



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

Giuliano Brito Zanardi

OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO COM BIOFILME PARA REMOÇÃO
DE CORANTES DE EFLUENTES TÊXTEIS

Trabalho de Conclusão de Curso

Brasília – DF

2º/2015



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE QUÍMICA

Giuliano Brito Zanardi

OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO COM BIOFILME PARA REMOÇÃO
DE CORANTES DE EFLUENTES TÊXTEIS

Trabalho de conclusão de curso em Química Tecnológica apresentado ao Instituto de Química da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientadora: Profa. Andressa Regina Vasques Mendonça

Co-orientadora: Profa. Tatiana Amabile de Campos

2º/2015

Epígrafe

“Os elementos químicos doam uma de suas partículas, o Elétron, para outros elementos químicos, ficando com cargas positivas. Assim também são as pessoas: toda vez que doamos parte de nós a alguém, ficamos satisfeitos com a felicidade alheia. Isto caracteriza a mais pura e plena filantropia.”

Daniel Melgaço

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Valquíria, que me apoiou durante toda a minha jornada, não somente acadêmica, mas tudo que me levou até aqui.

À minha namorada, Luísa, por me encorajar quando as coisas ficaram difíceis e por todo carinho, amor e compaixão, pois tudo que faço hoje é por ela e por nós.

Aos colegas que tive durante todos esses anos de curso, cada um foi especial da sua maneira. Em especial à Isadora Puga, que me ajudou a conseguir um projeto e forneceu meu material inicial e material para leitura, ao Mateus Almeida, que me ajudou com a preparação do meu material e ao Gustavo Paiva, que foi um grande companheiro durante toda a minha jornada acadêmica e me ajudou muito com o projeto, dando continuidade a ele a partir de agora. Ao pessoal do LDPQ, principalmente o Paulo Lago, que mesmo com o próprio projeto, reservava um tempo para me auxiliar. Ao pessoal do LAMP, principalmente o Luís Janssen, que dedicou muito tempo livre dele para me ajudar no projeto também. Ao pessoal do LMC, principalmente a Betânia, que me ajudou com muitas análises mais complexas.

Aos professores que auxiliaram na minha formação, ao professor Leonardo Paterno, por fazer parte dessa banca, ao professor Fabio Moreira, que mesmo sem ter nenhum envolvimento inicialmente, me ajudou em todo o decorrer desse projeto e aceitou também fazer parte da banca, à professora Tatiana Amabile, por ter aceitado me ajudar com esse projeto, e mesmo mal me conhecendo, abriu as portas do Instituto de Biologia e do laboratório dela pra mim, e especialmente à professora Andressa Vasques, que sempre acreditou em mim, e me ajudou muito, sem ela, nada disso seria possível.

Sumário

Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Equações	x
1. Introdução	12
2. Objetivos	14
2.1. Gerais	14
2.2. Específicos	14
3. Revisão da Literatura	15
3.1. Reaproveitamento de Resíduos Agroindustriais	15
3.1.1. O Jatobá	15
3.2. Adsorção com Carvão Ativado	16
3.2.1. Remoção de Corantes por Adsorção	17
3.3. Biofilme	18
3.3.1. Bioadsorção	19
3.3.2. Biofiltro Aerado Submerso	20
4. Metodologia	21
4.1. Pirólise	24
4.2. Caracterização do Material Adsorvente	25
4.2.1. Análise BET	25
4.2.2. Obtenção da Cinética e Isotherma de Adsorção	25

4.3.	Formação de Biofilme.....	26
4.4.	Colunas de Adsorção de Leito Fixo.....	28
4.4.1.	Perda de Carga.....	30
4.4.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	35
4.4.3.	Carbono Orgânico Dissolvido.....	36
5.	Resultados e Discussão.....	37
5.1.	Teor de Umidade.....	37
5.2.	Granulometria.....	37
5.3.	Caracterização do Carvão Ativado.....	38
5.3.1.	Área Superficial.....	38
5.3.2.	Cinética de Adsorção.....	38
5.3.3.	Isoterma.....	39
5.4.	Biofilme.....	40
5.4.1.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	41
5.5.	Colunas de Adsorção de Leito Fixo.....	41
5.5.1.	Curva de Ruptura.....	41
5.5.2.	Dimensionamento de Coluna e Cálculo da Perda de carga.....	43
5.5.3.	Carbono Orgânico Dissolvido.....	44
6.	Conclusão.....	46
7.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	47

Referências.....	48
Anexos.....	50
Anexo I: Memorial de Cálculos.....	51
Teor de Umidade.....	51
Propriedades do Carvão.....	51
Perda de Carga.....	52
<i>Scale Up</i>.....	53

Lista de Tabelas

Tabela 1: Componentes e concentrações presentes na solução alimento.....	27
Tabela 2: Cronograma de crescimento e adesão dos microrganismos à matriz adsorvente.....	28
Tabela 3: Caracterização do Corante RR2 por VASQUES, (2008).....	29
Tabela 4: Cálculo do teor de umidade da casca de jatobá.....	37
Tabela 5: Dados do experimento de cinética de adsorção.....	38
Tabela 6: Resultados da isoterma.....	39
Tabela 7: Resultados dos cálculos de dimensionamento de coluna e perda de carga.....	44

Lista de Figuras

Figura 1: Estrutura física de um carvão ativado.....	17
Figura 2: Fluxograma metodológico de trabalho.....	21
Figura 3: Moedor Arbel utilizado na moagem das cascas do fruto do jatobá.....	23
Figura 4: Mufla da EDG Equipamentos utilizada para a pirólise.....	25
Figura 5: Esquema de colunas de adsorção com carvão ativado e carvão ativado com biofilme.....	30
Figura 6: Gráfico de cinética de adsorção.....	39
Figura 7: Reatores biológicos em um misturador com água a 30°C.....	40
Figura 8: (A) Superfície do carvão ativado sem biofilme (Ampliação 1000x), (B) Biofilme formado após 10 dias de cultura (Ampliação 500x), (C) Biofilme formado após 18 dias de cultura (Ampliação 500x).....	41
Figura 9: Curva de breakthrough da coluna com carvão ativado com biofilme (A), curva de breakthrough da coluna com carvão ativado (B).....	45
Figura 10: Gráfico de remoção de COD.....	47

Lista de Equações

Equação 1: Cálculo do teor de umidade.....	22
Equação 2: Cálculo do valor da capacidade de troca iônica.....	31
Equação 3: Cálculo da densidade aparente do leito.....	31
Equação 4: Cálculo da densidade do líquido de trabalho.....	31
Equação 5: Cálculo da densidade aparente do carvão.....	32
Equação 6: Cálculo da porosidade do leito.....	32
Equação 7: Cálculo da vazão de trabalho teórica.....	32
Equação 8: Cálculo da massa de corante.....	33
Equação 9: Cálculo da massa de carvão.....	33
Equação 10: Cálculo do volume de carvão.....	33
Equação 11: Cálculo da área de seção transversal da coluna de troca iônica.....	33
Equação 12: Cálculo do raio da coluna de troca iônica.....	34
Equação 13: Cálculo da velocidade superficial de massa.....	34
Equação 14: Cálculo do número de Reynolds.....	34
Equação 15: Cálculo da perda de carga.....	35

Resumo

O jatobá (*Hymenaea courbaril*) é uma árvore nativa da região do cerrado, e seus insumos, como madeira e fruto, possuem várias aplicações, mas as cascas ainda são consideradas como resíduo. Visando sustentabilidade e redução de resíduos, esse trabalho teve como objetivo reutilizar essas cascas na forma de um biofiltro de carvão ativado. Para isso, as cascas foram pirolisadas a 700°C por uma hora, para a produção do carvão, em seguida testes de adsorção foram realizados. Para melhorar o processo de remoção de corante da solução, foi cultivado um biofilme na superfície desse carvão. Os microrganismos auxiliam na remoção, degradando o corante presente no meio. Os resultados de remoção foram comparados utilizando-se duas colunas, uma preenchida com o material adsorvente e outra com o bioadsorvente. A coluna com bioadsorvente apresentou uma capacidade de remoção de corante de 2,39 % a 20,51 % a mais quando comparada à coluna contendo somente carvão ativado sem a presença do biofilme.

