.

Figura 12 – Etapas do estudo da adsorção de gasolina em contato com biomassa sisal.



Fonte: Autora (2017).

3.2.1 Preparação da Biomassa Sisal

O sisal (*Agave sisalana*) recebido na forma de partículas (pó) foi exposto ao sol para a redução da umidade existente e depois armazenado em ambiente seco, para evitar uma decomposição por ação biológica. Em seguida, passou por uma preparação para obtenção do particulado com granulometria homogênea, na qual a biomassa em estudo foi triturada em um triturador industrial (Figura 13a) e peneirada em um sistema de peneiras (Figura 13b) com aberturas de 1,00 e 2,38 mm, sendo logo após acondicionada em recipiente de vidro com vedação, para posterior utilização. A preparação da biomassa foi realizada no Laboratório de Pesquisas de Ciências Ambientais (LAPECA) localizado no CCT/UEPB/Campus I.

Figura 13 - Triturador Industrial (a); Peneiras com aberturas 1,00 e 2,38 mm (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2017).

3.2.2 Análise Físico-Química do Sisal

Foram realizadas análises para quantificar algumas propriedades físicas e químicas do sisal, a partir do pó obtido por meio do peneiramento. A caracterização do sisal foi desenvolvida no Laboratório de Análises de Tecido de Plantas, situado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), localizado no município de Areia - PB.

3.2.3 Cinética de Adsorção

Para o estudo da cinética de adsorção foram utilizadas três razões de proporções adsorbato/adsorvente: Para a razão igual a 7, utilizou-se um sistema de 40 mL de água; 8,4 mL do adsorbato gasolina e 1,2 g do adsorvente sisal. Para a razão base 10;40 mL de água; 12 mL de adsorbato e 1,2 g de adsorvente e para a razão 13, foi de 40 mL de água; 15,6 mL de adsorbato e 1,2 g de adsorvente.

Inicialmente a biomassa sisal foi pesada em uma balança analítica (Figura 14a). Em seguida, foram organizados 12 frascos erlenmeyer a mesa agitadora com velocidade de agitação equivalente a 130 rpm (Figura 14b) e a cada um deles foram adicionados 40 mL de água.

Figura 14 - Pesagem da biomassa sisal em balança analítica (a); Mesa agitadora com suporte para frascos erlenmeyer de capacidade para 50 mL (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2017).

Com o auxílio de uma pipeta colocou-se a gasolina nos frascos erlenmeyer, mantendo-se um intervalo de 1 a 2 min de um frasco para o outro, pois cada um deveria permanecer em agitação por 5 min antes de ser adicionada a biomassa sisal. Após 5 minutos, em cada erlenmeyer foi adicionada determinada quantidade da biomassa sisal na forma particulada, com o auxílio de um funil de plástico, com tempos crescentes de 5 a 60 minutos, com o cuidado de mantê-los isolados do contato com o ambiente fechando-os com papel alumínio. Assim que o tempo de agitação de cada erlenmeyer chegou ao fim, os mesmos foram retirados da mesa agitadora, e a mistura água/gasolina/sisal de cada um foi transferida para uma peneira com suporte de funil

de vidro, separando a biomassa da fase líquida para que fosse possível fazer a análise volumétrica do contaminante gasolina adsorvido pela biomassa sisal, em uma proveta de 50 mL. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

3.2.4 Isoterma de Equilíbrio

Nos ensaios de obtenção das isotermas de adsorção para o sistema água/gasolina/sisal foi utilizada a mesa agitadora (Figura 14b), na qual foram colocados 10 frascos erlenmeyer contendo quantidades de água. Com o auxílio de uma pipeta colocou-se nos frascos erlenmeyer a gasolina variando a concentração inicial de 5 a 50% de contaminante, lembrando-se de manter um intervalo de 1 a 2 min de um frasco para o outro, pois cada um deveria permanecer em agitação por 5 min antes da adição da biomassa. Após 5 minutos em cada erlenmeyer foi adicionada determinada quantidade da biomassa sisal, com o auxílio de um funil de plástico, com tempos crescentes de 5 a 60 minutos; com o cuidado de mantê-los fechados com papel alumínio. Os frascos erlenmeyer ficaram 60 min sob agitação na mesa agitadora, com velocidade equivalente a 130 rpm. Assim que o tempo de agitação de cada erlenmeyer chegou ao fim, cada um foi retirado da mesa agitadora, e a mistura heterogênea contida em cada um foi transferida para uma peneira com suporte de funil de vidro, separando a biomassa da fase líquida para que fosse possível fazer a análise volumétrica do contaminante adsorvido pela biomassa, em uma proveta de 50 mL (Figura 15). Os experimentos foram realizados em triplicata.

Figura 15 - Quantificação do contaminante adsorvido por análise volumétrica.



Fonte: Autora (2017).

3.2.5 Tratamento Térmico do Sisal

Conforme Stephanidis *et al.* (2011) a remoção das barreiras químicas/físicas leva a formação de uma estrutura "aberta". Contudo, levando-se em consideração os estudos desenvolvidos por pesquisadores, foi feito neste trabalho uma adaptação ao pré-tratamento da biomassa sisal, com a utilização da temperatura inferior a citadas por Santos *et al.* (2014), visto que a biomassa já havia sido exposta ao sol.

Ao decorrer dos estudos e obtenção dos resultados da cinética e do equilíbrio foi possível observar a presença de uma espuma sobrenadante na mistura heterogênea composta por água/gasolina/sisal. Essa espuma dificultou a leitura volumétrica da quantidade adsorvida de gasolina, sendo necessário um pré-tratamento. Diante da dificuldade de quantificar o adsorvido foram realizados alguns testes para o pré-tratamento do sisal, a fim de que a melhor opção fosse utilizada para o desenvolvimento do processo de adsorção em leito diferencial. As condições para os pré-tratamentos analisados foram os seguintes:

TESTE 1: A biomassa foi lavada com água à temperatura de 50°C e secagem estufa a 70°C por 24 horas.

