



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PESQUISA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – PIBIC

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO ADSORTIVO DE BIOMASSAS IN NATURA E
MODIFICADAS NA REMOÇÃO DE COV FORMALDEÍDO**

Área do conhecimento: Engenharia Ambiental e Sanitária

Subárea do conhecimento: Qualidade do ar em ambientes interiores

Especialidade do conhecimento: Pesquisa e desenvolvimento científico

Relatório Final

Período da bolsa: de agosto de 2018 a julho de 2019

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica PIBIC/COPES

Orientador: Bruno Santos Souza

Autor: Carolina Cristina da Silva Ribeiro

Sumário

1.	Introdução	3
2.	Objetivos.....	4
2.1	Objetivo geral.....	4
2.2	Objetivos Específicos.....	4
3.	Metodologia.....	4
3.1	Ensaios de adsorção	5
3.1.1	Unidade experimental	5
3.1.2	Geração de formaldeído.....	6
3.1.3	Condições do experimento	6
3.1.4	Obtenção das cursas de breakthrough / estudo da dinâmica de adsorção em leito fixo	8
3.1.5	Obtenção da cinética de adsorção.....	9
4.	Resultados e discussões	10
4.1	Testes na unidade experimental	10
4.2	Estudo da dinâmica de adsorção em coluna de leito fixo e construção das curvas de breakthrough.....	11
4.2.1	Efeito da umidade relativa na adsorção do formaldeído	11
4.2.2	Determinação da capacidade de adsorção	14
4.2.3	Ajuste das curvas de breakthrough aos modelos matemáticos.....	16
4.3.4	Efeito da Vazão na adsorção do formaldeído.....	19
4.3.5	Determinação da capacidade de adsorção	22
4.3.6	Ajuste das curvas de breakthrough aos modelos matemáticos.....	23
4.3.7	Efeito da concentração inicial na adsorção do formaldeído	26
4.3.8	Determinação da capacidade de adsorção	29
4.3.9	Ajuste das curvas de breakthrough aos modelos matemáticos.....	29
5.	Conclusões	34
6.	Perspectivas de futuros trabalhos	34
7.	Referências bibliográficas	35
8.	Outras atividades	36
	APÊNDICE 1 – Dados dos ensaios de adsorção realizados	38

1. Introdução

A Organização Mundial de Saúde aborda a poluição de ambientes interiores como um dos principais causadores de danos à saúde pública no mundo, além disso, estima-se que países em desenvolvimento e subdesenvolvidos são os que mais se registram consequências advindas da má qualidade do ar interior (CARVALHO, 2016).

Estima-se que aproximadamente 90% do tempo gasto pela população seja em locais fechados, como escritórios, salas de aula, automóveis, entre outros, e estes ambientes internos normalmente possuem baixa renovação de ar quando comparados aos ambientes externos, possuindo assim uma propensão ao acúmulo de poluentes. Entre os mais encontrados está o formaldeído (HCHO), um composto orgânico volátil (COV) que, em condições normais de temperatura e pressão, encontrasse sob o estado gasoso (ALVES e ACIOLE, 2012).

Produtos como solventes e vernizes são grandes emissores de formaldeído que, em altas concentrações pode causar efeitos adversos à saúde, fazendo-se necessário um controle e monitoramento nas fontes geradoras (ALVES e ACIOLE, 2012).

Como um método de controle em ambientes internos, a adsorção é comumente utilizada, pois, além dos constituintes para esta técnica serem menos dispendiosos do que outros métodos empregados para a remoção de COVs (ozonização, fotólise, dentre outros), ela é capaz de realizar a purificação do fluido desejado fazendo com que o adsorvente seja apto a prover a remoção de compostos adversos ou indesejáveis presentes anteriormente no líquido ou gás em questão (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Entretanto, ainda sendo menos custoso do que outros processos, a adsorção utiliza materiais dispendiosos, como o carvão ativado, a zeólita, a sílica em gel, dentre outros. Desta forma, biomassas lignocelulósicas vem sendo estudadas de modo a adquirir matéria-prima de baixo custo para serem utilizados como adsorventes (YE *et al.*, 2017; MOHAMED *et al.*, 2015).

A terminologia biomassa é considerada por todo tipo de matéria orgânica provinda de origem animal, vegetal e seus derivados que apresentam constituição dura e fibrosa, como materiais lenhosos (ex.: salgueiro, faia e pinho) e resíduos sólidos agrícolas e agroindustriais (casca de cereais, bagaço da cana de açúcar, resíduos de cortiça, dentre outros) (BERTON, 2012). Entretanto, para que estes materiais possuam características similares ao carvão ativado, eles precisam passar por um processo térmico, de modo que modifique sua estrutura morfológica. A torrefação, um processo de pirólise da biomassa, em temperaturas entre 200-

300°C é comumente utilizada para este fim, pois ela demanda uma menor faixa de temperatura para a modificação do material do que outras técnicas, geralmente com temperaturas acima de 600°C (COSTA e COSTA, 2015).

Neste contexto, verifica-se que há uma necessidade de estudos acerca da viabilidade da utilização de biomassas torrificadas para a remoção do formaldeído em processos de adsorção, de modo a ser aplicado com potencial adsortivo e eficiência na manutenção de um ambiente interno com concentrações de compostos orgânicos voláteis.

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência da adsorção do COV formaldeído em casca de amendoim e bagaço de cana-de-açúcar torrificados e *in natura* em uma coluna de leito fixo.

2.2 Objetivos Específicos

- Modelar em experimentos de coluna a cinética de adsorção do formaldeído utilizando três materiais torrificados produzidos;
- Modelar as curvas de ruptura obtidas no processo de adsorção em colunas de leito fixo de acordo com o modelo de Thomas para cálculo do carregamento de sólidos.

3. Metodologia

A presente pesquisa faz parte de um estudo maior, que engloba um mestrado desenvolvido na mesma linha de pesquisa, portanto, alguns aspectos foram desenvolvidos e analisados pelo aluno de mestrado, como a obtenção das biomassas, suas caracterizações e processos de torrefação, não constando suas etapas neste relatório.

Para a realização dos ensaios de adsorção, foram utilizadas amostras de biomassas obtidas anteriormente em comércios locais de Aracaju-SE. Estas amostras, *in natura* e termicamente modificadas, foram sujeitas ao contato com o COV formaldeído, através de uma unidade experimental montada no Laboratório de Controle da Poluição Atmosférica (LCPA) no Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, apresentada na Figura 1 com o objetivo de analisar a capacidade adsorptiva desses materiais, assim como, determinar a taxa de geração de formaldeído a ser utilizada nos ensaios.

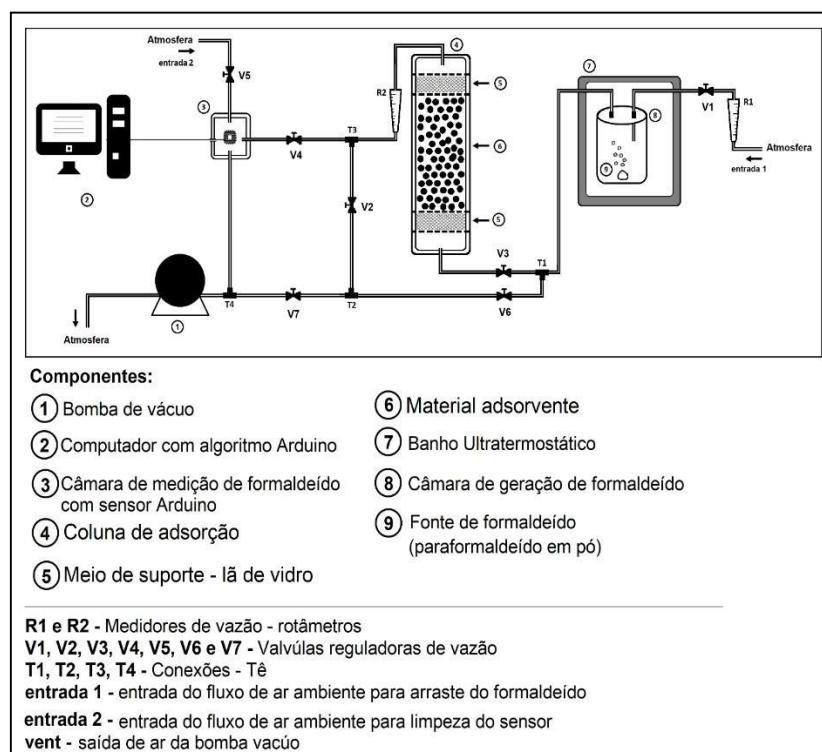
3.1 Ensaios de adsorção

3.1.1 Unidade experimental

A unidade experimental utilizada é composta por: uma bomba de vácuo (Primatec, modelo 132 - Tipo 2VC); um recipiente de acrílico utilizado como câmara de geração de formaldeído; um tubo preenchido com sílica gel para evitar o excesso de umidade proveniente do ar externo; uma coluna de adsorção de leito fixo construída em vidro com comprimento útil de 17 cm e diâmetro interno de 1,2 cm; lã de vidro para evitar que o adsorvente presente na coluna adentre as mangueiras; um banho ultratermostático (8) (modelo SL152, SOLAB); Conjunto, placa + sensor de formaldeído, do tipo Arduino (DFROBOT) com escala de medição entre 0,00 e 5,00 ppm; Computador para a visualização da concentração de formaldeído que será captada pelo sensor; três medidores de vazão do tipo rotâmetro (R1, R2 e R3) e algumas conexões, como: válvulas (V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7), tês (T1, T2, T3 e T4) e mangueiras de borracha por onde a corrente gasosa será direcionada dentro do aparato.