Palavras-chave: Carvão ativado, Bioadsorção, Adsorção em leito fixo, Biofilme

1. Introdução

A indústria têxtil do Brasil figura hoje entre as dez maiores do mundo, com um crescimento de 90% na última década para competir com o contínuo aumento das indústrias internacionais no país, mas essa indústria também merece atenção devido à grande quantidade de efluentes gerados e a consequente contaminação ambiental, devido à grande quantidade de corantes presentes nesses efluentes. A resolução nº430 de 2011 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) ^[1] define que os efluentes não podem causar efeitos tóxicos a organismos aquáticos e, dependendo da classe do corpo receptor, não pode conferir toxicidade ao mesmo. Mas esses corantes não só causam poluição visual, como também existem alguns que podem causar efeitos carcinogênicos e mutagênicos. ^[2]

Logo, esses efluentes devem ser tratados, e os tratamentos físico-químicos convencionais já foram provados pouco eficientes na remoção de moléculas de baixo peso molecular, então métodos biológicos vêm sendo estudados para que combinados com os métodos físico-químicos, apresentem resultados mais satisfatórios, como a formação de biofilmes em superfícies adsorventes, onde os corantes adsorvidos são decompostos pelos microrganismos do biofilme em produtos mais simples e não tóxicos. ^[2]

Biofilme são microrganismos aderidos à uma superfície. A formação de biofilme é um processo natural, onde microrganismos se aderem a superfícies sólidas que estejam em contato com a água, e se formam devido à segurança e estabilidade, pois esses biofilmes tem alta resistência às forças físicas e a mudanças de pH e temperatura. Os seres vivos presentes nessa estrutura vivem em comunidade, como um único ser, compartilhando nutrientes. ^[3]

Em meio a efluentes, como o citado anteriormente da indústria têxtil, essa colônia de microrganismos pode se alimentar de produtos tóxicos presentes no meio e são ideais para tratamento desses efluentes, pois é um método barato e menos danoso ao meio ambiente.

Tendo isso como base, esse trabalho visou a criação de microrganismos em uma matriz adsorvente de leito fixo para bioadsorção de corantes têxteis. Para isso, foi realizada uma pirolise parcial de nosso produto inicial, onde as cascas do fruto de jatobá foram pirolisadas, em diferentes temperaturas, para obter o adsorvente, e em seguida, o adsorvente com melhor potencial de remoção foi adicionado em um meio contendo nutrientes e microrganismos, para que fosse iniciada a criação do biofilme. Para verificar a eficiência do processo, duas colunas de leito fixo, uma com o carvão ativado e outra com carvão ativado com biofilme foram montadas e curvas de ruptura foram obtidas. Os resultados foram então comparados em termos de remoção de cor e remoção de carbono orgânico dissolvido. Após obtenção desses resultados, calculou-se a perda de carga nas colunas de adsorção, parâmetro importante no dimensionamento das plantas industriais de adsorção. ^[4]

2. Objetivos

2.1. Gerais

Utilizando matéria-prima do cerrado, criar uma superfície adsorvente ativada e cultivar microrganismos para promover a degradação em leito fixo de matéria orgânica para utilização em filtração.

2.2. Específicos

- Caracterizar a biomassa (cascas do fruto do jatobá) por massa seca e granulometria.
- Ativar termicamente a biomassa por meio do processo de pirolise parcial para obtenção de carvão ativado que servirá de suporte para o crescimento dos microrganismos (formação do biofilme).
- Imobilizar e adaptar a biomassa aeróbia ao sistema.
- Avaliar o processo de bioadsorção em coluna de leito fixo por meio de análise de carbono orgânico dissolvido.
- Obter uma curva característica de biodegradação/adsorção visando avaliar a eficiência do adsorvente na remoção do composto orgânico (corante reativo têxtil RR2).
- Verificar a formação de biofilme formado sobre a matriz sólida adsorvente por meio de análises MEV (microscopia eletrônica de varredura).

3. Revisão da Literatura

3.1. Reaproveitamento de Resíduos Agroindustriais

A agroindústria sem dúvida tem trazido um grande avanço para o desenvolvimento, mas a crescente quantidade de resíduos gerada não tem uma destinação propícia, sendo cascas, folhas e sementes considerados como lixo e são descartados sem que se tenha um aproveitamento concreto de todas as propriedades que esses materiais ainda podem oferecer.

Resíduos agroindustriais são todos aqueles provenientes da prática agrícola destinada às indústrias, tanto grande como de pequeno porte em comunidades agropecuárias, como folhas, raízes, cascas, talos, sementes, palhas, etc. Esses resíduos possuem potencial econômico e podem ser reutilizados para finalidades muito além daquelas do produto inicial, e essa biomassa pode ser convertida na geração de combustíveis, energia, entre outros. Assim, é possível a utilização da casca do jatobá como precursor promissor na obtenção de material adsorvente. ^[5]

3.1.1. O Jatobá

O jatobá (*Hymenaea courbaril*) é uma árvore muito utilizada na recuperação de áreas devastadas, principalmente pelo fato de que muito animais parecem preferir criar suas moradias nessa árvore, mas ao mesmo tempo, ela apresenta muitos outros usos, como extração da madeira, arborização urbana, usos na medicina e claro, alimentação, já que possui um fruto muito rico em nutrientes. A madeira do jatobá é muito utilizada na fabricação de carvão vegetal, devido a sua alta capacidade calorífica. Contudo, a casca do fruto do jatobá era descartada como lixo, até recentes trabalhos sobre uma forma de melhor utilizar essa casca. A casca do fruto do jatobá representa cerca de 50% do peso

total desse fruto, gerando uma enorme quantidade de resíduos, que podem ser utilizados na extração de óleos com aplicação na indústria farmacêutica e de cosméticos, como também para criação de carvão vegetal e carvão ativado para filtração por adsorção. [5]

3.2. Adsorção com Carvão Ativado

O processo de adsorção ocorre, pois, o número de coordenação dos átomos da superfície é inferior ao dos átomos internos. Os átomos da superfície apresentam uma força resultante para dentro que deve ser balanceada, ou seja, na direção normal à superfície, assim as moléculas adsorvidas sobre uma superfície são mantidas por forças que provêm desta superfície. A tendência a neutralizar este tipo de ação, gera uma energia superficial, a qual é responsável pelos fenômenos de adsorção. Esse processo pode ser físico ou químico, dependendo do tipo de ligação gerada por essa energia. Se a energia de ligação é fraca, da ordem de forças de van der Waals, a adsorção é considerada física, tipo esse que pode gerar camadas moleculares sobrepostas, mas se a energia é mais forte, como por exemplo o sólido é iônico e a molécula que se deseja adsorver é polarizável, é uma adsorção química, que tem por característica a formação de uma monocamada molecular. [6]

Carvão ativado é todo material carbonoso poroso, obtido por processos de queima, que sofreram processos para o aumento de sua porosidade interna. A capacidade adsorptiva de um carvão depende da sua área superficial, tamanho e distribuição dos poros, material usado na fabricação e processo utilizado na ativação. Diversas variáveis devem ser observadas no processo de adsorção, como a afinidade com o material a ser adsorvido, pH do meio, tempo de contato e quantidades de adsorvente e adsorbato. [6][7][8]

O carvão ativado é um material que apresenta características propícias para a implementação em escala industrial, pois possui alta capacidade de adsorção, baixa

reatividade térmica, resistência a grandes variações de pH no meio e capacidade de regeneração, mas ainda é um material caro, por isso tem-se feito estudos sobre a capacidade de adsorção de materiais naturais e de fácil acesso, como resíduos da agroindústria que são descartados como lixo. [6][9]

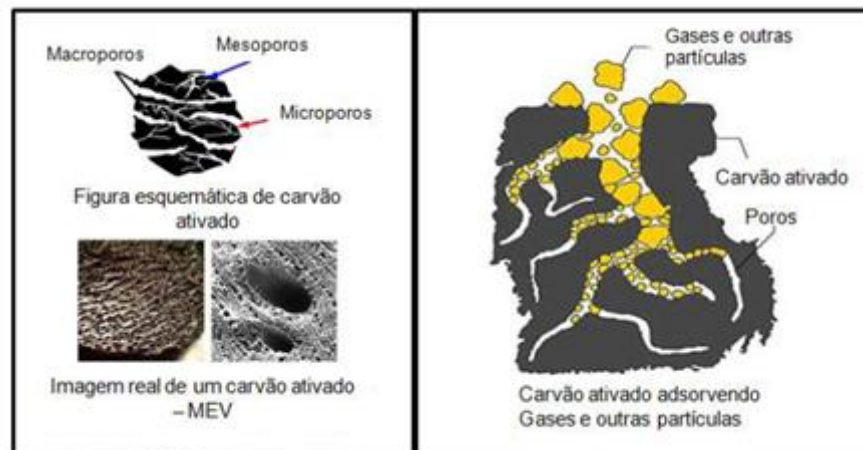


Figura 1: Estrutura física de um carvão ativado [10]

3.2.1. Remoção de Corantes por Adsorção

A remoção dos corantes presentes nos efluentes tem sido um desafio para a indústria têxtil, devido à grande quantidade de água utilizada em seus processos, que devem ser reduzidos total ou parcialmente após o tratamento. Mesmo com a existência de diversos processos de tratamento, a maioria não é tão eficaz em realizar a desmineralização de efluentes coloridos, devido à sua complexidade. Os corantes presentes nesses efluentes normalmente são recalcitrantes ou apresentam uma cinética de degradação biológica muito lenta. Os efluentes tratados ainda apresentam uma coloração muito intensa, o que influencia na estética, transparência da água e solubilidade de gases nos corpos receptores, reduzindo assim a capacidade de regeneração de corpos hídricos.