TESTE 2: A biomassa foi lavada com água à temperatura de 50°C e seca em temperatura ambiente por 24 horas.

TESTE 3: A biomassa foi lavada com água à temperatura ambiente e seca em temperatura ambiente por 24 horas.

TESTE 4: A biomassa foi lavada com água à temperatura ambiente e secagem estufa a 70°C por 24 horas.

TESTE 5: Biomassa sem lavagem foi colocada para secar em estufa a 70°C.

As biomassas sisal obtidas após os testes de pré-tratamento, descritos anteriormente, estão ilustradas na Figura 16.

Figura 16 – Biomassas sisal obtidas após os testes de pré-tratamento.



Fonte: Autora (2017).

O tratamento escolhido para a realização dos experimentos de leito diferencial foi o teste 1. No qual consiste em aquecer a água em um béquer até uma temperatura de 50°C (Figura 17a), acrescentar a biomassa sisal e aguardar 10 minutos (Figura 17b) para, em seguida peneirar a mistura água/sisal e retirar toda água existente. Por fim, levou-se a biomassa para a estufa a uma temperatura de 70°C (Figura 17c) por 24 horas para remoção da água ainda existente.

Figura 17 - Aquecimento da água da rede pública a 50°C (a); Determinação da temperatura da mistura água/sisal (b); Aquecimento do sisal em estufa a 70°C por 24 horas para a remoção de água (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora (2017).

3.2.6 Leito Diferencial

A metodologia para o processo de adsorção em leito diferencial consistiu em adicionar 4000 mL (4 L) da mistura heterogênea água/gasolina ao recipiente retangular de vidro (Figura 18a). Posteriormente foi acrescentado o sisal particulado à tela de alumínio (Figura 18b) formando um leito com uma camada de espessura igual a 3 mm.

Figura 18 - Recipiente retangular de vidro com a mistura heterogênea água/gasolina (a); Tela de alumínio com camada de biomassa sisal de espessura 3 mm (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2017).

Por fim, a tela de alumínio com a camada de biomassa sisal foi sobreposta ao reservatório retangular de vidro (Figura 19), para que a biomassa sisal e a mistura água/gasolina ficassem em contato físico direto, permanecendo por tempos pré-estabelecidos variando de 5 a 120 min. Os experimentos foram realizados em triplicata, com percentuais do contaminante gasolina iguais a 5; 7,5 e 10% em relação ao total da mistura heterogênea.

Figura 19 - Tela com sisal imersa no reservatório de vidro simulando um corpo aquático contaminado com gasolina (sistema completo).



Fonte: Autora (2017).

Ao final dos tempos de contato, sistema de tela de alumínio foi retirado para que fosse separada a fase líquida da biomassa. A separação da água e da gasolina foi realizada por meio de um funil (Figura 20) e por fim, foi possível mensurar a quantidade adsorvida do adsorbato gasolina em relação ao adsorvente sisal com pré-tratamento, por análise volumétrica com proveta.

Figura 20 -Separação do sistema água/gasolina por meio da diferença de densidade, em funil de decantação.



Fonte: Autora (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO SISAL

Os resultados da análise físico-química sisal, para a caracterização física e química estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros físicos e químicos analisados para a mucilagem do sisal.

COMPONENTES ANALISADOS EM 100% DA MATÉRIA SECA							
AMOSTRA	FDN¹	FDA²	PIDN³	PIDA⁴	LIG⁵	CEL⁶	HEM⁷
Mucilagem de sisal	28,18	22,04	1,97	0,52	88,09	13,95	6,14

¹Fibra em Detergente Neutro; ²Fibra em Detergente Ácido; ³Proteína Insolúvel em Detergente Neutro; ⁴Proteína Insolúvel em Detergente Ácido; ⁵Lignina; ⁶Celulose; ⁷Hemicelulose.

Fonte: Autora (2017).

Os materiais lignocelulósicos são denominados, de fibras e constituídos por macro e microcomponentes. Os macrocomponentes que nos interessam, nesse estudo, por suas estruturas e grupos funcionais serem responsáveis pela interação com o poluente, são: celulose, lignina e hemicelulose.

A celulose é hidrofílica e contém grupos hidroxila que estabelecem interações do tipo ligações de hidrogênio intermolecular. Devido a essas ligações de hidrogênio, há uma forte tendência da celulose formar cristais que a tornam completamente insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos (SILVA *et al.*, 2009).

A hemicelulose, diferentemente da celulose, apresenta cadeias moleculares curtas e ramificadas, dando origem somente a arranjos amorfos e, portanto, menos resistentes ao ataque de reagentes químicos (BRUM, 2007). O teor e a proporção dos diferentes componentes encontrados nas hemiceluloses de madeira variam com a espécie e, provavelmente, também de fibra para fibra (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A lignina é organofílica e está associada com a celulose e a hemicelulose na composição de materiais lignocelulósicos, atuando como o cimento das plantas, fornecendo rigidez e dureza.

4.2 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A cinética de adsorção é expressa como a taxa de remoção do adsorbato (adsorvato) na fase fluida em relação ao tempo, envolvendo a transferência de massa de um ou mais componentes contidos em uma massa líquida externa para o interior da partícula do adsorvente, os quais deverão migrar através dos macroporos até as regiões mais interiores desta partícula (NASCIMENTO *et al.*, 2014). É o primeiro processo que indica o poder adsorptivo do adsorvente em contato com o contaminante a ser removido.