Figura 1 - Unidade experimental utilizada nos ensaios de adsorção em coluna.

Fonte: Autor



O formaldeído utilizado na unidade experimental foi o ($\text{HO}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$), apresentado em forma de pó como paraformaldeído, adquirido através da Sigma-Aldrich Brasil Ltda, sendo um polímero com alto grau de pureza (99%) e alto grau de volatilidade. O paraformaldeído foi introduzido na câmara de geração, que é envolta pelo banho termostático a uma temperatura

constante de 25°C. A temperatura utilizada foi definida através de diversos ensaios, onde foram testados o poder de geração do paraformaldeído, que após sublimação, libera o formaldeído gasoso de modo a ser succionado pela corrente, portanto, em uma temperatura de 25°C os melhores resultados puderam ser obtidos para a geração.

Para que se tenha o início dos testes de adsorção no aparato experimental, o ar externo é sugado para a câmara de geração de formaldeído, passando primeiramente pela tubulação preenchida com sílica para que ocorra a remoção do excesso de umidade presente na atmosfera, em seguida, o ar, já em contato com a corrente gasosa de formaldeído é guiado pela trajetória inicial do percurso, passando pela V1, onde deve ser feita a regularização da vazão de trabalho a ser utilizada, medida pelo rotâmetro 1, em seguida, a corrente gasosa percorrerá a tubulação em direção ao leito preenchido, entrando assim em contato com o material adsorvente, para logo depois ser medida a concentração atual no sensor. Esta etapa do procedimento é realizada em intervalos entre 2-3min, intercalada com a etapa de limpeza do sistema, onde o ar externo que será coletado pela V5 entrará em contato com o sensor, fazendo a função de limpeza do mesmo, durando igualmente entre 2-3min. Em ambos os procedimentos, a corrente gasosa presente no sistema será purgadas para a região externa ao laboratório pela bomba de vácuo.

3.1.2 Geração de formaldeído

Para a realização dos testes de adsorção, foi necessário exercer testes referentes a geração de formaldeído. Estes, foram feitos de modo com o qual fosse possível a avaliação acerca da influência das condições experimentais as quais o paraformaldeído deve ser submetido, como: a massa de paraformaldeído a ser utilizada para a geração, a vazão da corrente de arraste utilizada no sistema e a umidade relativa do meio, mantendo alguns dos parâmetros fixos enquanto outros sofriam variações e registrando os valores obtidos. Desta forma, foi possível a determinação de valores ótimos para cada variante do sistema, de modo a visar o enquadramento da concentração de formaldeído gerado dentro do limite de detecção do sensor utilizado (0,00 – 5,00 ppm).

3.1.3 Condições do experimento

Para a avaliação o potencial adsortivo dos materiais utilizados foi necessário identificar como as variáveis experimentais interferiam na adsorção. Deste modo, três ensaios foram realizados de forma contínua em coluna de leito fixo com cada biomassa torrificada. Os ensaios foram intitulados como Ensaio 1.1, Ensaio 1.2 e Ensaio 1.3. Enquanto que os ensaios

identificados como Ensaio 1.0, correspondem aos ensaios realizados com as biomassas *in natura* para caráter de comparação.

As variáveis experimentais avaliadas foram:

- (1) UR - Umidade relativa da corrente de arraste;
- (2) Q - Vazão da corrente de arraste;
- (3) C_o - Concentração de formaldeído na entrada da coluna.

Os ensaios realizados para a avaliação da interferência da umidade relativa no processo de adsorção foram feitos utilizando a umidade ambiente ($\pm 60\%$) e com um teor de umidade muito baixo ($<1,0\%$), medidas através de um medidor de temperatura, CO₂ e UR portátil (Modelo C-02, Instrutherm) com escala de medição de 10 – 95% e resolução de 1%. Para chegar à condição de experimento com baixa umidade relativa no meio, foi utilizado um cartucho de PVC com 44,0cm de comprimento e 5,0cm de diâmetro interno preenchido com sílica gel. Deste modo, testes foram realizados com as variáveis ajustadas e sendo utilizada posteriormente apenas a umidade relativa onde foi identificada a maior capacidade de adsorção pela biomassa.

Tabela 1 – Condição experimental 1 - Umidade Relativa.

UR %	< 1,0	60
Q (L/min)		1,0
C_o (ppm)		<u>Alta (1,0 – 2,5 ppm)</u>

Os ensaios realizados para a avaliação da interferência da vazão de arraste no processo de adsorção foram feitos utilizando as vazões de 0,5 e 1,0L/min, sendo ajustadas pela válvula V1, de modo que permitisse um bom tempo de residência do formaldeído na coluna de leito fixo para a adsorção nos materiais. Deste modo, testes foram realizados com as variáveis ajustadas e sendo utilizada posteriormente apenas a vazão onde foi identificada a maior capacidade de adsorção pela biomassa.

Tabela 2 – Condição experimental 2 – Vazão.

Q (L/min)	0,5	1,0
UR %		< 1,0
C_o (ppm)		<u>Alta (1,0 - 3,0 ppm)</u>

Os ensaios realizados para a avaliação da interferência da concentração inicial de formaldeído no processo de adsorção foram feitos considerando duas faixas de concentração, sendo elas C_0 baixa (0,5 – 1,0 ppm) e C_0 alta (1,0 – 2,5 ppm).

Tabela 3 – Condição experimental 3 – Concentração inicial

C_0 (ppm)	Baixa (0,5 - 1,0 ppm)	Alta (1,0 - 3,0 ppm)
UR %		< 1,0
Q (L/min)		1,0

3.1.4 Obtenção das cursas de breakthrough / estudo da dinâmica de adsorção em leito fixo

As curvas de *breakthrough* ou curvas de ruptura foram determinadas através de testes de adsorção dinâmicos para cada um dos materiais utilizados. Para que ocorresse este teste, a coluna deveria ser totalmente preenchida com o adsorvente a ser estudado, onde entra em contato com a corrente gasosa de formaldeído, após esta ter sido liberada pela câmara de geração a uma temperatura constante, mantida através do banho ultratermostático. Com isso, a concentração média inicial seria determinada com o ajuste da vazão de arraste na unidade experimental para a obtenção de uma concentração ótima na geração do formaldeído.

Após ter entrado em contato com o material adsorvente, a corrente gasosa continua o caminho até a chegada no sensor de formaldeído, onde este emitirá o valor da concentração final de formaldeído (C), sendo assim, a concentração relativa pode ser calculada (C/C_0) e plotada em um gráfico juntamente com o tempo observado no experimento, formando, portanto, um gráfico (C/C_0) *versus* tempo, gerando assim a curva de *breakthrough* para cada material adsorvente utilizado. Com a obtenção da curva, o ponto de ruptura e a capacidade adsorptiva do material no tempo de equilíbrio (q_e) poderão ser determinados ao analisar o gráfico e através da quantidade de formaldeído adsorvido (ppm) por massa de adsorvente (g), respectivamente.

Para analisar as curvas de ruptura e, a partir disso, o processo de adsorção entre os materiais torrificados e o formaldeído, dois dos modelos mais empregados, o modelo de Thomas e o modelo de Yonn-Nelson foram ajustados aos dados experimentais.

Para o modelo de Thomas, os ajustes dos dados foram feitas pela equação linearizada Equação 1), tornando possível obter a constante de Tomas (Equação 1.1) e assim a sua capacidade de adsorção (Equação 1.2).

$$\ln \left(\frac{C_0}{C} - 1 \right) = \frac{K_{TH} \cdot q \cdot m}{Q} - K_{TH} \cdot C_0 \cdot t \quad (\text{Equação 1})$$

$$(K_{Th}) = \frac{\text{coef.angular}}{C_0} \quad (\text{Equação 1.1})$$

$$(q_{Th}) = \frac{\text{coef.linear.Q}}{K_{Th} \cdot m} \quad (\text{Equação 1.2})$$

Para o modelo de Yonn-Nelson, os ajustes dos dados foram feitas por uma equação linearizada, tornando possível obter a constante de Yonn-Nelson (Equação 2.1) e assim a sua capacidade de adsorção (Equação 2.2).

$$\ln \left(\frac{C}{C_0 - C} \right) = K_{YN} \cdot (t - \tau) \quad (\text{Equação 2})$$

$$(K_{YN}) = \text{coef. Angular} \quad (\text{Equação 2.1})$$

$$(q_{YN}) = \frac{QC_0}{m} \quad (\text{Equação 2.2})$$

O software OriginPro 2019 foi utilizado para ajustar os dados experimentais aos modelos, onde o grau de ajuste foi dado pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo coeficiente de Pearson (R).