A grande variedade e complexidade desses compostos, aliada às imposições da legislação, tem gerado uma busca de métodos alternativos e mais eficazes no tratamento

para destruir ou imobilizar esses compostos orgânicos tóxicos, considerando custos, eficiência dos processos, destoxificação e reaproveitamento de águas de efluentes industriais. A adsorção é um método alternativo no tratamento de efluentes contendo corantes, pois faz uso de materiais com alta capacidade adsortiva, como o carvão ativado. [9]

Nesse contexto, o processo de tratamento de efluentes contendo corantes por adsorção com carvão ativado tem se mostrado um método eficaz de tratamento para remoção de cor. A adsorção funciona por um processo de transferência do adsorbato (corante) e a superfície sólida do leito (carvão). Nesse processo, o soluto é atraído para a superfície do adsorvente por meio de forças atrativas não compensadas. Essa transferência é influenciada pela estrutura do meio poroso e também pela estrutura do soluto. O processo de adsorção supera os outros em termos de custo inicial, facilidade de operação e por ser inerte às substâncias tóxicas. A eficiência no processo de adsorção pode ser melhorada quando há a presença de microrganismos aderidos à superfície do carvão, ou seja, quando há a presença de biofilme sobre a superfície do material adsorvente [7]

3.3. Biofilme

Biofilme é um aglomerado de microrganismos aderidos à uma superfície por meio de polissacarídeos excretados pela célula. A formação de biofilme é um processo natural, onde microrganismos se aderem a superfícies sólidas que estejam em contato com a água, e a razão da formação dessa estrutura é a segurança e estabilidade, pois essa estrutura polissacarídica apresenta alta resistência às forças físicas e a mudanças de pH e temperatura. As células presentes nesse biofilme vivem em comunidade umas com as outras, quase como um único ser, pois a composição e propriedades físico-químicas do biofilme são constantes ao longo de toda sua extensão e todo alimento é distribuído

igualmente pela estrutura, que também auxilia na obtenção de alimentos para a colônia.

[3]

3.3.1. Bioadsorção

A formação de biofilme na superfície de adsorventes é facilitada devido à sua grande área superficial e a superfície porosa e rugada, na qual microrganismos podem se estabilizar e colonizar facilmente. As propriedades adsortivas do carvão causam um aumento na concentração de nutrientes na sua superfície, criando um ambiente propício ao crescimento de microrganismos, além dos poros proporcionarem um ambiente de proteção para a acomodação desses seres. A grande variedade de grupos funcionais presentes na superfície do carvão também auxilia na adesão de microrganismos, tornando o biofilme formado mais resistente ainda à ação de desinfetantes. [6][9]

A presença de biofilme em uma superfície adsorvente pode aumentar o valor negativo da densidade de cargas da superfície, podendo assim aumentar a sua capacidade adsortiva, principalmente de componentes com carga positiva, como metais e outros adsorbatos ácidos. Entretanto, se esse biofilme se tornar muito denso, pode causar um efeito encapsulante no carvão, causando dificuldades para o adsorbato se difundir pelo biofilme e atingir os poros, causando uma diminuição da capacidade adsortiva. [3][9][11]

O objetivo primário da formação do biofilme na superfície adsorvente é que o mesmo pode ajudar na remoção de materiais orgânicos, decompondo os mesmos como forma de adquirir nutrientes, podendo decompor os resíduos contidos no meio e também os já adsorvidos nos poros do carvão, dando uma sobrevida ao adsorvente antes que ele deva ser restaurado ou descartado e substituído. Os bioadsorventes são utilizados no preenchimento dos Biofiltros Aerados Submersos (BAS) os quais são utilizados para realizar a bioadsorção de contaminantes de efluentes líquidos. [11]

3.3.2. Biofiltro Aerado Submerso

O Biofiltro aerado submerso é feito por uma superfície sólida adsorvente (ou não) coberta por um biofilme de microrganismos, posta numa coluna, onde o efluente a ser tratado submerge por completo o meio filtrante e gases também estão presentes. Esses gases podem ser bombeados para dentro do sistema, estarem dissolvidos no efluente ou serem liberados pelos próprios microrganismos, fruto da decomposição dos poluentes presentes no meio. ^{[4][12]}

As principais características do biofiltro aerado submerso são: alta concentração de biomassa ativa no volume reacional, idade de lodo elevada, pequena produção de lodo, resistência a choques e possibilidade de cobertura. O BAS é caracterizado por ser trifásico, onde as fases presentes são a fase sólida, constituída pelo suporte e pelas colônias de microrganismos que nele se desenvolvem; a fase líquida, que é representada pelo efluente a ser tratado, que submerge a fase sólida por completo e está em constante escoamento; e a fase gasosa, formada pela aeração artificial e pelos gases subprodutos da atividade biológica. ^{[4][12]}

4. Metodologia

A parte experimental foi realizada seguindo o fluxograma metodológico presente na Figura 2.

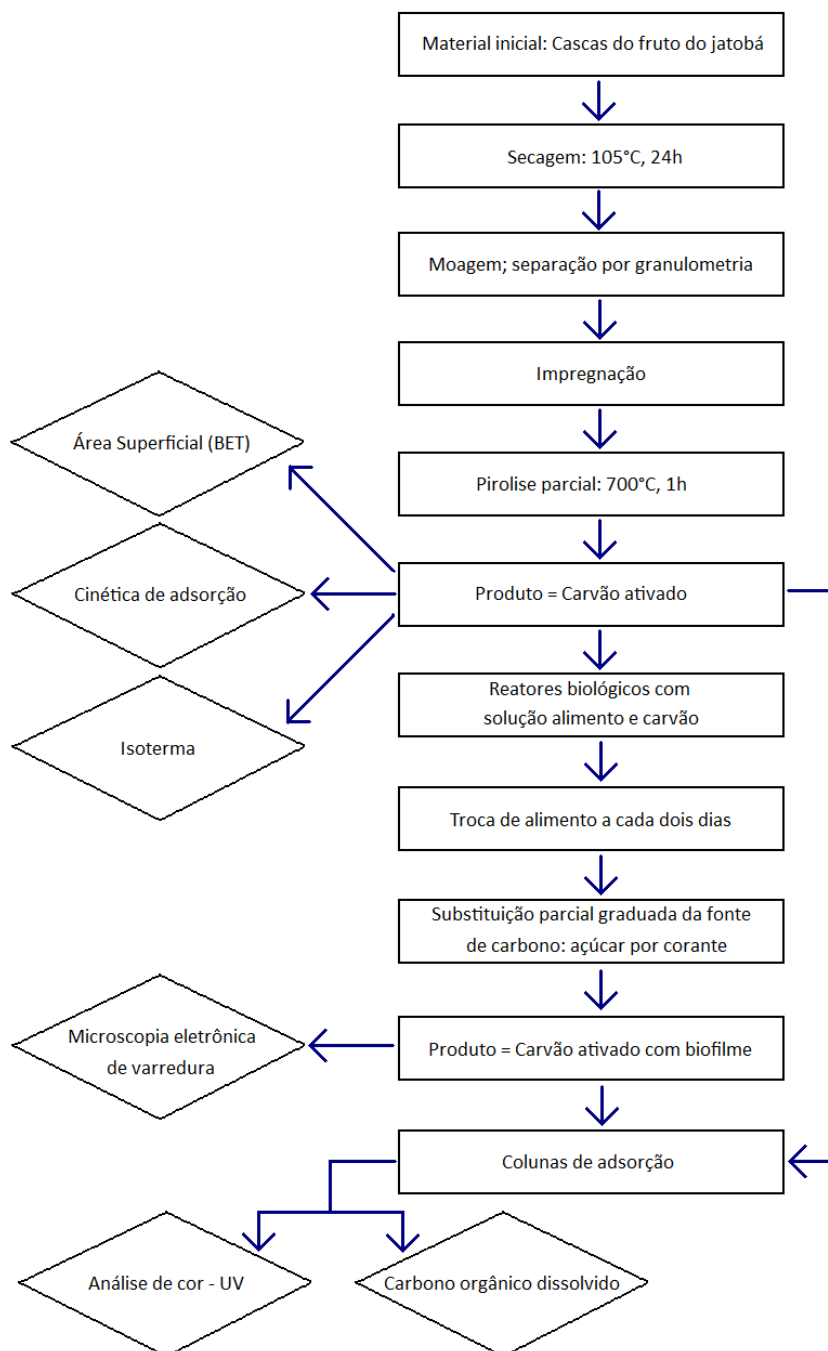


Figura 2: Fluxograma metodológico do trabalho

As cascas utilizadas para a produção do carvão foram doadas pela comunidade Monjolo (Assentamento Márcia Cordeiro Leite), localizada nos arredores de Brasília, em uma região compreendida pela RA-VI (Planaltina).

Aproximadamente 2,75 kg de casca foram pesados e armazenados. Após isso, foi pesada uma quantidade dessas cascas, que foram submetidas a 24 h na estufa com uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 1$, para eliminação do teor de umidade presente nas cascas. Após esse período, as cascas foram retiradas da estufa e pesadas novamente, para fins de comparação com o peso inicial, realizando os cálculos para o teor de umidade (% em B. U.) presente nas cascas, utilizando a equação 1. Após essa determinação, toda a massa de cascas foi submetida ao processo de secagem em estufa, para facilitar o processo de moagem.

$$Umidade(\%) = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Após esse tratamento, as cascas foram moídas em um moedor Arbel, como o mostrado na Figura 3, para realizar a separação por granulometria. O objetivo desse procedimento foi diminuição do tamanho de partícula do material inicial para melhorar o contato entre o efluente e o adsorvente (aumento da área superficial específica). Na adsorção, é importante que a área de contato entre o meio com o adsorbato e o adsorvente seja maximizada, aumentando assim a eficiência do processo, mas granulometrias muito baixas podem comprometer uma coluna de adsorção, não deixando espaços para a passagem do efluente, causando uma perda de carga elevada, diminuindo a eficiência no transporte do líquido pela coluna.