Corroborando com Moraes (2005) pode-se afirmar que a influência da relação volume de gasolina por grama de biomassa na quantidade adsorvida de contaminante ocorre devido ao fato da maior proporção de gasolina possibilitar um maior contato entre a gasolina e a biomassa, vencendo a concorrência com a água, a qual também é adsorvida pela biomassa.

É importante ressaltar que o adsorbato utilizado, a gasolina comum brasileira, contém uma concentração significativa de álcool anidro, como relatou o ministro de Minas e Energia Eduardo Braga, em março de 2015, destacando o aumento de 25 para 27% do percentual de etanol anidro na mistura da gasolina. O acréscimo desse valor proporciona uma elevação na quantidade de água no sistema estudado, visto que o volume final da água aumentará significativamente na análise volumétrica. Isto ocorre porque o álcool contido na gasolina dissolve-se na água, pois suas moléculas apresentam características polares semelhantes às da água.

Para o conhecimento da afinidade adsorptiva entre a biomassa sisal e o contaminante gasolina, presente no corpo aquático sintético, foram realizados experimentos para três razões, nas proporções adsorbato/adsorvente iguais a 7; 10 e 13. Sendo estas razões, respectivamente, 8,4 mL de gasolina por 1,2 g de biomassa igual a 7 (Figura 21); 12 mL de gasolina por 1,2 g de biomassa igual a 10 (Figura 22); 15,6 mL de gasolina por 1,2 g de biomassa igual a 13 (Figura 23). Em todos os experimentos foram utilizados 40 mL de água.

Nas Figuras 21, 22 e 23 estão apresentadas as curvas cinéticas de adsorção de gasolina dispersa em água, usando sisal como biomassa adsorvente.

Figura 21- Curva da cinética de adsorção da água contaminada com gasolina em contato com sisal, para a relação igual a 7.

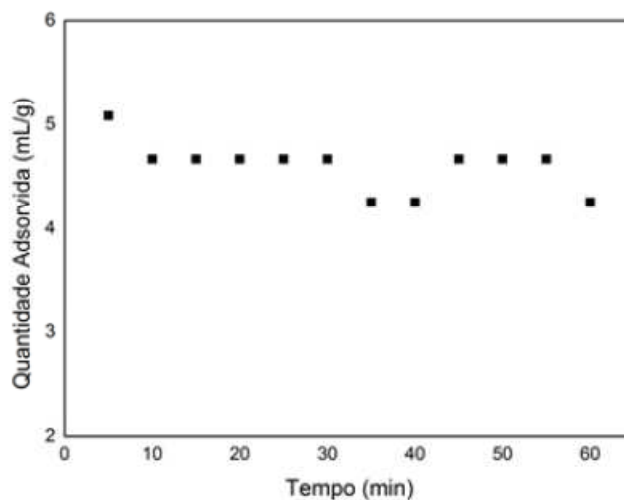


Figura 22 - Curva da cinética de adsorção da água contaminada com gasolina em contato com sisal, para a relação igual a 10.

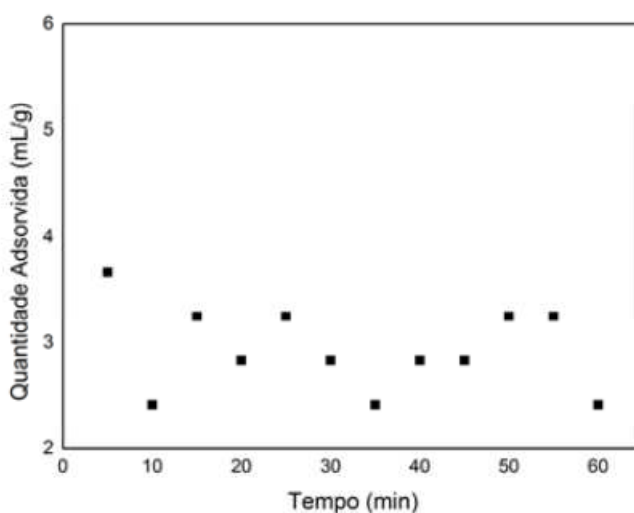
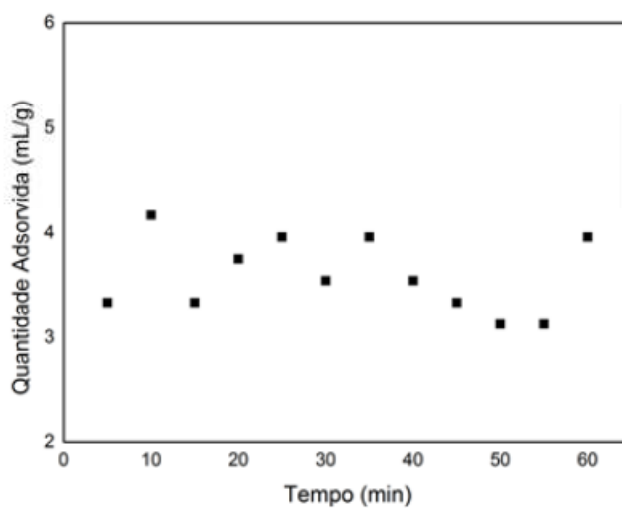


Figura 23 - Curva da cinética de adsorção da água contaminada com gasolina em contato com sisal, para a relação igual a 13.



Os resultados experimentais obtidos para as curvas cinéticas, para as proporções adsorbato/adsorvente iguais a 7; 10 e 13, apresentaram valores que evidenciaram, em todos os casos estudados, que a cinética de adsorção foi muito rápida, tendo início nos primeiros 4 minutos e a quantidade média de gasolina adsorvida foi de 5,5; 3,5 e 4,0 mL por grama de biomassa, para as proporções 7, 10 e 13, respectivamente. Nesses experimentos a biomassa sisal utilizada não passou por nenhum pré-tratamento, apresentando ao fim dos experimentos uma emulsão que dificultou a quantificação volumétrica.