Para a validação das curvas obtidas, os testes de adsorção foram realizados em duplicata ou triplicata.

3.1.5 Obtenção da cinética de adsorção

A análise cinética de adsorção foi feito utilizando a metodologia empregada por Lu et. al. (2015), sendo feito um acompanhamento do aumento da massa de adsorvente realizada pela adsorção acontecida em função do tempo.

O experimento foi iniciado pesando uma massa do material adsorvente de aproximadamente 2,0g que posteriormente deve ser levada a estufa em 130°C por 1 hora. Após o tempo de secagem, a massa do material foi medida novamente, resfriada em um recipiente com sílica e levada ao dessecador, no qual uma atmosfera com baixa umidade foi criada, de modo que esta não venha a competir com o formaldeído pelos sítios ativos do adsorvente. Para a realização desta condição de baixa umidade, utiliza-se uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com pureza de 99,6%, garantindo uma umidade relativa de 1%, segundo (MEDEIROS, 2006). Para que ocorra o processo de adsorção, uma massa de formaldeído de proporcional à

concentração utilizada em cada teste foi adicionada ao dessecador, formando assim, uma atmosfera concentrada do adsorbato no meio.

Após a introdução do adsorvente no dessecador, foram feitos registros acerca do aumento da massa do material em função de intervalos de tempo estabelecidos anteriormente (1, 3, 5, 10 min). A massa final de formaldeído adsorvido no material foi calculada pela diferença da massa inicial do adsorvente e o último valor obtido no teste, tendo como critério para a finalização a diferença entre as massas subsequentemente pesadas com diferença inferior a 1,0% ou após haver redução da massa da amostra.

Com a coleta dos dados, foi possível calcular a capacidade de adsorção (q) e a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e), tendo assim a possibilidade da obtenção da curva de adsorção (q versus t). Os dados encontrados foram analisados por modelos clássicos cinéticos (Modelo de pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda ordem).

Para que fosse possível determinar a capacidade de adsorção dos materiais, foi utilizado o software OriginPro 2019, onde, o valor referente a capacidade de adsorção foi dado pelo valor da área acima da curva (Equação 4).

$$\int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \quad (\text{Equação 3})$$

$$q = \frac{C_o \cdot Q}{m_{ads}} \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \quad (\text{Equação 4})$$

4. Resultados e discussões

4.1 Testes na unidade experimental

Os testes realizados na unidade experimental tiveram o objetivo de identificar e avaliar as faixas de trabalho das variáveis utilizadas que causassem menos instabilidade no sistema e que provessem uma maior capacidade de adsorção de formaldeído nas biomassas estudadas.

Foram estudadas as influências que a temperatura do banho ultratermostático, a vazão de arraste e a massa de formaldeído tiveram na geração da concentração inicial do COV. Foram testadas temperaturas de 20°C, 25°C, 30°C e 35°C, onde, pôde-se observar que, nas temperaturas de 30 e 35°C, a concentração inicial de formaldeído era extremamente sensível a mudanças, fazendo com que este pudesse ultrapassar o limite de detecção do sensor utilizado durante os ensaios, sendo, portanto, adotada uma vazão de 25°C, que permitia uma boa geração sem o risco de ultrapassar a escala de medição.

Para a vazão de arraste, os ensaios foram feitos utilizando vazões de 0,5, 1,0 e 2,0L/min, entretanto, para a vazão de 2,0 L/min o tempo de residência do formaldeído na coluna de leito fixo não permitiu uma boa adsorção nos materiais utilizados, tendo sido esta descartada para os demais ensaios.

Com relação a massa de formaldeído adicionada na câmara de geração, durante os ensaios realizados pôde-se perceber que a geração era diretamente influenciada pela quantidade de formaldeído introduzido no sistema, então, para obter concentrações que permitissem a realização dos ensaios, foram utilizadas massas entre 0,5 e 2,0g de formaldeído.

É necessário dizer que problemas relacionados a estabilização da geração de formaldeído foram notadas em todas as variáveis testadas, causando, portanto, problemas na reprodução dos ensaios, desta forma, foram adotadas faixas de concentração de 0,5 e 1,0 ppm, consideradas baixas concentrações e entre 1,0 e 2,5 ppm para altas concentrações.

4.2 Estudo da dinâmica de adsorção em coluna de leito fixo e construção das curvas de breakthrough

Os resultados obtidos nas condições experimentais de umidade relativa, vazão de arraste e concentração inicial são expostas a seguir, com a avaliação do efeito das variáveis, determinação da capacidade de adsorção e ajuste das curvas de *breakthrough* aos modelos matemáticos de Thomas e Yonn-Nelson.

4.2.1 Efeito da umidade relativa na adsorção do formaldeído

A fim de analisar o efeito que a umidade relativa causa no processo de adsorção do formaldeído, foram realizados ensaios com as três biomassas torrificadas e *in natura*. Para as biomassas torrificadas, foram nomeados os ensaios 1.1, 1.2 e 1.3, enquanto que a biomassa *in natura* teve o ensaio nomeado como 1.0 para fins comparativos. As umidades relativas consideradas foram de 60% (umidade relativa normal do ambiente) e abaixo de 1% após a inserção do cartucho com sílica gel no sistema, mantendo as demais variáveis fixadas. Desta forma, as curvas de *breakthrough* puderam ser obtidas para os ensaios realizados. AS Figuras 2, 3 e 4 apresentam as curvas de *breakthrough* obtidas para as biomassas estudadas.

Figura 21 - Curvas de *breakthrough* obtidas para a casca de amendoim torrificada