Figura 3: Moedor Arbel utilizado na moagem das cascas do fruto do jatobá.

Uma granulometria ideal (entre 1mm e 2 mm) foi escolhida e foi realizado um processo de impregnação com K_2CO_3 . A impregnação com agente ativante desidratante anterior à pirólise, promove a ativação do carvão, abrindo poros no mesmo após a pirólise. O material deve ser previamente impregnado com o agente ativante e em seguida é feita a ativação em altas temperaturas, durante a própria pirólise. Após isso, esse agente deve ser retirado da superfície adsorvente criada por métodos de lavagem.

Seguindo essa metodologia, 20 g de K_2CO_3 foram pesados e dissolvidos em 100 ml de água destilada, em seguida, a solução foi posta em contato com 20 g das cascas moídas, em proporção de 1:1 (g de casca/g de K_2CO_3). A mistura foi aquecida a $100^\circ C$ sob agitação constante, até a secagem parcial desse material e consequente incorporação do ativante à matriz carbonácea. Esse material foi posteriormente posto em uma estufa a $105^\circ C$ por 24h e ativado durante o processo de pirólise. ^[13]

4.1. Pirólise

A pirólise é a degradação térmica parcial de materiais sólidos a base de carbono, e pode ser realizada em ausência completa de um agente oxidante (oxigênio) ou em uma quantidade tal que a gaseificação não ocorra totalmente. Os subprodutos desse processo em geral são os gases combustíveis, os bio-óleos e o carvão vegetal.

Ela pode ser classificada em dois tipos: a pirólise rápida e a pirólise lenta. A pirólise rápida é feita com rampas de aquecimento muito rápidas e tempos de residência muito curtos, e somente é usada para obtenção de todos os subprodutos. A pirólise lenta é amplamente mais utilizada e praticamente o único produto formado é o carvão vegetal. Nesse processo, a rampa de aquecimento é mais lenta e o tempo de permanência na estufa é maior.

Com o objetivo de obtenção de carvão vegetal, foi-se realizada uma pirólise lenta, onde as cascas, colocadas em cadinhos de porcelana parcialmente fechados, foram levadas à uma mufla (EDG Equipamentos), como a apresentada na figura 4, e aquecidas até 700°C por uma hora, com uma rampa de aquecimento de 15°C/min. Ao final do processo, o carvão obtido foi lavado com ácido acético para desobstrução dos poros, em seguida lavado com água destilada até que o pH do fluido de lavagem fosse neutralizado. Em seguida ele foi deixado em uma estufa a 105°C por 24h para secagem. ^{[13][14]}



Figura 4: Mufla da EDG Equipamentos utilizada para a pirólise.

4.2. Caracterização do Material Adsorvente

4.2.1. Análise BET

A análise de área superficial foi feita por BET (Quantachrome NovWin), com nitrogênio a 400°C e banho de 77,1 K por 362 minutos.

4.2.2. Obtenção da Cinética e Isoterma de Adsorção

Pela cinética de adsorção, pode-se saber em média quanto tempo uma determinada quantidade de carvão leva para adsorver uma determinada quantidade de adsorbato. Para esse método, 0,635 g de carvão foram pesados e adicionados à um erlenmeyer de 250 mL, com uma solução de 10 ppm de corante reativo têxtil Reactive Red 2 (C.I. RR2). A amostra foi colocada sob agitação constante de 400 rpm. A cada 10 minutos, alíquotas foram retiradas e mediu-se a absorvância em espectrofotômetro UV-Vis (Shimadzu). Com esse valor, foi possível encontrar a concentração remanescente de corante presente na solução adsorbato em cada ponto e uma curva cinética foi obtida.

A isoterma de adsorção foi obtida visando analisar a capacidade adsorviva do carvão ativado com diferentes concentrações de corante na solução no período de 24 h. Nesse procedimento, seis erlenmeyers com 50 mL de soluções de diferentes concentrações de corante foram dispostos em uma mesa agitadora, e 0,5 g de carvão foram adicionados à cada um deles, e estes foram deixados sob agitação constante por 24 h. Em seguida, uma alíquota de cada amostra foi retirada e submetida à análise espectrofotométrica para determinação da absorbância e com a ajuda de uma curva de calibração, mensurou-se a quantidade de corante remanescente em cada amostra. Por meio dessa análise, também é possível quantificar, por meio de um balanço de massa, o quanto de corante foi adsorvido pelo material adsorvente.

4.3. Formação de Biofilme

Como já mencionado no item 1, biofilme é uma colônia de microrganismos envolto por uma camada polissacarídica gerada pelos próprios seres, que possui grande resistência a forças, mudanças de temperatura e pH e se forma naturalmente em superfícies em contato com água contendo microrganismos.

Para que esse biofilme pudesse ser adaptado ao carvão adsorvente, primeiramente deve-se criar um meio de cultura propício. Para isso, preparou-se uma solução alimento conforme descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Componentes e concentrações presentes na solução alimento. ^[8]

	Composto Químico	Concentração mg/L
Macronutrientes	CaCl ₂	7,40
	MgSO ₄ .6H ₂ O	463,00
	Na ₂ HPO ₄	550,00
Micronutrientes	MnSO ₄ .H ₂ O	10,00
	ZnSO ₄ .7H ₂ O	2,00
	NH ₄ Fe(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	19,70
	H ₃ BO ₃	1,00
Tampão	KH ₂ PO ₄	500,00
	K ₂ HPO ₄	500,00
Fonte de Nitrogênio	(NH ₄) ₂ SO ₄	500,00

Em seguida, 100 mL dessa solução foi adicionada em cada um dos quatro reatores biológicos, juntamente com 5 mL de lodo proveniente da CAESB, 2 mL de uma solução alimento com 8,25 g/L de sacarose (açúcar refinado) e 70 µL de peróxido de hidrogênio (H₂O₂). A sacarose é a fonte inicial de carbono e o peróxido é a fonte de oxigênio do sistema, visando manter o processo aeróbio. Esse sistema então foi deixado em um sistema de agitação com temperatura constante de 30°C durante 28 dias.

A cada dois dias, retirava-se 5 mL do conteúdo dos reatores, levando o lodo em excesso consigo, então os reatores são deixados em repouso por cerca de 5 minutos e mais 75 mL de seu conteúdo é retirado, sem lodo, visando manter um tempo de residência do lodo (idade do lodo) de 21 dias. Esse contendo apenas solução alimento sem os nutrientes, que foram consumidos pela colônia no decorrer desses dois dias. Em seguida os nutrientes

são repostos, com a adição de 78 mL de solução alimento e 2 mL de sacarose novamente, acompanhada da adição de 70 µL de peróxido de hidrogênio.

Após 12 dias, o açúcar começou a ser gradualmente substituído por uma solução de corante 10 ppm. Isso ocorreu durante 8 dias, como mostra a Tabela 2. Depois disso a proporção foi mantida 50% de corante-50% de sacarose a cada dois dias durante 10 dias.

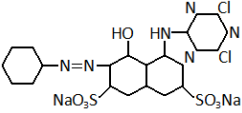
Tabela 2: Cronograma de crescimento e adesão dos microrganismos à matriz adsorvente.

Dia	Proporção
12	80% Sacarose 20% Corante
14	70% Sacarose 30% Corante
16	60% Sacarose 40% Corante
18	50% Sacarose 50% Corante

4.4. Colunas de Adsorção de Leito Fixo

Após a obtenção do carvão ativado adsorvente e do carvão adsorvente com biofilme (bioadsorvente) em sua superfície, duas colunas de adsorção foram montadas, uma com cada um dos materiais. Assim foi possível realizar uma comparação de como a criação de uma colônia de microrganismos em superfícies adsorventes pode ajudar na remoção de poluentes. O corante utilizado nesse trabalho foi o Corante Reativo Têxtil RR2, sua caracterização foi feita por VASQUES, (2008) ^[9], e segue como na Tabela 3. O pH medido da solução de corante usada foi de 4,47.

Tabela 3: Caracterização do Corante RR2 por VASQUES, (2008).^[9]

Corante	Red Reactive 2
Classe Química	Monoazo
Sistema Reativo	Diclotiazina
Peso Molecular (g/mol)	601,323
Comprimento de Onda Máximo (λ_{max}) (nm)	538
Estrutura Química	

Para montar essas colunas, foram utilizados dois condensadores de cerca de 1 cm de diâmetro interno, nos quais foram empacotados com os carvões adsorventes. Uma bomba peristáltica (Milan) foi utilizada para bombear a solução alimento com corante 10 ppm com 700 $\mu\text{L/L}$ de peróxido de hidrogênio para dentro das colunas e manter a vazão constante. Por se tratar de um BAS, o adsorvente foi mantido completamente encoberto durante todo o processo, e em seguida a vazão de entrada foi igualada à vazão de saída.