Morais (2005) destacou em seu trabalho que as curvas para cinética de adsorção, utilizando o sistema hidrocarbonetos/bagaço de cana-de-açúcar, apresentaram pontos que não obedeceram ao comportamento que se espera para uma cinética de adsorção, pois ilustraram um comportamento de dessorção seguida de nova adsorção, explicada possivelmente pelo fato de que as biomassas também adsorvem água, o que pode deslocar os hidrocarbonetos.

A capacidade de adsorção do bagaço de cana-de-açúcar para a remoção de derivados do petróleo contaminantes de efluentes também foi analisada por Santos *et al.* (2008), em sua forma seca. Os reagentes químicos utilizados para simular o efluente contaminado com produtos orgânicos foram os hidrocarbonetos hexano, heptano e iso-octano. As curvas para cinética de adsorção dos hidrocarbonetos ilustraram que a cinética foi muito rápida.

Lima (2013) desenvolveu um estudo da capacidade de adsorção da biomassa mandacaru de dois Estados do Brasil, Rio Grande do Norte (RN) e Paraíba (PB), como adsorvente do contaminante orgânico gasolina, presente em efluente contaminado simulado. A cinética de adsorção foi bastante rápida, tendo início após 5 minutos do contato mandacaru/gasolina para as três quantidades de mandacaru dos Estados do RN e PB. A autora destacou que as oscilações observadas nas quantidades adsorvidas de gasolina podem ter ocorrido devido à adsorção de água pela biomassa mandacaru, provocando um deslocamento do adsorbato utilizado, conforme observado por Morais (2005).

Lima (2015) utilizou a técnica de adsorção para estudar o poder adsortivo da biomassa palma forrageira (*Opuntia ficus*) com casca e sem casca, com o objetivo de remover óleo lubrificante presente nas águas de descarte de lava-jatos automotivos. A cinética de adsorção para a biomassa com casca foi rápida, apesar da quantidade de mistura água/óleo lubrificante adsorvida não ter sido elevada. Nos tempos de

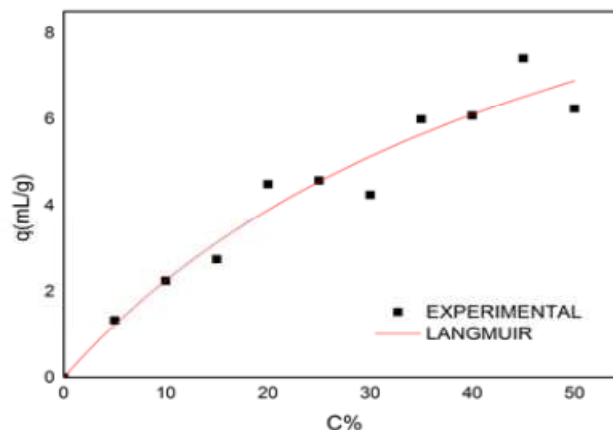
contato de 15 e 40 minutos foram alcançados os maiores valores de adsorção do contaminante (cerca de 50%). Com relação à biomassa sem casca, observou-se que a cinética de adsorção também foi rápida, com a eficiência adsortiva sendo maior nos primeiros minutos do experimento. A maior quantidade de óleo adsorvido ocorreu em 15 minutos. A partir deste tempo, a capacidade adsortiva da palma forrageira apresentou decréscimos significativos. A autora atribuiu a diminuição da eficiência adsortiva da biomassa sem casca a tempos mais altos, à possível saturação da palma devido ao maior tempo de contato.

Com o objetivo de buscar formas alternativas para o aproveitamento do resíduo gerado na produção de cerveja, utilizando-o como biomassa seca para adsorção de compostos orgânicos, Amorim (2016) avaliou a cinética de adsorção e observou que o comportamento da curva cinética descreveu que o bagaço adsorveu de forma satisfatória quase 50% do total do seu contaminante.

4.3 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

A determinação experimental das isotermas, juntamente com o estudo da cinética, é a primeira etapa do processo de adsorção para avaliação de um novo sistema adsorbato/adsorvente. A informação obtida por meio da análise de equilíbrio de adsorção é essencial na determinação da quantidade total de adsorvente necessária ao processo de adsorção e dimensionamento dos equipamentos a serem utilizados (NASCIMENTO *et al.*,2014). Na Figura 24 encontra-se representada a isoterma de adsorção para o sistema gasolina/sisal.

Figura 24 - Isoterma de adsorção de gasolina dispersa em água, utilizando sisal como biomassa adsorvente.



Na Figura 24 está ilustrada a isoterma de adsorção de gasolina em contato com a biomassa sisal, com tempo fixo de 60 min. A partir da curva de equilíbrio pode-se observar que a quantidade máxima de contaminante adsorvido foi 7,5mL de gasolina por g de biomassa. A curva foi relativamente ajustada pelo modelo de Langmuir.

Silva *et al.* (2006) desenvolveram o estudo das isotermas de adsorção de hidrocarbonetos em bagaço de cana-de-açúcar, em sua forma natural seca, para purificação de efluentes orgânicos. As isotermas de adsorção foram obtidas à temperatura ambiente utilizando-se um sistema rotatório. Os autores concluíram através do estudo de equilíbrio, que as relações entre as concentrações dos hidrocarbonetos nas isotermas globais, não afetaram consideravelmente a quantidade máxima adsorvida.

Preocupados com os compostos aromáticos presentes em diversas correntes de hidrocarbonetos, diretamente dependentes do petróleo, Luna *et al.* (2008), estudaram a adsorção como alternativa para redução do teor de poliaromáticos de correntes complexas de hidrocarbonetos utilizando materiais nanoporosos. Foram feitas análises para seleção dos melhores adsorventes e o estudo detalhado de adsorção para avaliar a dinâmica em leito fixo, por meio da obtenção das isotermas de adsorção. Os valores encontrados para os carvões ativados da Norit Carbon (AC1 e AC2) confirmaram a elevada capacidade de adsorção desses materiais.