a) UR=60% e b) UR< 1%

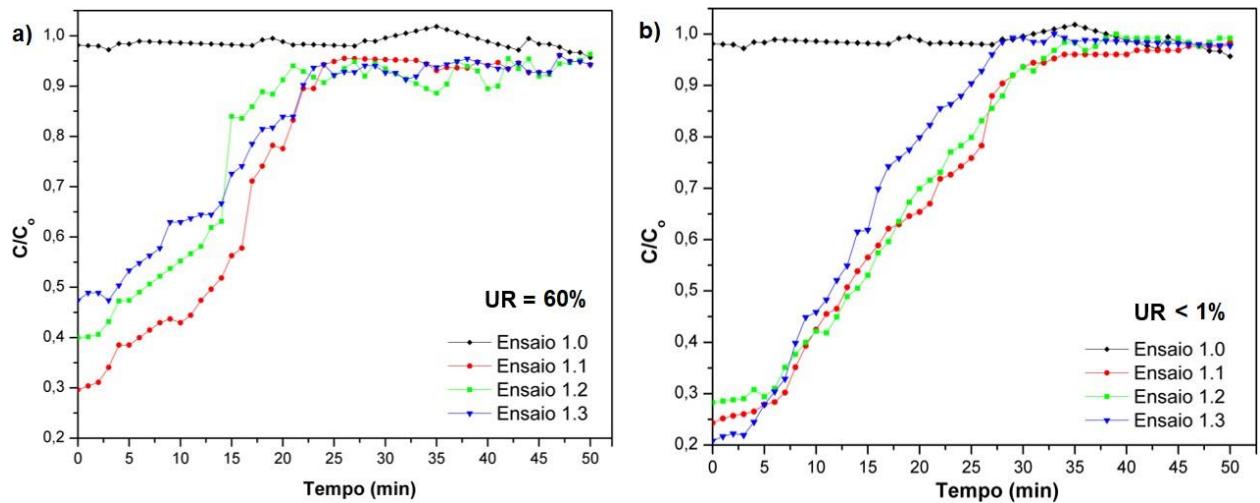


Figura 3 - Curvas de *breakthrough* obtidas para o bagaço de cana torrificado

a) UR=60% e b) UR< 1%

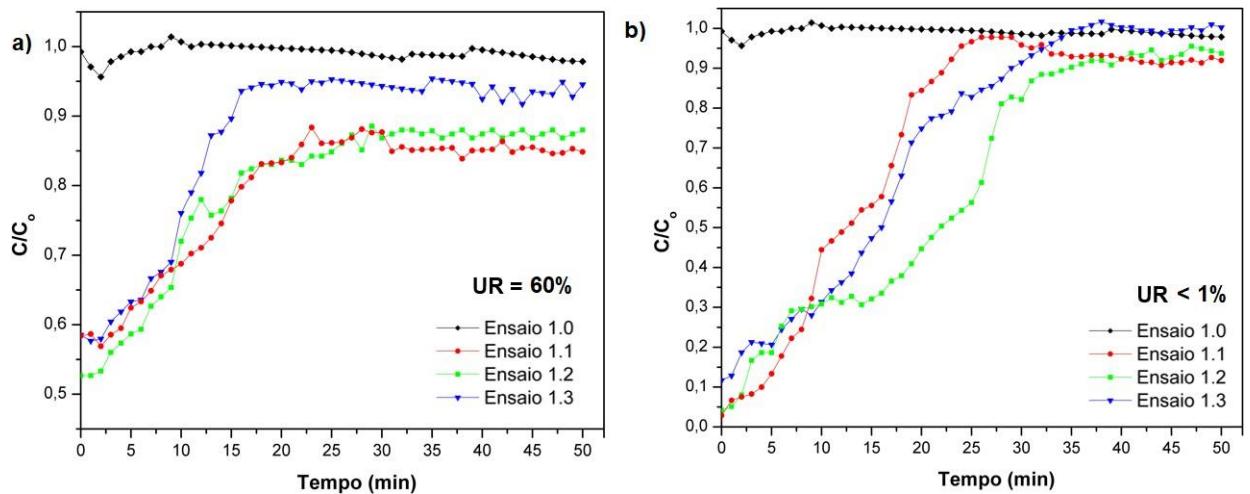
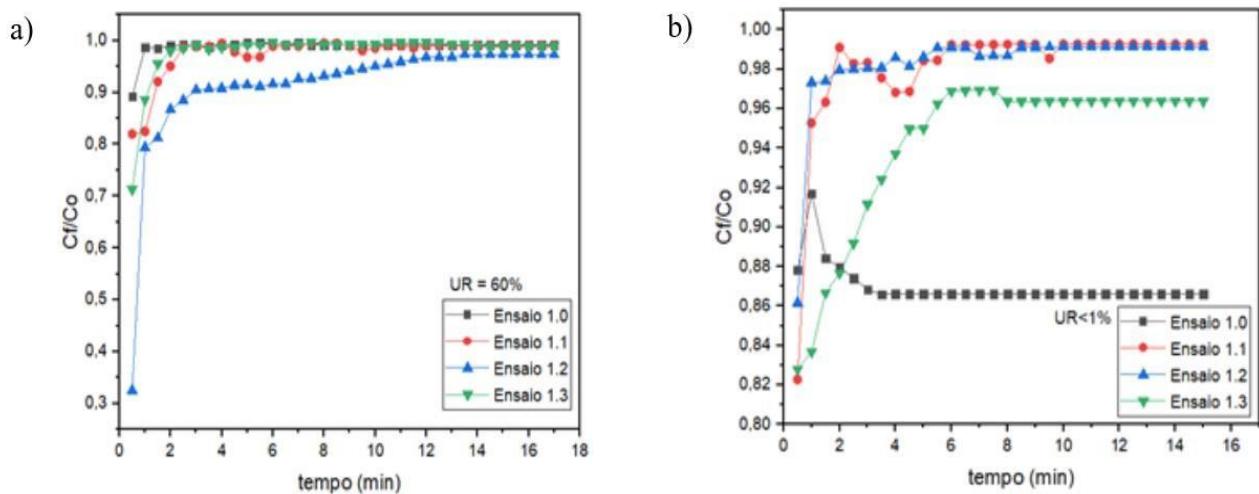


Figura 4 - Curvas de *breakthrough* obtidas para a cortiça torrificado

a) UR=60% e b) UR< 1%



Analisando as curvas de *breakthrough* foi possível constatar que não houve o comportamento retilíneo inicial definido, somando-se aos valores de C/C_0 começarem em valores acima do zero. Deste modo, pode-se associar este fato com a altura da zona de transferência de massa, tendo sido maior do que a altura do leito e não permitindo que houvesse tempo o suficiente de residência do formaldeído na coluna para que ocorresse o processo de adsorção.

Entretanto, com relação as biomassas *in natura*, foi possível perceber que não ocorreu a adsorção de formaldeído, tendo em vista que C/C_0 tiveram valores de aproximadamente 1,0. Sendo assim, tem-se uma maior capacidade de adsorção de formaldeído nos materiais torrificados, mostrando que o processo térmico foi eficiente em parte da remoção do COV.

Na Tabela 4 4 são apresentados os parâmetros extraídos das curvas de *breakthrough* para cada uma das biomassas. Nela é apresentado o tempo de ruptura, tempo de saturação, a C/C_0 no início do ensaio (C/C_0 _{inicial}) e a C/C_0 após a saturação do adsorvente (C/C_0 _{saturação}).

Tabela 4 – Parâmetros das curvas de *breakthrough* para a casca de amendoim torrificada, para o bagaço de cana torrificado e para a cortiça torrificada.

Parâmetros	Casca de amendoim		Bagaço de cana		Cortiça	
	UR=60%	UR<1%	UR=60%	UR<1%	UR=60%	UR<1%
Ensaio 1.1	tempo de ruptura (min)	2,50	4,0	2,0	2,0	1
	tempo de saturação (min)	24,0	31,5	27,0	31,0	6,5
	C/C_0 inicial	0,30	0,25	0,53	0,05	0,82
	C/C_0 saturação	0,95	0,96	0,88	0,92	0,98
Ensaio 1.2	tempo de ruptura (min)	2,0	5,0	2,5	0,0	1
	tempo de saturação (min)	24,0	31,5	27,0	31,0	8

Parâmetros	Casca de amendoim		Bagaço de cana		Cortiça		
	UR=60%	UR<1%	UR=60%	UR<1%	UR=60%	UR<1%	
Ensaios 1,3	tempo de saturação (min)	20,0	33,5	21,5	24,0	11	8
	C/Co inicial	0,40	0,29	0,58	0,04	0,79	0,68
	C/Co saturação	0,94	0,98	0,85	0,92	0,95	0,99
	tempo de ruptura (min)	3,0	3,0	2,5	0,5	1	4
	tempo de saturação (min)	22,5	28,0	16,5	35,0	6,5	8
	C/Co inicial	0,47	0,20	0,58	0,12	0,88	0,82
	C/Co saturação	0,94	0,98	0,95	1,00	0,99	0,96

Tendo em vista os dados obtidos com a casca de amendoim torrificada, é perceptível como a redução da umidade relativa aumentou o tempo de ruptura e o tempo de saturação no ensaio, sendo a causa mais provável a redução da competição da água com o formaldeído pelos sítios ativos da biomassa, havendo assim uma redução da cinética de adsorção do meio. Além disso, houve uma redução no valor de C/Co_{inicial} e um aumento em C/Co_{saturação}, indicando que houve uma redução na zona de transferência de massa, quando postos em comparação com testes onde a umidade relativa era de 60%.

Em contrapartida, para o bagaço de cana, foi perceptível como a redução da umidade relativa reduziu o tempo de ruptura e aumentou o tempo de saturação no ensaio, indicando assim como para a casca de amendoim, uma redução da cinética de adsorção, entretanto de modo mais suave. Além disso, houve uma redução no valor de C/Co_{inicial} e um aumento em C/Co_{saturação}, indicando que houve uma redução na zona de transferência de massa, quando postos em comparação com testes onde a umidade relativa era de 60%.

Por sua vez, os testes com a cortiça torrificada mostraram um aumento no tempo para se atingir o ponto de ruptura e o ponto de saturação em 2 dos 3 ensaios realizados. Além disso, houve uma redução no valor de C/Co_{inicial} e uma estabilidade em C/Co_{saturação}, indicando que houve uma redução na zona de transferência de massa, quando postos em comparação com testes onde a umidade relativa era de 60%.

4.2.2 Determinação da capacidade de adsorção

Para a determinação da capacidade de adsorção das biomassas utilizadas, foi utilizado o software OriginPro 2019 para a obtenção da área acima da curva, onde foi introduzida na equação 5, junto com outros dados para a obtenção da capacidade experimental de adsorção de cada curva de *breakthrough*. Um exemplo é apresentado na Figura 5, onde é

possível identificar a área sobre a curva e o valor obtidos para a curva de *breakthrough* para uma amostra da casca de amendoim torrificada, seguido pela capacidade de adsorção de cada um dos materiais estudados na Tabela 5.

Figura 5 - Curvas de *breakthrough* para o Ensaio 1.2 com UR<1% para a casca de amendoim torrificada

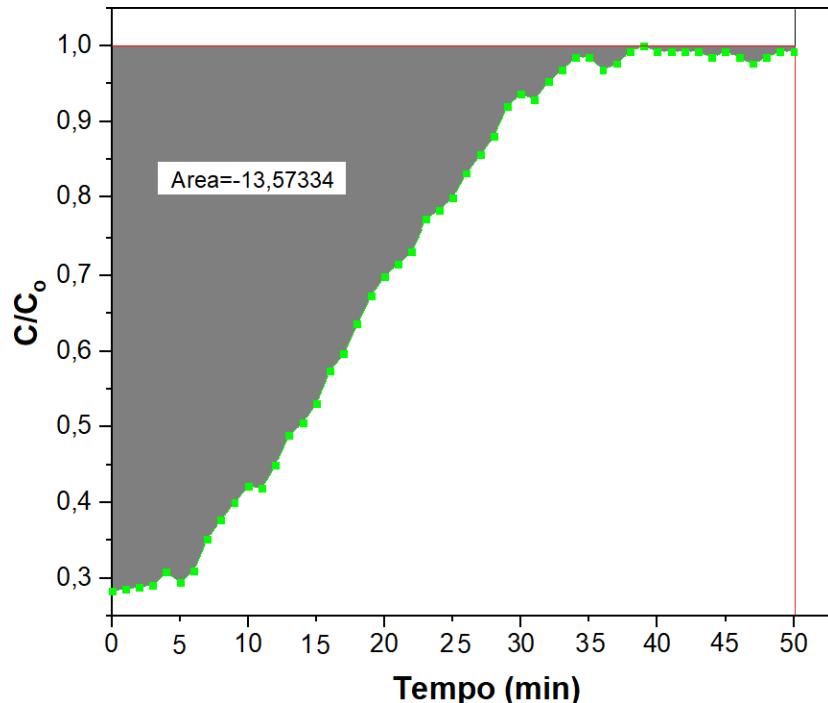


Tabela 5 – Capacidades de adsorção para os ensaios realizados com a casca de amendoim torrificada, com o bagaço de cana torrificado e com a cortiça torrificada