Durante o processo, amostras do efluente de saída foram retiradas a cada 5 minutos e armazenadas em tubos de ensaio para que análises posteriores pudessem ser realizadas, e esse processo continuou até que as medições de absorvância mostrassem que a concentração de saída se igualou à concentração de entrada, indicando a saturação do adsorvente. A montagem do equipamento foi feita conforme apresentado na Figura 5.

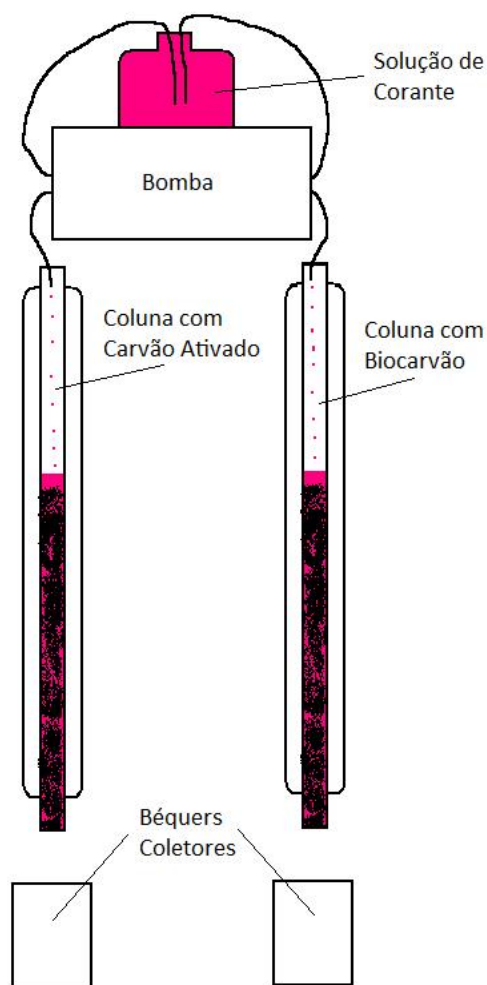


Figura 5: Esquema de colunas de adsorção com carvão ativado e carvão ativado com biofilme.

De posse dos resultados, obteve-se uma curva de ruptura (“curva de breakthrough”). Desta é possível encontrar o ponto de quebra, ou seja, o ponto em que o adsorvente fica saturado e a concentração de saída aumenta rapidamente até coincidir com a concentração de entrada. Após isso, foram feitos cálculos para definir algumas propriedades do adsorvente, bem como obtenção da perda de carga associada ao processo de adsorção em contínuo.

4.4.1. Perda de Carga

Foram feitos cálculos relativos à perda de carga nas colunas, com o objetivo de analisar a eficiência das mesmas quanto a remoção de cor.

Cálculo do valor da capacidade de adsorção: ^[15]

$$q_e = \frac{[COR_0] - [COR_t]}{m} \times V \quad (2)$$

Onde:

q_e - capacidade de adsorção do carvão ponto a ponto (g_{COR}/g_{CAR}).

$[COR_0]$ - concentração de corante da solução de entrada (g/L).

$[COR_t]$ - concentração de corante no total (g/L).

V - Volume de solução até o ponto de quebra (L).

m - massa de carvão utilizada (g).

Cálculo da densidade aparente do leito: ^[16]

$$\rho_b = \frac{m_{CAR}}{v} \quad (3)$$

Onde:

ρ_b - densidade bulk, ou densidade aparente do leito (kg/m^3).

m_{CAR} - massa de carvão utilizada (kg).

v - volume do balão volumétrico (m^3).

Cálculo da densidade do líquido de trabalho: ^[16]

$$D_l = \frac{m_a}{v} \quad (4)$$

Onde:

D_l - densidade do líquido de teste (kg/m^3).

m_a - massa de água utilizada (kg).

v - volume do balão volumétrico (m^3).

Cálculo da densidade aparente do carvão: ^[16]

$$D_{CAR} = \frac{m_{CAR}}{v - \frac{(m_{b+l+CAR} - m_b - m_{CAR})}{D_l}} \quad (5)$$

Onde:

D_{CAR} - densidade aparente do carvão (kg/m^3).

m_{CAR} - massa de carvão utilizada (kg).

v - volume do balão volumétrico (m^3).

$m_{b+l+CAR}$ - massa do balão mais o líquido de teste mais o carvão (kg).

m_b - massa do balão volumétrico (kg).

D_l - densidade do líquido de teste (H_2O) (kg/m^3).

Cálculo da porosidade do leito: ^[17]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{D_{CAR}} \quad (6)$$

Onde:

ε - Porosidade relativa do leito (adimensional).

ρ_b - densidade bulk, ou densidade aparente do leito (kg/m^3).

D_{CAR} - densidade aparente do carvão (kg/m^3).

Cálculo da vazão de trabalho teórica: ^[17]

$$V_t = \frac{Vol_t}{t} \quad (7)$$

Onde:

V_t - Vazão de trabalho (m^3/s).

Vol_t - Volume total (m^3).

t - tempo teórico de trabalho (s).

Cálculo da quantidade de carvão utilizada: ^[17]

$$M_{COR} = \overline{X_{COR}} V \quad (8)$$

Onde:

M_{COR} - massa de corante (g).

$\overline{X_{COR}}$ - concentração de corante na solução (mg/L).

V - volume total utilizado (l)

$$M_{CAR} = \frac{M_{COR}}{q_e} \quad (9)$$

Onde:

M_{CAR} - Massa de carvão (g).

$$V_{CAR} = \frac{M_{CAR}}{\rho_b} \quad (10)$$

Onde:

V_{CAR} - Volume de carvão (m^3).

Cálculo da área de secção transversal da coluna de adsorção: ^[17]

$$A_{secção} = \frac{V_{CAR}}{L} \quad (11)$$

Onde:

$A_{secção}$ - Área da secção transversal (m²).

L - Altura do leito (m).

Cálculo do raio da coluna de adsorção: ^[17]

$$A_{secção} = \pi R^2 \quad (12)$$

Onde:

R - Raio da coluna de troca iônica (m).

Cálculo da velocidade superficial de massa: ^[17]

$$v_s = \frac{V_t}{A_{secção}} \quad (13)$$

Onde:

v_s - Velocidade superficial de massa (m/s).

V_t - Vazão de trabalho (m³/s).

$A_{secção}$ - Área da secção transversal (m²).

Cálculo do numero de Reynolds: ^[17]

$$Re = \frac{D_p v_s \rho'}{\mu} \quad (14)$$

Onde:

Re – Numero de Reynolds (adimensional).

D_p - Diâmetro do leito (2. R) (m).

v_s - Velocidade superficial de massa (m/s).

ρ' - Densidade do fluido de serviço (kg/m³).

μ - Viscosidade dinâmica do fluido de serviço (kg/m.s).

Cálculo da perda de carga: ^[17]

$$\Delta P = \left(1,75 + 150 \frac{1-\varepsilon}{Re}\right) \frac{(1-\varepsilon)v_s^2 L \rho'}{D_p g_c \varepsilon^3} \quad (15)$$

Onde:

ΔP - Queda de pressão (kg/m²).

ε - Porosidade do leito (adimensional).

v_s - Velocidade superficial de massa (m/s).

L - Profundidade do leito (m).

ρ' - Densidade do fluido de serviço (kg/m³).

D_p - Diâmetro do leito (m).

g_c - Gravidade (m²/s).

Re - Numero de Reynolds (adimensional).

μ - Viscosidade dinâmica do fluido de serviço (kg/m.s)

4.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta definição da superfície de uma amostra. Devido a maneira como as imagens são geradas, elas têm uma aparência tridimensional, possibilitando avaliar a estrutura superficial de uma amostra.

O MEV foi feito para avaliar a existência do biofilme na superfície do carvão. A amostra foi preparada aplicando uma camada ultrafina de material eletricamente condutivo (prata) sobre o carvão. Isto é feito para prevenir a acumulação de campos

eletrostáticos no espécime devido irradiação elétrica durante a produção da imagem. Outra razão para a metalização é para melhorar o contraste. ^[16]

4.4.3. Carbono Orgânico Dissolvido

A análise de COD foi feita para se analisar a saída de materiais orgânicos da coluna. Isso foi feito com o objetivo de saber se os microrganismos estavam degradando de fato os nutrientes presentes na solução a ser filtrada. Para que microrganismos que se desprendem da superfície do carvão não fossem contabilizados, cada amostra foi passada por uma membrana de HPLC de 45 µm.

5. Resultados e Discussão

5.1. Teor de Umidade

O teor de umidade das cascas de jatobá proveniente da secagem da amostra e do cálculo utilizando a Equação 1 são descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Cálculo do teor de umidade da casca de jatobá.

Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Teor de Umidade (% B.U.)
5,02	4,61	8,17
5,01	4,62	7,78

Pelos dados obtidos conclui-se que o teor médio de umidade das cascas em base úmida utilizadas nesse trabalho é de 7,93%.