Lima (2013), estudando a capacidade de adsorção da biomassa mandacaru de dois estados do Brasil (RN e PB) como adsorvente do contaminante orgânico gasolina, presente em efluente contaminado simulado, destacou por meios de resultados experimentais, que as isotermas de equilíbrio apresentaram tendência a forma côncava, indicando que são bastante favoráveis ao processo de adsorção, possibilitando obter alta capacidade de remoção de gasolina mesmo em condições de baixa concentração de adsorbato.

Em estudo realizado com a palma forrageira (*Opuntia ficus*) com e sem casca, com o objetivo de remover o óleo lubrificante contaminado presente nas águas de descarte de lava-jatos automotivos, Lima (2015) observou que o equilíbrio foi alcançado com valores de volume de óleo na biomassa próximos entre si, mas com quantidades baixas de contaminante adsorvido. Com relação à palma forrageira sem casca, observou-se o mesmo comportamento da espécie com casca, com o equilíbrio ocorrendo a baixos teores de óleo adsorvido.

4.4 PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA SISAL NA FORMA PARTICULADO

Devido a formação de uma emulsão na mistura água/gasolina/sisal (Figura 25) que dificultou a quantificação volumétrica do valor do contaminante adsorvido, a biomassa sisal recebeu um pré-tratamento térmico para que seus sítios fossem abertos, com o objetivo de alterar a estrutura da biomassa lignocelulósica tornando os grupos hidroxila (OH) da celulose mais acessíveis, além de remover lignina e hemicelulose. Desta forma, a remoção parcial ou total dos materiais que atuam como “cimentos” na fibra (lignina, pectina e hemicelulose) foi a alternativa para que aumentasse o poder adsorativo do sisal.

Figura 25 - Experimento com o sisal anterior ao pré-tratamento.



Fonte: Autora (2017).

Após o pré-tratamento térmico pode-se observar que a emulsão originada pelo contato do sisal com a água e a gasolina inicialmente foi quebrada e a pigmentação do conjunto tornou-se mais clara, mas no decorrer dos experimentos essa emulsão voltou a aparecer, mesmo que em pequenas quantidades. Tal resultado foi corroborado com Santos e Fernandes (2014), que a temperatura de 70°C foi insuficiente para que houvesse uma abertura de poros total da biomassa sisal ideal para o adsorvente.

Na Figura 26 encontra-se ilustrado o resultado do experimento relativo a análise volumétrica da biomassa sisal após o pré-tratamento térmico em manta aquecedora a 50°C em água e posterior remoção de água a 70°C em estufa. O estudo da cinética foi realizado em um tempo de 15 min para observar novamente o contato do sisal com a água e a gasolina, a fim de acompanhar o comportamento dos poros.

Figura 26 - Análise volumétrica de um experimento de cinética na biomassa sisal pré-tratada termicamente a 50° em água, e posteriormente levada a estufa para remoção de água a 70°C.

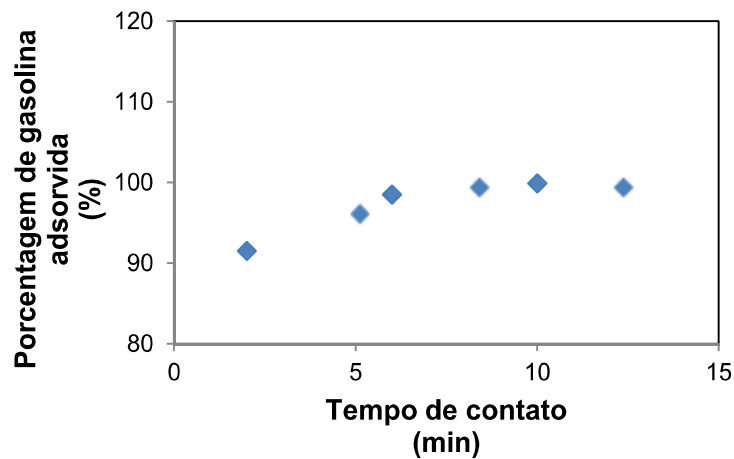


Foto: Autora (2017).

4.5 ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL

O estudo da adsorção em sistema de leito diferencial utilizando 5% de contaminante, que equivale a 200 mL de gasolina, está ilustrado na Figura 27.

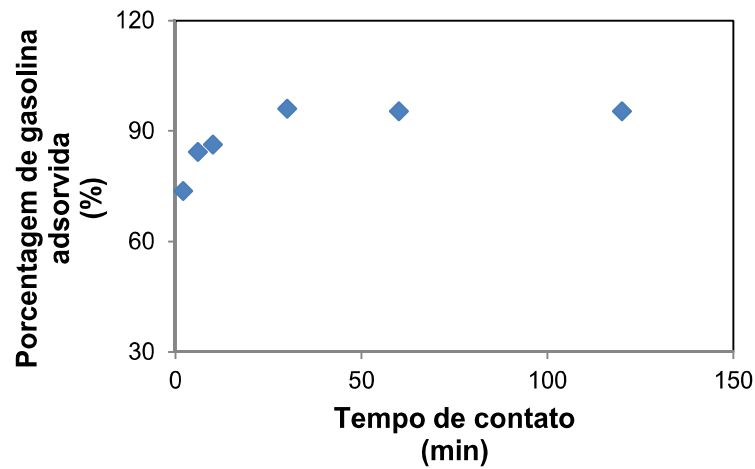
Figura 27 – Porcentagem do contaminante gasolina adsorvida para concentração de gasolina inicial igual a 5%.