Casca de amendoim (mg/g)		
Ensaios	UR=60%	UR<1%
Ensaio 1.1	0,0079	0,0089
Ensaio 1.2	0,0069	0,0074
Ensaio 1.3	0,0058	0,0078
Média	$0,0069 \pm 0,0011$	$0,0080 \pm 0,0008$
Bagaço de cana (mg/g)		
Ensaios	UR=60%	UR<1%
Ensaio 1.1	0,0049	0,0087
Ensaio 1.2	0,0046	0,0141
Ensaio 1.3	0,0039	0,0105
Média	$0,0045 \pm 0,0005$	$0,0096 \pm 0,0013$
Cortiça (mg/g)		
Ensaios	UR=60%	UR<1%
Ensaio 1.1	0,00046	0,00038
Ensaio 1.2	0,00099	0,00047
Ensaio 1.3	0,00062	0,00046

Média	$0,00069 \pm 0,0003$	$0,00044 \pm 0,00006$
-------	----------------------	-----------------------

Observando os valores obtidos, pode-se conferir que as ordens de grandeza dos resultados encontram-se bem abaixo de outros valores encontrados na literatura. Zhang *et al.* (2017) por exemplo, reportou um valor de 22mg/g de capacidade de adsorção para bagaço de cana pirolisado a 300°C, enquanto Stefanowski *et al.* (2017) obtiveram uma capacidade de adsorção de 81,5mg/g em biomassas *in natura*.

Em contrapartida, a partir da pesquisa realizada, foi possível identificar o aumento da capacidade de adsorção ao se diminuir a umidade relativa do meio, fato este que pode ser validado devido a diminuição da competição dos sítios ativos da biomassa entre a água e o formaldeído. Além disso, vale ressaltar que as capacidades de adsorção das biomassas não permaneceram constantes, sendo um dos fatores para isso, a dificuldade de se obter valores iguais de concentração inicial para todos os testes.

4.2.3 Ajuste das curvas de breakthrough aos modelos matemáticos

Para o ajuste dos dados experimentais aos modelos linearizados de Thomas e Yonn-Nelson, foi novamente utilizado o software OriginPro 2019, obtendo assim os parâmetros de Thomas (K_{Th} e q_{Th}) e de Yonn-Nelson (K_{YN} e τ). Na Tabela 6 e 7 encontram-se os dados de ajuste e parâmetros dos modelos.

Tabela 6 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com a casca de amendoim

Casca de amendoim	Thomas				Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)
Ensaio 1.1 UR1%	0,9855	0,9704	0,0794	0,0082	0,9790	0,9572	0,1206	11,9204	0,0078
Ensaio 1.2 UR1%	0,9798	0,9596	0,0881	0,0066	0,9777	0,9545	0,1267	12,4467	0,0082
Ensaio 1.3 UR1%	0,9954	0,9909	0,0955	0,0071	0,9920	0,9831	0,1581	10,6882	0,0071

Tabela 7 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com o bagaço de cana

Bagaço de cana	Thomas					Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)	
Ensaio 1.1 UR1%	0,9920	0,9840	0,1098	0,0096	0,9930	0,9840	0,1461	14,1437	0,0096	
Ensaio 1.2 UR1%	0,8816	0,7754	0,0686	0,0164	0,9775	0,9529	0,1248	19,0978	0,0152	
Ensaio 1.3 UR1%	0,9538	0,9069	0,1524	0,0087	0,9945	0,9862	0,1581	10,6882	0,0087	

Tabela 8 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com a cortiça

Cortiça	Thomas					Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)	
Ensaio 1.1 UR1%	0,8467	0,717	0,1590	0,0095	0,8467	0,717	0,2195	9,5417	0,0095	
Ensaio 1.2 UR1%	0,8236	0,6783	0,0915	0,0214	0,8236	0,6783	0,2086	10,9626	0,0214	
Ensaio 1.3 UR1%	0,7966	0,6346	0,0841	0,01820	0,7966	0,6346	0,1396	12,1647	0,0182	

Sendo considerados modelos matemáticos bem parecidos, foi possível observar valores da capacidade de adsorção, coeficiente de determinação do grau de ajuste (R^2) e do coeficiente de Pearson (R) muito parecidos, tendo sido o R^2 e o R valores entre 0,95 e 0,99, sendo considerados valores de ajuste adequados. Comparando estes valores com o da capacidade de adsorção experimental obtida, próximo a $R^2 = 0,99$, observou-se um bom ajuste aos modelos, assim como os valores dos parâmetros de Thomas e Yonn-Nelson para os testes com a casca de amendoim torrificada e com o bagaço de cana torrificado, entretanto, para a cortiça, os valores de R^2 ficaram muito aquém dos resultados obtidos para as outras biomassas, indicando que o ajuste não se deu de forma adequada para este material.

Ao comparar as constantes cinéticas (K_{Th} e K_{YN}), é notório que a velocidade de transferência de massa entre o formaldeído e a biomassa ocorreu de maneira mais lenta para a casca de amendoim torrificada e para o bagaço de cana se comparados com a cortiça torrificada.

Nas Figura 7, 8 e 9 são expostas as curvas de *breakthrough* para os modelos ajustados aos dados experimentais que mostraram maior correlação (R^2) para os dados analisados da casca de amendoim (Ensaio 1.3) e do Bagaço de Cana (Ensaio 1.1). Analisando as curvas foi possível visualizar o ajuste que ambos os modelos apresentaram aos dados experimentais.

Figura 7 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.3 da casca de amendoim torrificada (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,9909$; Modelo de Yoon-Nelson – $R^2 = 0,9831$)

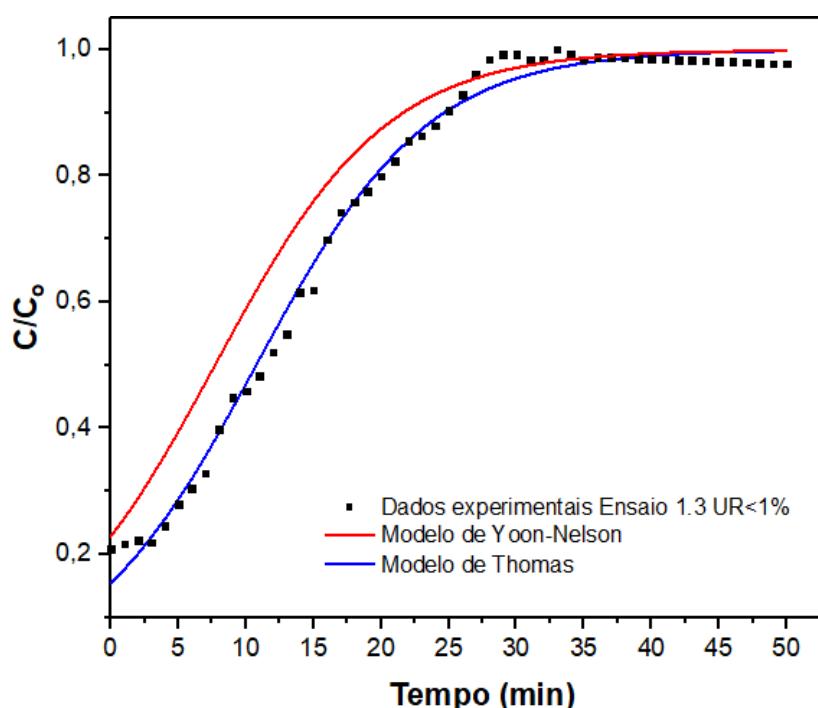


Figura 8 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.1 do bagaço de cana torrificado (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,9840$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,9840$)