5.2. Granulometria

As cascas moídas foram separadas de acordo com o diâmetro de partícula por uma peneira em 400 µm, 600 µm, 800 µm, 1 mm, 2 mm e 3 mm. Nesse trabalho, foi utilizada a granulometria entre 1 mm e 2 mm, ou seja, partículas que passaram pela peneira de 2 mm de diâmetro, mas não passaram pela de 1 mm. Esse tamanho foi escolhido, pois partículas muito pequenas causam a queda de pressão no sistema.

5.3. Caracterização do Carvão Ativado

No início do trabalho, foram realizadas diversas pirólises, ou seja, alguns ensaios preliminares, para encontrar uma metodologia que proporcionasse as melhores propriedades adsorptivas, começando com uma queima a 400°C, com uma rampa de aquecimento rápida por 1h e cadinhos abertos. No final, a melhor metodologia encontrada

foi a pirólise a 700°C por 1 h, com rampa de aquecimento de 15°C/min, com cadinhos tampados para minimizar o contato com o ar.

5.3.1. Área Superficial

A área superficial obtida por esse método foi de 731,18 m²/g e o raio de poro medido foi de 16,94 Å, classificando esse material como microporoso.

5.3.2. Cinética de Adsorção

Para as medições de adsorção, foi feita uma espectrofotometria UV-Vis na região de comprimento de onda encontrada do corante, de 536 nm.

A cinética de adsorção foi obtida adicionando-se 0,635 g de carvão em 100 mL de uma solução de 10 ppm de corante. A cinética foi conduzida durante 120 min. Os resultados são apresentados na Tabela 5, os quais foram utilizados para elaboração do gráfico presente na Figura 6. A cinética envolvida é de pseudo-segunda ordem.

Tabela 5: Dados do experimento de cinética de adsorção.

t (min)	[c] (ppm)
0	10,413683
10	4,924045
20	3,355577
30	2,892166
40	2,393108
50	1,715815
60	1,359345
70	1,002875
80	0,967228
90	0,82464
100	0,753346
110	0,717699
120	0,610758

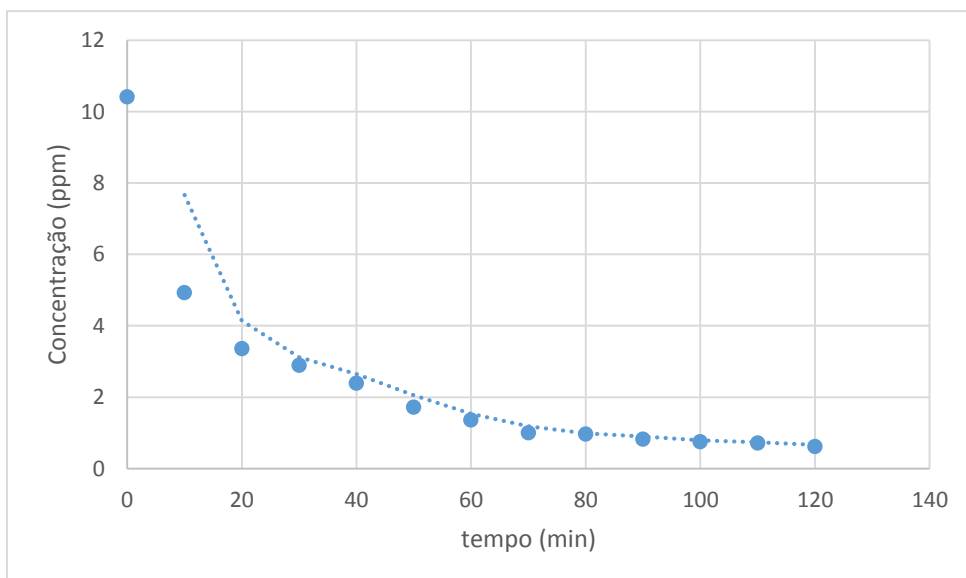


Figura 6: Gráfico de cinética de adsorção.

5.3.3. Isoterma

A isoterma foi obtida com o objetivo de se calcular a quantidade de corante removido pelo adsorvente em 24 h de ensaio. Os resultados são exibidos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados da isoterma.

C_i (ppm)	C_e (ppm)	q_e (mg/g)
49,44715	12,409915	3,7
59,17878	22,070252	3,72
71,08488	31,338472	3,97
78,92722	41,390926	3,75
91,15414	51,265145	3,99
103,1672	63,91983	3,92

Onde: C_i = Concentração inicial, C_e =Concentração de corante remanescente na solução no equilíbrio (mg/L), q_e =quantidade de corante adsorvida por grama de adsorvente (mg/g).

Os valores de q_e apresentados na Tabela 6 indicam que o processo de adsorção sofreu influência dos parâmetros experimentais como temperatura do meio e pH, pois os valores de q_e não aumentam com o aumento da concentração do meio como ocorre nos processos adsorptivos de corante reativos têxteis utilizando material carbonáceo como adsorvente conforme dados apresentados por Vasques, 2008. ^[9]

5.4. Biofilme

Os reatores biológicos foram montados conforme mostrado na figura 7, e o crescimento do biofilme foi acompanhado por 28 dias.



Figura 7: Reatores biológicos em um misturador com banho térmico a 30°C.

A caracterização do lodo biológico coletado do reator aeróbio da CAESB (ETE Norte) utilizado como inóculo para a formação dos microrganismos na superfície do adsorvente não foi fornecida pela CAESB.

5.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

Uma microscopia eletrônica de varredura foi realizada para que fosse verificada a existência de microrganismos na superfície do carvão. As micrografias são apresentadas na Figura 8.

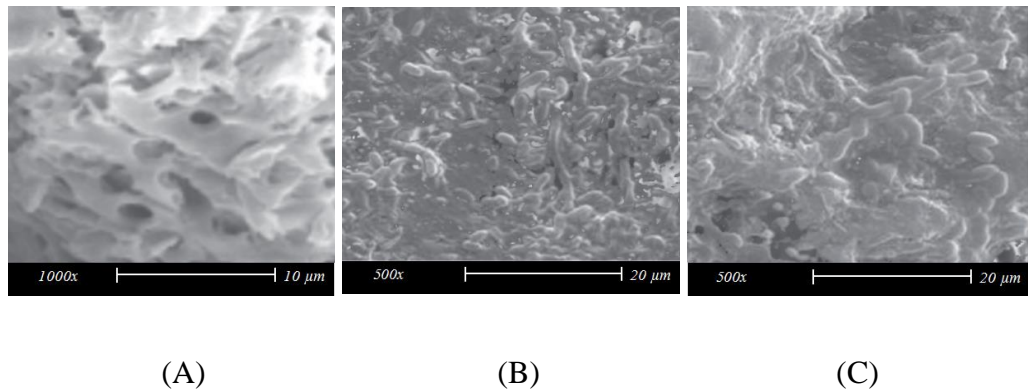


Figura 8: (A) Superfície do carvão ativado sem biofilme (Ampliação 1000x), (B) Biofilme formado após 10 dias de cultura (Ampliação 500x), (C) Biofilme formado após 18 dias de cultura (Ampliação 500x).

Na Figura 8 (A) é possível verificar a presença de poros, fendas e cavidades as quais favorecem o processo adsorptivo. Já a Figura 8 (B) indica a presença de microrganismos aderidos à superfície do carvão. E é possível verificar o aumento no crescimento de microrganismos aderidos à superfície do carvão na Figura 8 (C).

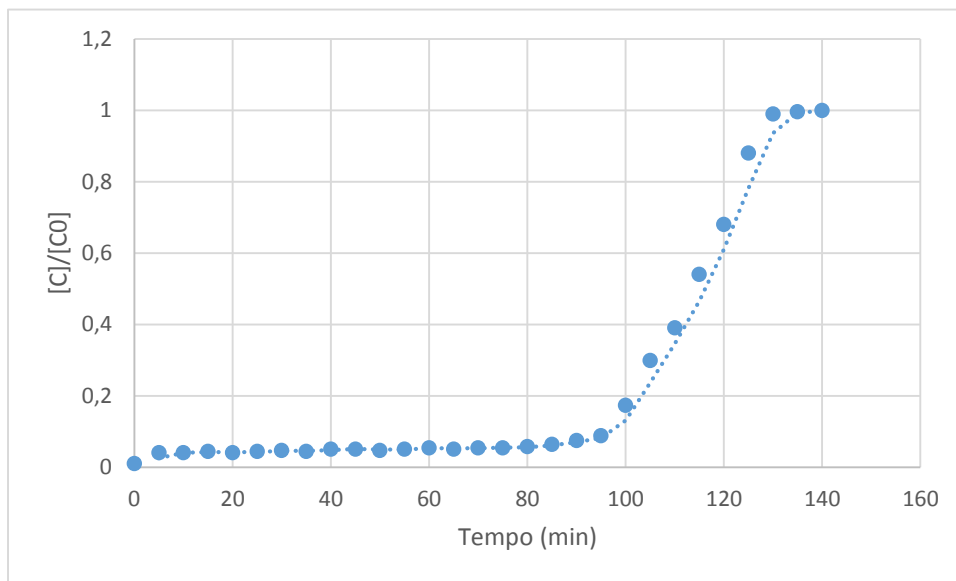
5.5. Colunas de Adsorção de Leito Fixo

Durante a filtração nas colunas, foram retiradas alíquotas a cada 5 minutos, essas amostras foram analisadas por espectrofotometria UV-Vis e COD.