O sistema de adsorção em leito diferencial nos primeiros 2 minutos apresentou uma capacidade adsorptiva muito boa em um tempo de contato muito pequeno, em 6 minutos aumentou significativamente e em apenas 10 minutos atingiu 100% de remoção do contaminante gasolina presente no corpo d'água sintético (simulado).

Para o experimento utilizando 7,5% de contaminante, equivalente a 300 mL de gasolina, o resultado encontra-se descrito na curva da Figura 28.

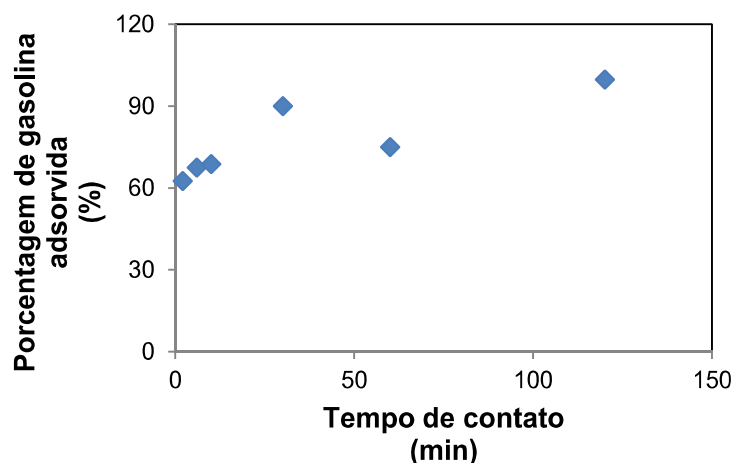
Figura 28 – Porcentagem do contaminante gasolina adsorvido para concentração de gasolina inicial igual a 7,5%.



Os resultados permitiram observar que a espessura de 3 mm de sisal não foi suficiente para que fossem atingidos resultados tão significativos quanto os obtidos para 5%. A partir dos 30 minutos já existia uma estagnação do desempenho adsorativo do sisal.

O terceiro experimento para 10% de contaminante, equivalente a 400 mL de contaminante, está ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Porcentagem do contaminante gasolina adsorvido para concentração de gasolina inicial igual a 10%.



Foi possível observar uma instabilidade da biomassa sisal no tempo acima de 50 minutos. Porém, de maneira geral a quantidade de gasolina adsorvida apresentou valores representativos, entre 60 e 100%, em um pequeno intervalo de tempo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises da cinética de adsorção e isoterma de equilíbrio determinaram o desempenho adsorptivo da biomassa sisal em contato com a gasolina, em corpo aquático sintético, para aplicação em sistema de adsorção em leito diferencial. Os ensaios desenvolvidos utilizaram a biomassa sisal sem pré-tratamento, apresentando ao fim dos experimentos uma emulsão que dificultou a quantificação volumétrica com maior precisão.

Os resultados experimentais obtidos para o estudo da cinética de adsorção para as proporções iguais a 7; 10 e 13 apresentaram valores que evidenciaram, em todos os casos estudados, que a cinética de adsorção foi muito rápida, tendo início nos primeiros 4 minutos com a quantidade média de gasolina adsorvida de 5,5; 3,5 e 4,0 mL por grama de biomassa, respectivamente.

Por meio dos experimentos realizados para obtenção da isoterma de equilíbrio na adsorção do sistema gasolina/biomassa sisal, com tempo fixo de 60 min, a quantidade máxima de contaminante adsorvido foi 7,5 mL de gasolina por g de biomassa. A curva foi relativamente ajustada pelo modelo de Langmuir.

A remoção do contaminante gasolina em corpos d'água utilizando sisal como adsorvente em sistema de adsorção em leito diferencial foi satisfatório, partindo do pressuposto de que a biomassa sisal foi utilizada com um pré-tratamento térmico, com o objetivo de aumentar a abertura dos poros, proporcionando maior contato com o adsorvente.

REFERÊNCIAS

- AL-DEGS, Y.; KHRAISHEH, M.; ALLEN, S.; AHMAD, M.N.M. Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactivedyes from textile effluent. **Water Research**, v. 34, p. 927-935. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135499002006>>. Acessado em 16 de jun. de 2017.
- AMORIM, F. V. **Estudo do poder adsorativo do resíduo gerado na produção de cerveja utilizando sistema em leito diferencial**. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em Química Industrial, Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, Campina Grande, PB, 50 p., 2016.
- ANEEL: **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em:<http://www.fontesenergia.com.br/fontesenergia_publicacoes_trabalhosdepesquisa.aspbrasil>. Acessado em: 16 de jun. de 2017.
- APEEL, C.; MA, L.Q.; RHUE, R.D.; KENNELLEY, E.D. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. **Geoderma**, v. 113, p. 77-93. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article>>. Acessado em: 02 de mai. de 2017.
- BARROS, A. R. B. **Remoção de íons metálicos em água utilizando diversos adsorventes**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 105 p.,2001.
- BERNARDO, B. T. **Estudo de adsorção em leito fixo para o sistema heptano/tolueno/sílica gel usando líquidos iônicos como fase móvel**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica, UNL, Monte de Caparica, Lisboa, 130 p., 2011.
- CALDAS, A. S.; VIANA, Z. C. V.; SANTOS, V. L. C. S. Fibras de Cocos nucifera como sorvente de petróleo em ambiente marinho. **Acta Brasiliensis**, v. 1, n. 1, p. 13-18. Disponível em: <<http://revistas.ufcg.edu.br/actabra/index>>. Acessado em: 06 de abril de 2017.
- CAMPBELL, M. K.; FARRELL, S. O. **Biochemistry, chapter 2, water : the solvent for biochemical reactions**, 6th ed., Thomson books/cole, 40 p., 2009.
- CANILHA, L.; SANTOS, V.T., ROCHA, G.J., ALMEIDA e SILVA, J.B., GIULIETTI M., SILVA, S.S., FELIPE, M.G., FERRAZ, A.; MILAGRES, A.M., CARVALHO, W. A study on the pretreatment of a sugarcane bagasse sample with dilute sulfuric acid. **Journal of Industrial Microbiology Biotechnology**. 38(9):1467-75. doi: 10.1007/s10295-010-0931-2, 2011.
- CARVALHO, E. S. **Reuso do mesocarpo de coco na remoção de contaminantes derivados de petróleo presentes em corpos d'água, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial**. Monografia de Conclusão de Curso (TCC) em Química Industrial, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2014.
- COONEY, D. O. **Adsorption Design for Wastewater Treatment**. USA: Lewis Publishers, 1999.
- COSTA, E. C.; BARBOSA, C. D. A. E. S.; MACHADO, J. A.; GARCIA, C. A. B. Estudo comparativo de adsorção do corante preto *sulphcolor* utilizando o carvão