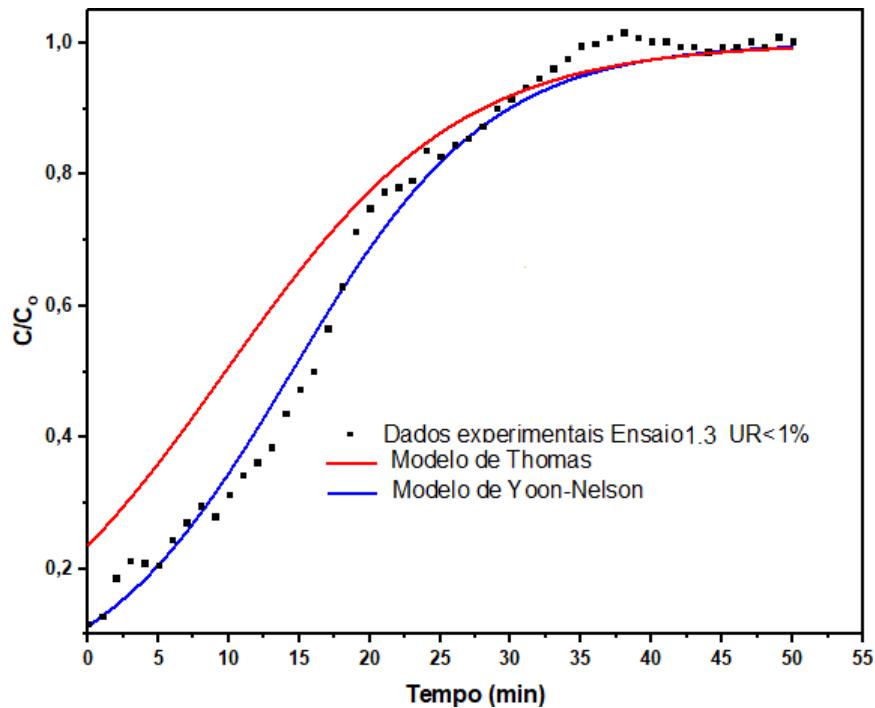
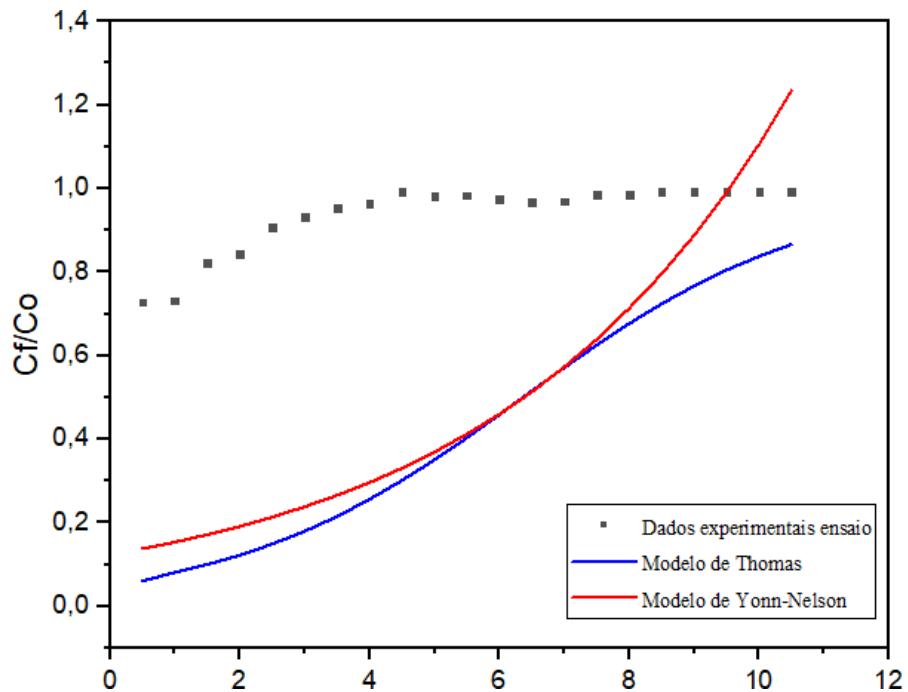


Figura 9 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.1 da cortiça torrificada (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,7170$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,7170$)



4.3.4 Efeito da Vazão na adsorção do formaldeído

A fim de analisar o efeito que a vazão causa no processo de adsorção do formaldeído, foram realizados ensaios com as três biomassas torrificadas e *in natura*. Para as biomassas torrificadas, foram nomeados os ensaios 1.1, 1.2 e 1.3, enquanto que a biomassa *in natura* teve

o ensaio nomeado como 1.0 para fins comparativos. As vazões utilizadas foram de 0,5 e 1,0L/min, mantendo as demais variáveis fixadas. Desta forma, as curvas de *breakthrough* puderam ser obtidas para os ensaios realizados, como mostram as Figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 - Curvas de *breakthrough* obtidas para a Condição Experimental 2 para a casca de amendoim torrificada (a) $Q=0,5$ L/min e b) $Q=1,0$ L/min)

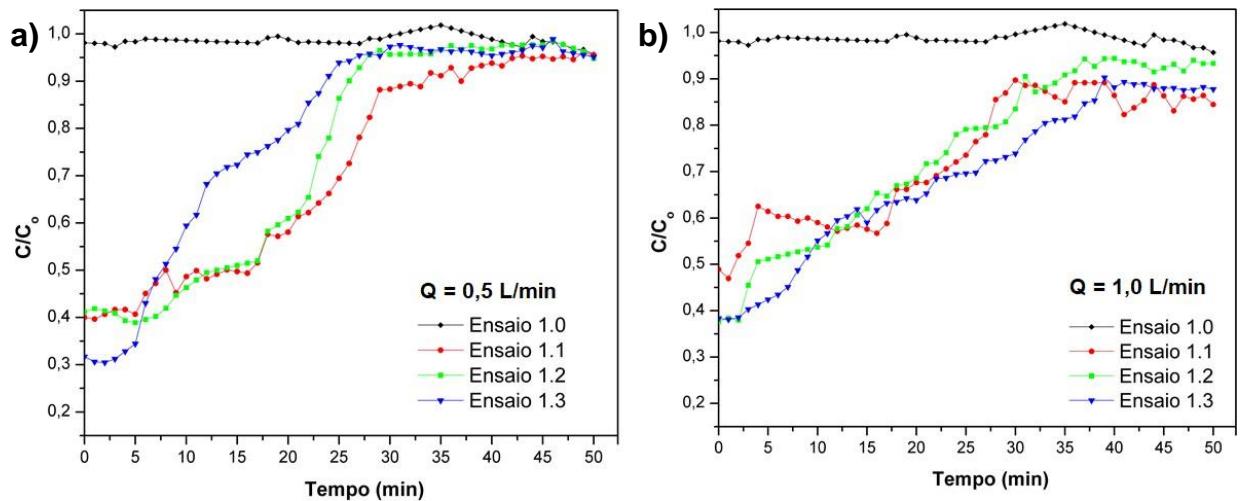


Figura 11 - Curvas de *breakthrough* obtidas para a Condição Experimental 2 para o bagaço de cana torrificado (a) $Q=0,5$ L/min e b) $Q=1,0$ L/min)

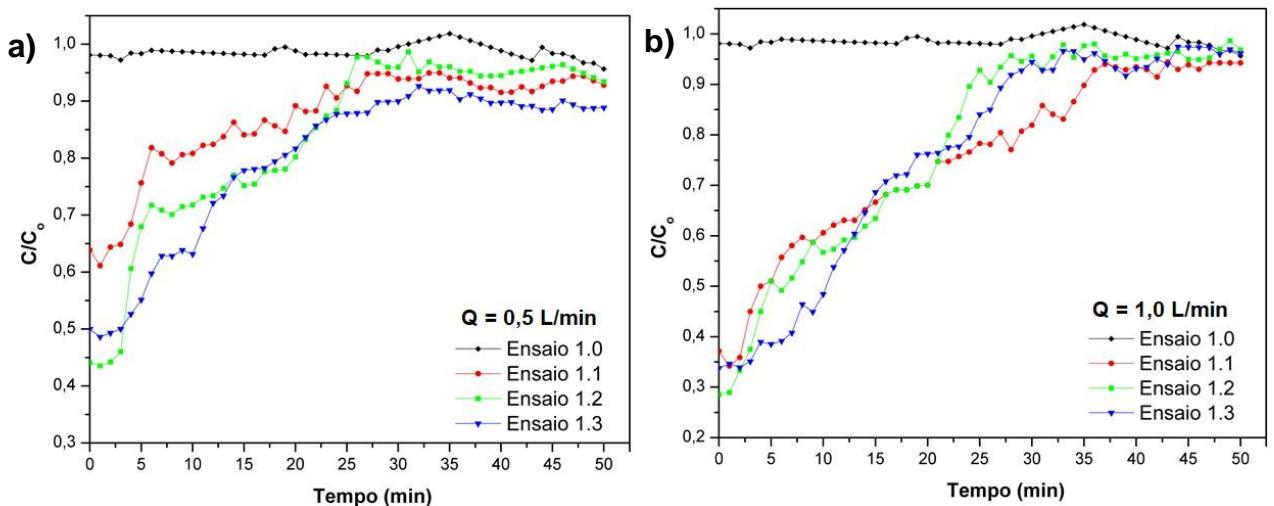
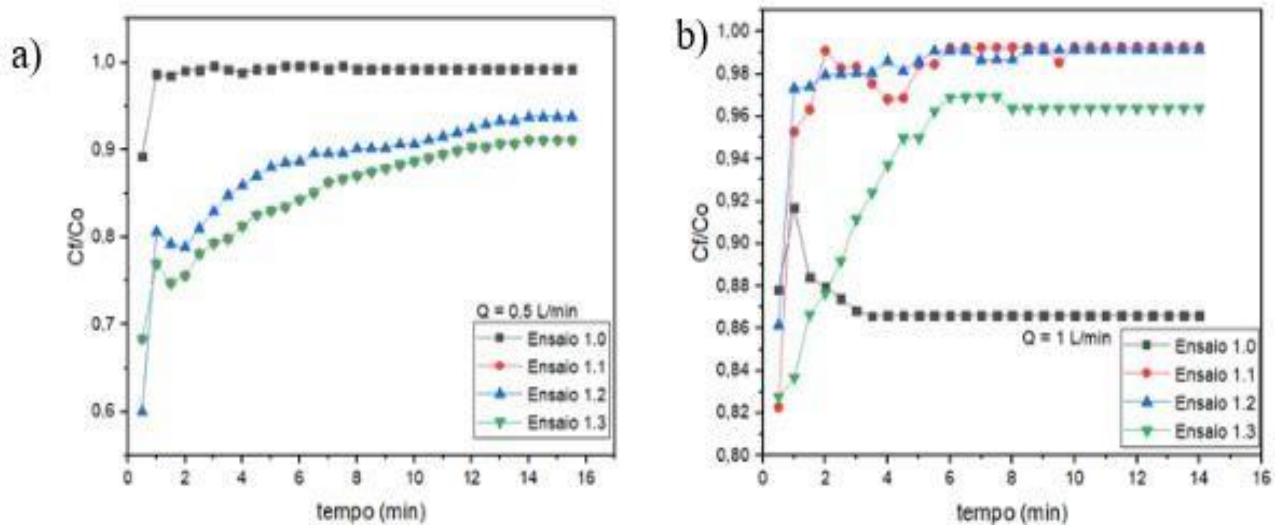