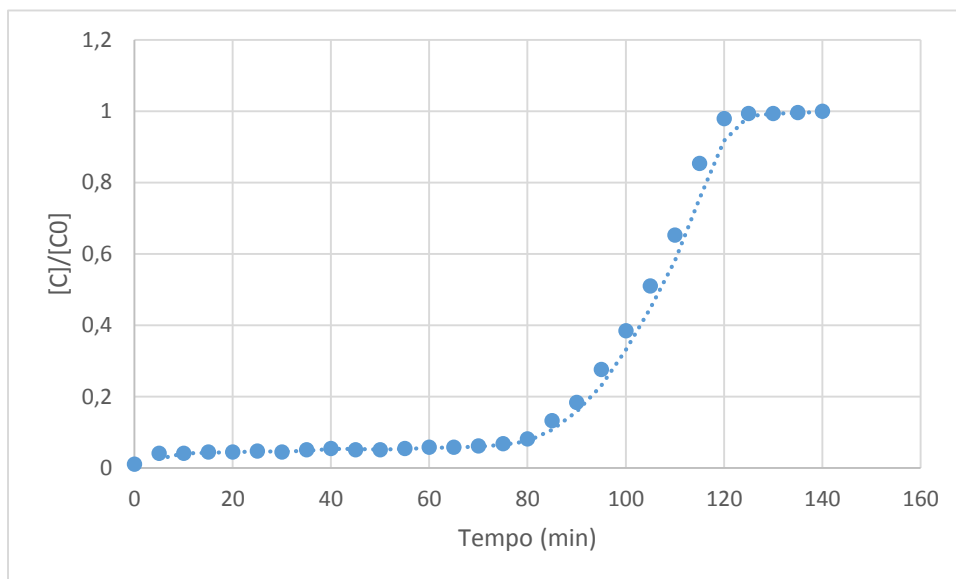
5.5.1. Curva de Ruptura

As amostras coletadas passaram por uma análise de UV, sendo medida a absorvância. Por meio do uso de uma curva de calibração, foi possível calcular a

concentração de corante na saída da coluna. As curvas de ruptura são apresentadas na Figura 9.



(A)



(B)

Figura 9: Curva de ruptura da coluna com carvão ativado com biofilme (A), curva de ruptura da coluna com carvão ativado (B).

Nesse trabalho, utilizou-se o último ponto da curva em que a concentração é menor que 1 ppm (Valor máximo aceito pelo CONAMA) ^[1] como ponto de quebra da coluna.

Comparando os valores de quantidade de corante removida por grama de adsorvente para um tempo de operação em contínuo de 80 minutos, encontra-se para a coluna contendo carvão ativado com biofilme a capacidade adsortiva de 12,52 mg/g e, para a coluna contendo somente carvão ativado, de 12,22 mg/g. Houve uma diferença de 2,39 % na capacidade adsortiva quando as colunas foram comparadas para o tempo mencionado.

Já comparando os valores de quantidade de corante removida por grama de adsorvente são comparados para um tempo de operação em contínuo de 80 minutos, encontra-se para a coluna contendo carvão ativado com biofilme a capacidade adsortiva de 14,38 mg/g e, para a coluna contendo somente carvão ativado, de 11,43 mg/g. Houve uma diferença de 20,51 % na capacidade adsortiva quando as colunas foram comparadas para o tempo mencionado de 95 minutos.

Foram feitos cálculos utilizando as equações de 2 a 15 para o dimensionamento de uma coluna de bancada ideal para esse adsorvente, e em seguida os cálculos foram refeitos levando em conta uma vazão industrial de 40 m³/h e uma altura de coluna de 2 m. Os resultados estão sumarizados na tabela 7.

5.1.1. Dimensionamento de Coluna e Cálculo de Perda de Carga

Foram feitos cálculos utilizando as equações de 2 a 15 para o dimensionamento de uma coluna de bancada ideal para esse adsorvente, e em seguida os cálculos foram refeitos levando em conta uma vazão industrial de 40 m³/h e uma altura de coluna de 2 m. Os resultados estão sumarizados na tabela 7.

Tabela 7: Resultados dos cálculos de dimensionamento de coluna e perda de carga.

	Coluna de Bancada	Coluna Industrial
Capacidade de Adsorção	0,0122 g _{COR} /g _{CAR}	0,0122 g _{COR} /g _{CAR}
Densidade Aparente do Leito	77,67 kg/m ³	77,67 kg/m ³
Densidade do Líquido de Trabalho	999,97 kg/m ³	999,97 kg/m ³
Densidade Aparente do Carvão	685,7467 kg/m ³	685,7467 kg/m ³
Porosidade do Leito	0,8867	0,8867
Vazão de Trabalho Teórica	3,169 x 10 ⁻⁷ m ³ /s	1,1 m ³ /s
Quantidade de Carvão Utilizada	2,945 x 10 ⁻⁵ m ³	5,015 m ³
Área da Seção Transversal da Coluna	1,7326 x 10 ⁻⁴ m ²	2,51 m ²
Raio da Coluna	7,4263 x 10 ⁻³ m	0,8934 m
Velocidade Superficial de Massa	1,8291 x 10 ⁻³ m/s	4,4315 x 10 ⁻³ m/s
Número de Reynolds	1,0988 x 10 ⁵	3,2026 x 10 ⁷
Perda de Carga (ΔP)	6,3406 x 10 ⁻⁴ kgf/m ²	3,6399 x 10 ⁻³ kgf/m ²

OBS: Os cálculos foram realizados considerando uma coluna contendo somente carvão ativado, pois não foi possível determinar o novo diâmetro das partículas contendo o material biológico aderido à sua superfície.

5.1.2. Carbono Orgânico Dissolvido

Para medir a remoção de matéria orgânica por degradação biológica, foi feita uma análise de carbono orgânico total (COT). Como todas as amostras passaram por um filtro com porosidade de 0,45 μm, para remover partículas que poderiam ter ficado em solução, como pó de carvão e microrganismos que podem vir a se desprender da superfície adsorvente, a análise mede apenas o carbono orgânico dissolvido (COD). Os resultados são exibidos em forma de gráfico na figura 10.

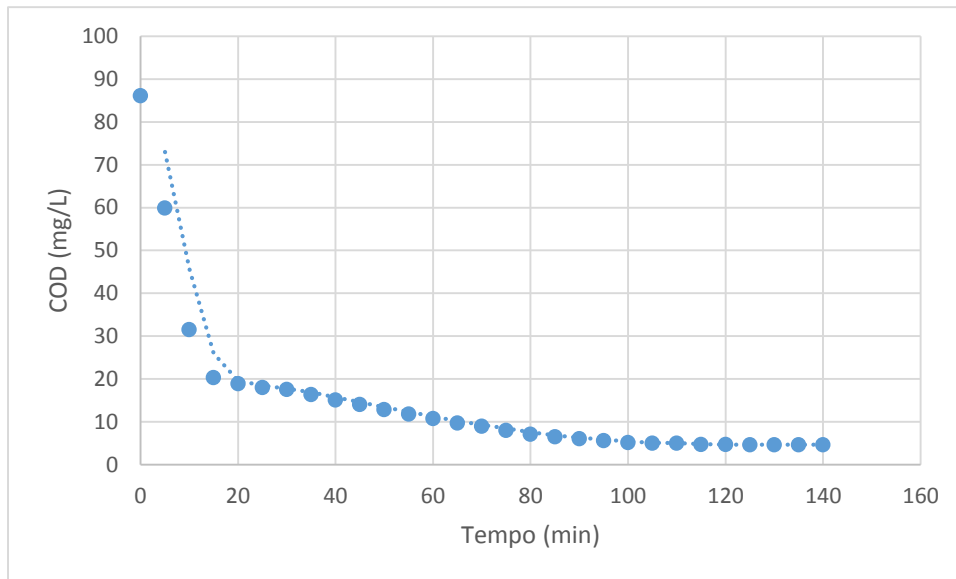


Figura 10: Gráfico de remoção de COD.

Pelas análises de COD, verifica-se que a quantidade de carbono dissolvido no efluente diminui, o que indica uma atividade microbiana, degradando a sacarose e o corante do meio.

6. Conclusão

Esse estudo mostrou formas de utilizar resíduos agroindustriais antes descartados na produção de carvão ativado para revenda para indústrias têxteis e posteriormente outros tipos de indústria, para o tratamento de seus efluentes.

Foram encontradas metodologias para a pirólise desses materiais, para a melhor obtenção de carvões com boas propriedades adsorptivas. A formação de biofilme em superfícies adsorventes também se mostrou muito eficiente, aumentando o tempo de permanência do adsorvente em uma coluna, antes que o mesmo deva ser trocado ou restaurado, o que pode ser observado pelo aumento do tempo até o ponto de quebra na curva de ruptura. Os microrganismos se mostraram bem adaptáveis com a metodologia empregada, e sua presença pode ser notada em micrografia por MEV e pela diminuição do COD.

7. Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante a realização desse trabalho, tentou-se fazer uma extrusão desse carvão, com o objetivo da criação de pellets. Os pellets apresentariam um produto final com características de uso em colunas de adsorção, pois teriam tamanhos e forma homogêneos, além de maior resistência mecânica para a implantação em colunas, evitando também a perda de carga.

Foram feitos diversos testes de extrusão, com quantidades de 2%, 4%, 6% e 10% de amido na composição. Em seguida, essa mistura de carvão com amido foi pirolisada, e o material obtido apresentou uniformidade e maior resistência mecânica, mas todas as tentativas acabaram por se dissolver em água. Como um material a ser destinado para filtração de efluentes, essa propriedade não pode ser aceita, então esse projeto ainda carece de uma metodologia eficiente para produção desses pellets.

Outra sugestão seria a caracterização do lodo utilizado na formação do biofilme. O lodo proveniente da CAESB, utilizado nesse trabalho não foi caracterizado, pois a caracterização foi prometida pela CAESB, mas não foi entregue, e não havia tempo de caracterizar. A caracterização do lodo seria importante para compreendermos melhor os microrganismos presentes, podendo melhorar a eficiência do processo de biodegradação, agregando também qualidade ao produto final.

Reproduzir a isoterma em temperatura constante e verificar o pH do meio, com o objetivo de caracterizar melhor o material adsorvente utilizado durante o trabalho.

Finalmente, quando um produto comercial for desenvolvido, realizar cálculos de viabilidade econômica para implantação desse produto no mercado.

Referências

- [1] Resoluções CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>
- [2] SOLER, Cássio Renato. Tratamento de Efluentes de Indústria Têxtil por Reator Biológico com Leito Móvel (2013)
- [3] MELLO, Josiane de. Biodegradação de Compostos BTX em um Reator com Biofilme (2012)
- [4] FONTANA, Hallan. Pós-Tratamento de Esgoto Sanitário com Biofiltro Aerado Submerso Preenchido com Carvão Granular (2007)
- [5] PUGA, Isadora Tormin. Obtenção de Produtos Naturais a Partir da Casca do Fruto do Jatobá (2015)
- [6] NATIVIDADE, Gustavo Henrique. Obtenção de Material Cerâmico Poroso como Suporte para Adsorvente e Formação de Biofilme (2009)
- [7] OLIVEIRA, Paula Sofia Almeida. Remoção de azul de metileno numa coluna de adsorção com enchimento de casca de noz carbonizada (2009)
- [8] DUTRA, Rômulo Coriolano. Estudo do processo de remoção de Cu^{2+} de cachaça artesanal visando adequação à legislação vigente (2015)
- [9] VASQUES, Andressa Regina. Caracterização e Aplicação de Adsorvente para Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis em Batelada e Colunas de Leito Fixo (2008)
- [10] SOUZA, Juber Pereira de. Produção e modificação de carvões ativados a partir de matérias-primas de baixo custo: osso bovino e cascas de sementes de moringa (2010)

- [11] NIEDERSBERG, Carolina. Ensaios de Adsorção com Carvão Ativado produzido a Partir da Casca do Tungue (2012)
- [12] MELLER, Henrique Semprebom. Avaliação de um Filtro Biológico Percolado com Meio de Suporte Plástico Corrugado (2009)
- [13] CASTRO, Cíntia Soares de. Preparação de Carvão Ativado a Partir da Borra de Café: Uso como Adsorvente e como Suporte Catalítico Para Remoção de Poluentes Orgânicos em Meio Aquoso (2009)
- [14] GOMEZ, Edgardo Olivares; CORTEZ, Luís Augusto Borbosa; PEREZ, Juan Miguel Mesa; SEYE, Omar; LINEIRO, Francisco Antônio Barba. Projeto de Pirólise Rápida Contínua de Biomassa com Ar em Reator de Leito Fluidizado Atmosférico
- [15] CARREON-ALVAREZ, Alvaro. Cu (II) Removal from Tequila Using an Ion-Exchange Resin. **Food Chemistry** (2011)
- [16] BARRETO, Marcelo Neves. Caracterização de materiais para garantir a condutividade de fraturas hidráulicamente induzidas em poços de petróleo e gás (2010)
- [17] GOMIDE, Reynaldo. Operações Unitárias: Transferência de Massa, vol. 4. **São Paulo, Brasil**, p. 311, (1988)
- [18] PERON, Olivaldo, Filho; MATSUMOTO, Tsunao. Estudo de um Biofiltro Aerado Submerso como Pós Tratamento de Efluentes de Curtume
- [19] KESTENBACH, Hans-Jürgen; NOCITE, Nádia; GREGORIO, Rinaldo; LAOS, Joachim; PETERMANN, Jürge. Resolução Lamelar num Novo Microscópio Eletrônico de Varredura (1997)

Anexos

Anexo I: Memorial de Cálculos

Teor de Umidade

Para o cálculo do teor de umidade da casca do fruto do jatobá foi utilizada a equação 1:

$$\frac{5,02 - 4,61}{5,02} \times 100 = 8,17$$

$$\frac{5,01 - 4,62}{5,01} \times 100 = 7,78$$

Em seguida foi calculado o teor de umidade médio:

$$\frac{8,17 + 7,78}{2} = 7,925$$

Propriedades do Carvão

Algumas propriedades do adsorvente foram calculadas utilizando as equações de 2 a 6:

$$q_e = \frac{(0,0105 - 0,00086) \times 1,521142857}{1,2} = 0,0122 \quad (2)$$

$$\rho_b = \frac{1,94175}{0,025} = 77,67 \quad (3)$$

$$D_l = \frac{24,99925}{0,025} = 999,97 \quad (4)$$

$$D_{CAR} = \frac{1,94175}{0,025 - \frac{(22,16775)}{999,97}} = 685,7467 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{77,67}{685,7467} = 0,8867 \quad (6)$$

Perda de Carga

Para se calcular a perda de carga em uma coluna com as proporções utilizadas nesse trabalho, foram usadas as equações de 7 a 15.

$$V_t = \frac{2,662}{8400} = 3,169 \times 10^{-7} \quad (7)$$

$$M_{COR} = 0,01048498 \times 2,662 = 0,0279 \quad (8)$$

$$M_{CAR} = \frac{0,0279}{0,0122} = 2,2877 \quad (9)$$

$$V_{CAR} = \frac{2,2877}{77,67} = 0,02945 \text{ l} = 2,945 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (10)$$

$$A_{secção} = \frac{2,945 \times 10^{-5}}{0,17} = 1,7326 \times 10^{-4} \quad (11)$$

$$R = \sqrt{\frac{1,7326 \times 10^{-4}}{\pi}} = 7,4263 \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$v_s = \frac{3,169 \times 10^{-7}}{1,7326 \times 10^{-4}} = 1,8291 \times 10^{-3} \quad (13)$$

$$Re = \frac{2 \times 7,4263 \times 10^{-3} \times 1,8291 \times 10^{-3} \times 999,97 \times (3600)}{0,00089} = 1,0988 \times 10^5 \quad (14)$$

$$\Delta P = \left(1,75 + 150 \frac{1 - 0,8867}{1,0988 \times 10^5}\right) \frac{(1 - 0,8867) \times (18291 \times 10^{-3})^2 \times 0,17 \times 999,97}{2 \times 7,4263 \times 10^{-3} \times 9,81 \times (0,8867)^3} = 6,3406 \times 10^{-4} \quad (15)$$

Scale Up

Para o redimensionamento da coluna, as equações de 7 a 15 foram aplicadas novamente, utilizando uma vazão industrial de 40 m³/h e uma altura de coluna de 2 m. Foi escolhido um tempo de trabalho de 8 horas, equivalente a um turno de trabalho.

$$Vol = 1,1 \times 10^{-2} \times 28800 = 320 \text{ m}^3 = 320000 \text{ l} \quad (7)$$

$$M_{COR} = 0,01048498 \times 320000 = 4751,936 \quad (8)$$

$$M_{CAR} = \frac{4751,936}{0,0122} = 389488,776 \quad (9)$$

$$V_{CAR} = \frac{389488,776}{77,67} = 5014,662 \text{ l} = 5,015 \text{ m}^3 \quad (10)$$

$$A_{seção} = \frac{5,015}{2} = 2,51 \quad (11)$$

$$R = \sqrt{\frac{2,51}{\pi}} = 0,8934 \quad (12)$$

$$v_s = \frac{1,1 \times 10^{-2}}{2,51} = 4,4315 \times 10^{-3} \quad (13)$$

$$Re = \frac{2 \times 0,8934 \times 4,4315 \times 10^{-3} \times 999,97 \times (3600)}{0,00089} = 3,2026 \times 10^7 \quad (14)$$

$$\Delta P = \left(1,75 + 150 \frac{1 - 0,8867}{3,2026 \times 10^7}\right) \frac{(1 - 0,8867) \times (4,4315 \times 10^{-3})^2 \times 2 \times 999,97}{2 \times 0,8934 \times 9,81 \times (0,8867)^3} = 3,6399 \times 10^{-4} (15)$$