ativo convencional com o bagaço da cana-de-açúcar *in natura* e tratada quimicamente. **Scientia Plena**, v. 6, n. 12, 2010.

DO, D. D. **Adsorption analysis: equilibria and Kinetics**. London: Imperial College Press, 1998.

FERNANDES, R. **Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 78 p., 2005.

FERREIRA, D. G. **Biorremediação de solo argiloso contaminado com gasolina aditivada com diferentes teores de etanol**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, RJ, 2010.

FLORIDO, P. L. **Tratamento do efluente de refinaria pelo processo combinado de adsorção em carvão ativado e biorreator com membranas**. Tese de Doutorado em Engenharia Química – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

FORTE, E. J.; AZEVEDO, M. S.; OLIVEIRA, R. C.; ALMEIDA, R. Contaminação de aquífero por hidrocarbonetos: estudo de caso na vila tupi, Porto Velho – Rondônia. **Revista Química Nova**, v. 30, n. 7, p. 1539-1544, 2007.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias – Operações de Transferência de Massa**. Editora do Autor, v. 4, São Paulo, SP, 1988.

GURGEL, A. M.; VERAS MEDEIROS, A. C. L.; ALVES, P. C.; SILVA, J. M.; DANTAS GURGEL, I. G.; AUGUSTO, L. G. S. Framework dos cenários de risco no contexto da implantação de uma refinaria de petróleo em Pernambuco. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 14, p. 2027-2038, 2009.

LIMA, A. K. A. **Licenciamento ambiental de atividades potencialmente poluidoras na Paraíba, no ano de 2013**. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 44 p., 2016.

LIMA, L. M. R. **Avaliação de contaminantes orgânicos presentes em efluentes aquosos mediante leito fixo de biomassa em escala ampliada**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, 109 p., 2010.

LIMA, L. M. R.; COSTA, K. J. B.; OLIVEIRA, E. D. C.; OLIVEIRA, E. K. G.; SANTOS, T. C.; SILVA, V. L. M. M. **Utilização do mandacaru (*Cereus jamacaru*) como biomassa adsorvente de gasolina presente em corpos d'água**. 10º Encontro Brasileiro sobre Adsorção (10º EBA), CD-Rom, Guarujá, SP, 2014.

LIMA, L. M. R.; OLIVEIRA, E. D. C.; NEPOMUCENO, T. C.; DINIZ, N. M. R.; SILVA, V. L. M. M.; ALMEIDA, M.M. **Caracterização e uso da mucilagem do sisal (*Agave sisalana*) na adsorção de gasolina em leito diferencial**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (21º COBEQ), Fortaleza, CE, 2016.

LIMA, L. M. R.; TAVARES, D.; OLIVEIRA, F. J. C.; SILVA, J. L. B. C.; MARTINS, T. D. N.; LIMA, L. M. R. **Avaliação do poder adsorptivo da palma forrageira (*Opuntia fícus*) para remoção de contaminantes hidrocarbonados em águas de descarte**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, v. 1, Fortaleza, CE, 2016.

- LUNA, F. M. T.; ARAÚJO, C. C. B.; VELOSO, C. B.; SILVA JR., I. J.; AZEVEDO, D. C. S.; CAVALCANTE JR., C. L. **Determinação dos parâmetros de equilíbrio e transferência de massa da adsorção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em carvões ativados.** 7º Encontro Brasileiro Sobre Adsorção (7º EBA). Campina Grande, PB, 2008.
- MARIANO, J. B. **Impactos ambientais do refino de petróleo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- MORAIS, L. A. **Avaliação da remoção de hidrocarbonetos aromáticos (BTEX) em águas utilizando materiais nano estruturados do tipo Ti-MCM-4.** Dissertação de Mestrado em Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.
- MORAIS, V. L. M. **Purificação de efluentes contaminados com hidrocarbonetos por adsorção em leito fixo de biomassa.** Doutorado em Engenharia de Processos – UFCG, Campina Grande, PB, 104 p., 2005.
- MOREIRA, R. F. P.; HUMBERTO, J. J.; SOARES, J. L. **Isotermas de adsorção de corantes sobre carvão ativado.** II Encontro Brasileiro de Adsorção (II EBA), Florianópolis, SC, pp. 85-91, 2000.
- MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 84 (12), p. 2222-2234, 2002.
- NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S.C. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais.** Imprensa Universitária, Fortaleza, CE, 255 p., 2014.
- NASCIMENTO, R. F.; SOUSA NETO, V. O.; MELO, D. Q; **Uso de bioadsorventes lignocelulósicos na remoção de poluentes de efluentes aquosos.** Imprensa Universitária, Fortaleza, CE, 274 p., 2014.
- OLIVEIRA, R.D. **Aplicação de tratamentos eletroquímicos para remediação de solos (Processos Eletrocinético) e efluentes (Oxidação Eletroquímica) contaminados por petróleo.** Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2016.
- PAGNANELLI, F.; TRIFONI, M.; BEOLCHINI, F.; ESPOSITO, A.; TORO, L.; VEGLIÒ, F. Equilibrium biosorption studies in single and multi-metal systems. **Process Biochemistry**, v. 37, n. 2, p. 115-124. 2001.
- PERIN, P.; PIVA, J. D.; BARROS, S. T. D.; SANTOS, O. A. A. **Remoção do corante reativo azul pela adsorção em carvão ativado.** Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, PR, 2006.
- RADETIC, M.; VESNA, I.; RADOJEVIC, D.; MILADINOVIC, R.; JOCIC, D.; JOVANCIC. Efficiency of recycled wool-based non wovem material for the removal of oils from water. **Chemosphere**, 70(3): 525-530, 2008.
- RUBIO, J; RIBEIRO, T. H.; SMITH, R. W. A dried hydrophobic aquaphyte as an oil filter for oil/ water emulsions. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 8, pp. 483-489, 2003.
- RUTHVEN, D. M. **Adsorption – Theory & Practice.** Fortaleza - CE, 1996.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption & Adsorption Process**. New York, John Wiley & Sons, 1984.