Figura 12 - Curvas de *breakthrough* obtidas para a Condição Experimental 2 para o bagaço de cana torrificado (a) $Q=0,5$ L/min e b) $Q=1,0$ L/min)



Analisando as curvas de ruptura, notou-se um comportamento semelhante aos ensaios cujos resultados foram mostrados anteriormente, entretanto, as justificativas para os ensaios realizados com variação de vazão se devem ao tempo de residência na coluna serem baixos. Nos testes com o bagaço de cana e com a cortiça, a vazão de 0,5 L/min causou um aumento na relação C/C_0 inicial, enquanto que para a casca de amendoim este comportamento não se repetiu. Era esperado que ao diminuir a vazão, a relação C/C_0 inicial fosse menor, devido ao aumento do tempo de residência quando comparada com a vazão de 1 L/min, entretanto este resultado apenas foi obtido para a casca de amendoim.

Na Tabela 4 8 são apresentados os parâmetros extraídos das curvas de *breakthrough* para cada uma das biomassas. Nela é apresentado o tempo de ruptura, o tempo de saturação, as relações C/C_0 no início do ensaio (C/C_0 inicial) e C/C_0 após a saturação do adsorvente (C/C_0 saturação).

Tabela 8 – Parâmetros das curvas de *breakthrough* para a casca de amendoim torrificada, para o bagaço de cana torrificado e para a cortiça torrificada.

	Parâmetros	Casca de amendoim		Bagaço de cana		Cortiça	
		$Q=0,5$	$Q=1,0$	$Q=0,5$	$Q=1,0$	$Q=0,5$	$Q=1,0$
Ensaios 1.1	tempo de ruptura (min)	5,0	2,5	3,0	2,5	0,5	2
	tempo de saturação (min)	29,0	32,5	27,5	36,0	12	8
	C/C_0 inicial	0,42	0,39	0,65	0,36	0,7	0,72
	C/C_0 saturação	0,95	0,89	0,95	0,95	0,9	0,98
	tempo de ruptura (min)	7,0	1,5	2,5	1,5	1,0	2
Ensaios 1.3	tempo de saturação (min)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	C/C_0 saturação	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Ensaios 1.3	tempo de saturação (min)	29,0	37,5	27,0	28,0	13	8
	C/Co inicial	0,4	0,39	0,45	0,29	0,6	0,68
	C/Co saturação	0,98	0,93	0,95	0,96	0,93	0,99
	tempo de ruptura (min)	5,0	2,5	3,0	3,0	0,5	4
	tempo de saturação (min)	27,0	39,0	28,0	30,0	12	8
	C/Co inicial	0,32	0,39	0,50	0,34	0,68	0,82
	C/Co saturação	0,96	0,88	0,90	0,96	0,9	0,96

Nos testes feitos com as biomassas, foi possível identificar um aumento no tempo de ruptura e uma redução no tempo de saturação quando a vazão trabalhada foi de 0,5L/min, deste modo, estes dados podem ser associados a uma redução da cinética de adsorção devido à redução no número de moléculas de formaldeído que chegavam à coluna de leito fixo, diminuindo assim a sua interação.

4.3.5 Determinação da capacidade de adsorção

Na Tabela 9 estão apresentados os valores das capacidades de adsorção para os ensaios realizados com cada uma das amostras, onde pode-se observar que a diminuição da vazão de arraste gerou uma menor capacidade de adsorção dos materiais, sendo associada também à redução de moléculas de formaldeído que chegavam à coluna de leito fixo.

Tabela 9 – Capacidades de adsorção para os ensaios realizados com a casca de amendoim torrificada, com o bagaço de cana torrificado e com a cortiça torrificada.

Casca de amendoim (mg/g)		
Ensaios	Q = 0,5 L/min	Q = 1,0 L/min
Ensaios 1.1	0,0036	0,0046
Ensaios 1.2	0,0023	0,0043
Ensaios 1.3	0,0031	0,0081
Média	0,0030 ± 0,0007	0,0044 ± 0,0002
Bagaço de cana (mg/g)		
Ensaios	Q = 0,5 L/min	Q = 1,0 L/min
Ensaios 1.1	0,0021	0,0064
Ensaios 1.2	0,0039	0,0083
Ensaios 1.3	0,0029	0,0073
Média	0,0030 ± 0,0009	0,0073 ± 0,0010
Cortiça (mg/g)		
Ensaios	Q = 0,5 L/min	Q = 1,0 L/min
Ensaios 1.1	0,0006	0,00038
Ensaios 1.2	0,0009	0,00047
Ensaios 1.3	0,0011	0,00046

Média	$0,0008 \pm 0,0004$	$0,00044 \pm 0,00006$
-------	---------------------	-----------------------

4.3.6 Ajuste das curvas de breakthrough aos modelos matemáticos

Para o ajuste dos dados experimentais aos modelos linearizados de Thomas e Yonn-Nelson, foi novamente utilizado o software OriginPro 2019, obtendo assim os parâmetros de Thomas (K_{Th} e q_{Th}) e de Yonn-Nelson (K_{YN} e τ). Nas Tabelas 10 e 11 encontram-se os dados de ajuste e parâmetros dos modelos.

Tabela 10 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com a casca de amendoim

Casca de amendoim	Thomas				Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)
Ensaio 1.1 Q=1 L/min	0,9043	0,8178	0,0435	0,0041		0,7739	0,0570	3,2035	0,0036
Ensaio 1.2 Q=1 L/min	0,9810	0,9624	0,0494	0,0042		0,9624	0,0719	7,1196	0,0047
Ensaio 1.3 Q=1 L/min	0,9834	0,9671	0,0595	0,0069		0,9574	0,0561	8,6970	0,0071

Tabela 11 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com o bagaço de cana

Bagaço de cana	Thomas					Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)	
Ensaio 1.1 Q=1 L/min	0,9755	0,9478	0,0463	0,0041	0,9778	0,9501	0,0643	5,2380	0,0053	
Ensaio 1.2 Q=1 L/min	0,9738	0,9419	0,0631	0,0082	0,9599	0,9178	0,1095	7,3333	0,0075	
Ensaio 1.3 Q=1 L/min	0,9875	0,9710	0,0560	0,0074	0,9877	0,9754	0,1019	8,8911	0,0073	

Tabela 12 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com a cortiça

Cortiça	Thomas					Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)	
Ensaio 1.1 Q=1 L/min	0,8467	0,717	0,1590	0,0095	0,8467	0,717	0,2195	9,5417	0,0095	
Ensaio 1.2 Q=1 L/min	0,8236	0,6783	0,0915	0,0214	0,8236	0,6783	0,2086	10,9626	0,0214	
Ensaio 1.3 Q=1 L/min	0,7966	0,6346	0,0841	0,01820	0,7966	0,6346	0,1396	12,1647	0,0182	

Tendo em vista que os valores de R^2 foram considerados baixos, entre 0,71 e 0,97, tem-se que o ajuste aos modelos, experimentais e de Thomas e Yonn-Nelson não foram satisfatórios. É possível analisar também que, para valores com R^2 próximo a 0,97 os valores dos parâmetros dos modelos matemáticos foram mais próximos do experimental, enquanto que, para valores de R^2 menores, a diferença entre os valores é perceptível. Já para as constantes cinéticas, seus valores podem ser considerados próximos, indicando uma cinética de adsorção quase semelhante para a casca de amendoim e para o bagaço de cana, entretanto ambas diferindo da cortiça, que teve valores para as constantes cinéticas levemente maiores.