SALAME, I. I.; BAANDORZ, J. T. Role of surface chemistry in adsorption of phenol on activated carbons. **Journal of Colloids and Interface Science**, v. 264, p. 307-312, 2003.

SANTOS, E. G.; SILVA, F. L. H.; ALSINA, O. L. S. **Utilização de biomassas para remoção de contaminantes orgânicos derivados do petróleo em coluna de leito fixo**. 7^o Encontro Brasileiro Sobre Adsorção (7^o EBA), Campina Grande, PB, 2008.

SANTOS, F. A.; COLODETTE J. L.; MANFREDI, M.; QUEIROZ, J. H.; QUEIROZ, M. E. L. R.; CALDAS, C. S.; SOARES, F. E. F. Optimization of hydrothermal pretreatment of cane sugar straw for cellulosic ethanol production. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 56-62, 2014.

SILVA, A. T. **Influência da temperatura na adsorção do corante azul de metileno utilizando serragem de *Pinus elliottii* como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis**. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

SILVA, O. R. R. F.; CARTAXO, W. V.; SILVA, J. C. A.; ALVES, I. **Sisal com tecnologia Embrapa para a geração de emprego e renda na agricultura familiar do Nordeste**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2011. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/foldercultivares-de-sisal-da-embrapa-algodao>> Acessado em: 10 de maio de 2017

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Revista Química Nova**, v. 32, n. 3, p.661-671,2009.

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S.; ABREU, C. A. M. **Isotermas de equilíbrio para a adsorção de hidrocarbonetos em bagaço de cana-de-açúcar**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (XVI COBEQ), Santos, SP, 2006.

SILVA, V. L. M. M.; COSTA, K. J. B.; OLIVEIRA, E. D. C.; OLIVEIRA, E. K. G.; SANTOS, T. C.; LIMA, L. M. R. **Adsorção de contaminantes derivados do petróleo utilizando mandacaru (*Cereus jamacaru*) como biomassa adsorvente**. 10^o Encontro Brasileiro sobre Adsorção (10^o EBA), CD-Rom, Guarujá, SP, 2014.

SION, A.; PELUCI, G.; DUTRA, M. C. Responsabilidade e consequências dos acidentes ambientais por vazamento de óleo. **Revista Petróleo & Energia**, 27^a ed., 2014.

SOUZA, R. S.; LIMA, L. M. R.; SILVA; V. L. M. M. Adsorção de óleo diesel em sistema de leito diferencial com biomassa bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos - REMAP**, v. 6, p. 123-126, 2011.

STEPHANIDIS, S.; NITSOSC, C.; KALOGIANNISA, K.; ILIOPOULOUA, E.F.; LAPPASA, A.A.; TRIANTAFYLLIDIS, K.S. Catalytic upgrading of lignocellulosic biomass pyrolysis vapours: Effect of hydrothermal pre-treatment of biomass. **CatalysisToday**, v.167, p. 37–45, 2011.

TAGLIAFERRO, G. V.; PEREIRA, P. H. F.; RODRIGUES, L. A.; SILVA, M. L. C. P. Adsorção de chumbo, cádmio e prata em óxido de nióbio (v) hidratado preparado

pelo método da precipitação em solução homogênea. **Revista Química Nova**, v. 34, n. 1, p. 101-105, 2017.

TAVARES, J. K. **Remoção de compostos BTEX de soluções aquosas por adsorção**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 91 p., 2007.

VAUGHAN, T., SEO C.W., MARSHALL W.E. Removal of selected metal ions from aqueous solution using modified corncobs. **Bioresource Technology**. v.78: p.133-139, 2001.

YAMAURA, M.; COSTA, C. H.; COTRIM, M. E. B.; PIRES, M. A. F. Avaliação de um resíduo agroindustrial como biossorvente para remoção de íons Ni^{2+} . In: **Safety, Health and Environmental World Congress - SHEWC2008**, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

enghariae arquitetura.com.br. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/exploracao-extracao-petroleo.htm>. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://engharia-quimica.blogspot.com.br/2012/06/sobre-as-4-familias-de-moleculas-que.html>. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-e-derivados2/petroleo>. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://www.google.com.br/search.acidente.de.petróleo+infoteca.cnptia.embrapa.br>. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://hoje.vc/un7q>. Acessado em: 05 de maio de 2017. Acessado em: 05 de maio de 2017.

<http://www.valor.com.br/brasil/3937764/percentual-de-alcool-na-gasolina-subira-para-27-no-dia-16-de-marco>. Acessado em: 05 de maio de 2017.

wildmadagascar.org/images/sisal. Acessado em: 05 de maio de 2017.