Na Figura 13, Figura 14 e Figura 15, são expostas as curvas de *breakthrough* para os modelos ajustados aos dados experimentais que mostraram maior correlação (R^2) para os dados analisados da casca de amendoim (Ensaio 1.3), do Bagaço de Cana (Ensaio 1.1) e da Cortiça (Ensaio 1.1). Analisando as curvas foi possível visualizar o ajuste que ambos os modelos apresentaram aos dados experimentais.

Figura 13 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.3 da casca de amendoim torrificada (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,9624$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,9624$)

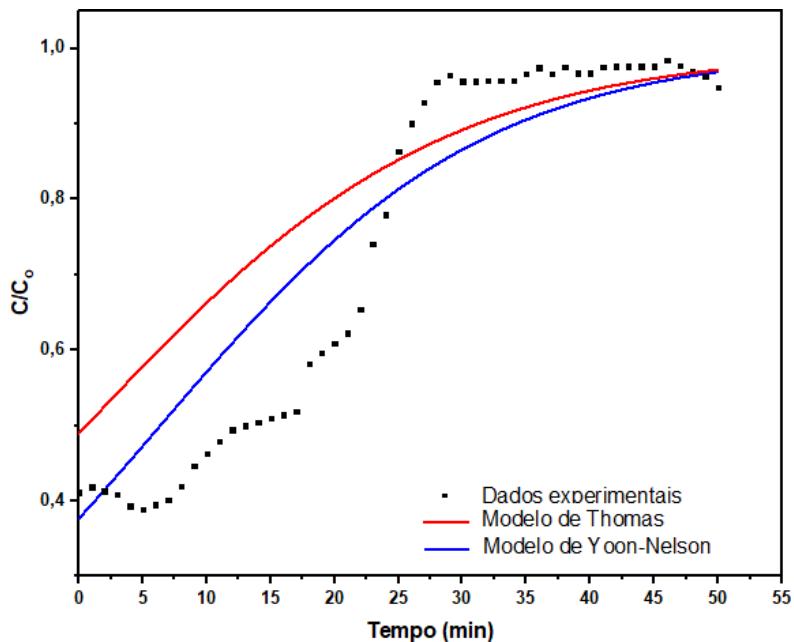


Figura 14 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.1 do bagaço de cana torrificado (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,9710$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,9754$)

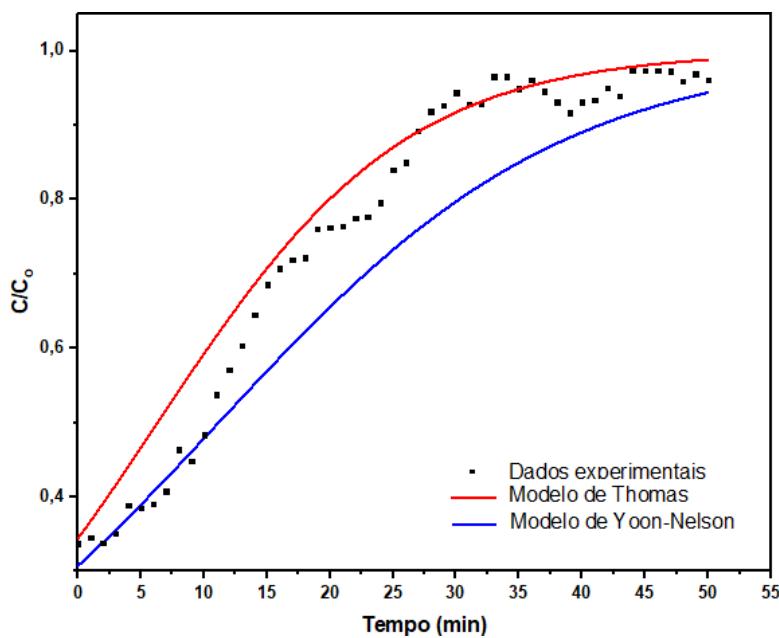
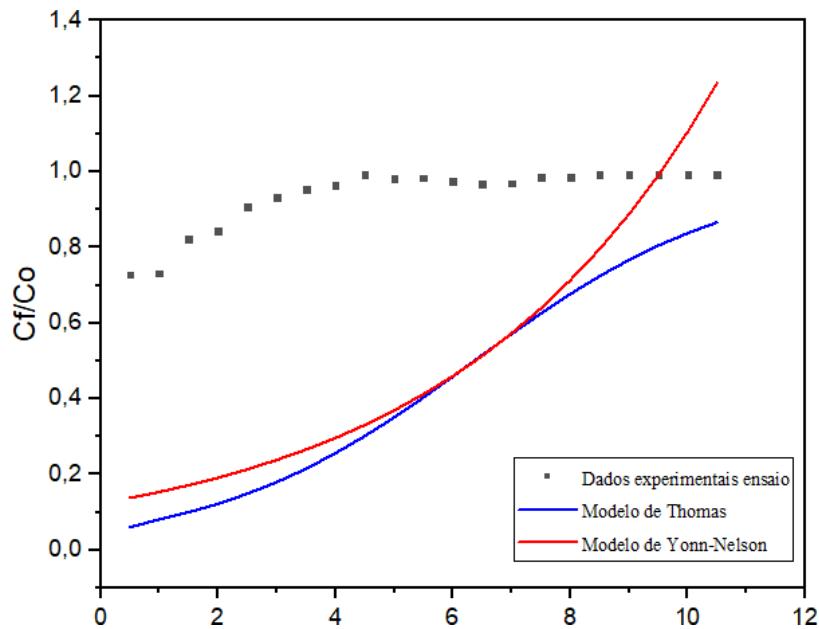


Figura 14 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.1 da cortiça torrificada (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,717$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,717$)



4.3.7 Efeito da concentração inicial na adsorção do formaldeído

A fim de analisar o efeito que a concentração inicial causa no processo de adsorção do formaldeído, foram realizados ensaios com as três biomassas torrificadas e *in natura*. Para as biomassas torrificadas, foram nomeados os ensaios 1.1, 1.2 e 1.3, enquanto que a biomassa *in natura* teve o ensaio nomeado como 1.0 para fins comparativos. As concentrações iniciais utilizadas foram entre 0,5 – 1,0ppm (baixa) e entre 1,0 – 2,5ppm (alta), mantendo as demais

variáveis fixadas. Desta forma, as curvas de *breakthrough* puderam ser obtidas para os ensaios realizados

Figura 15 - Curvas de *breakthrough* obtidas para a casca de amendoim torrificada

a) C_o baixa e b) C_o alta

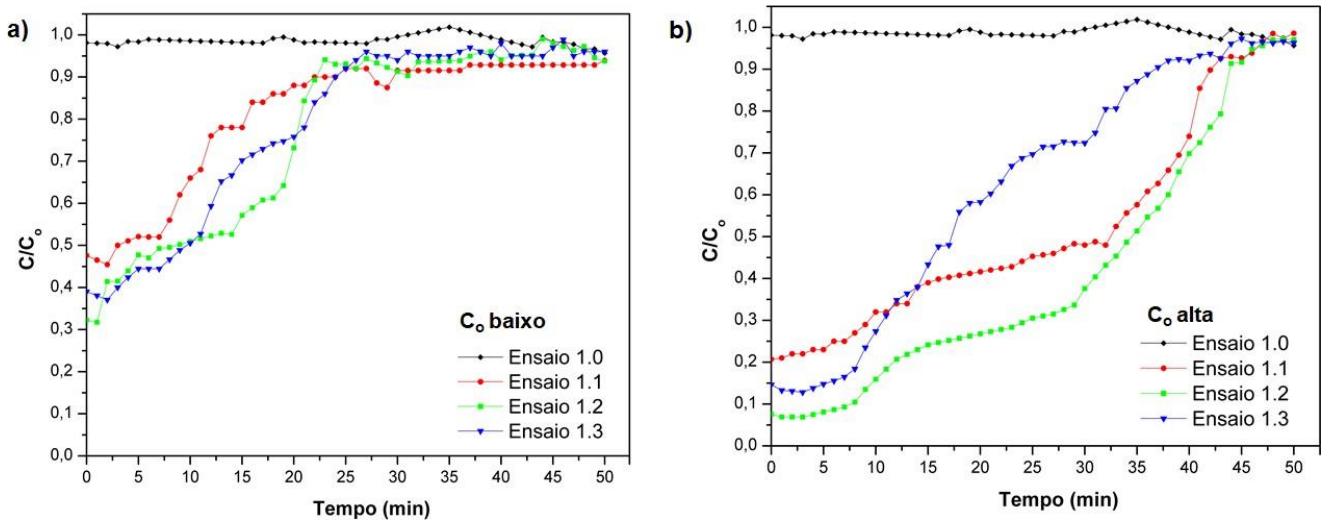


Figura 162 - Curvas de *breakthrough* obtidas para o bagaço de cana torrificado

a) C_o baixa, b) e C_o alta

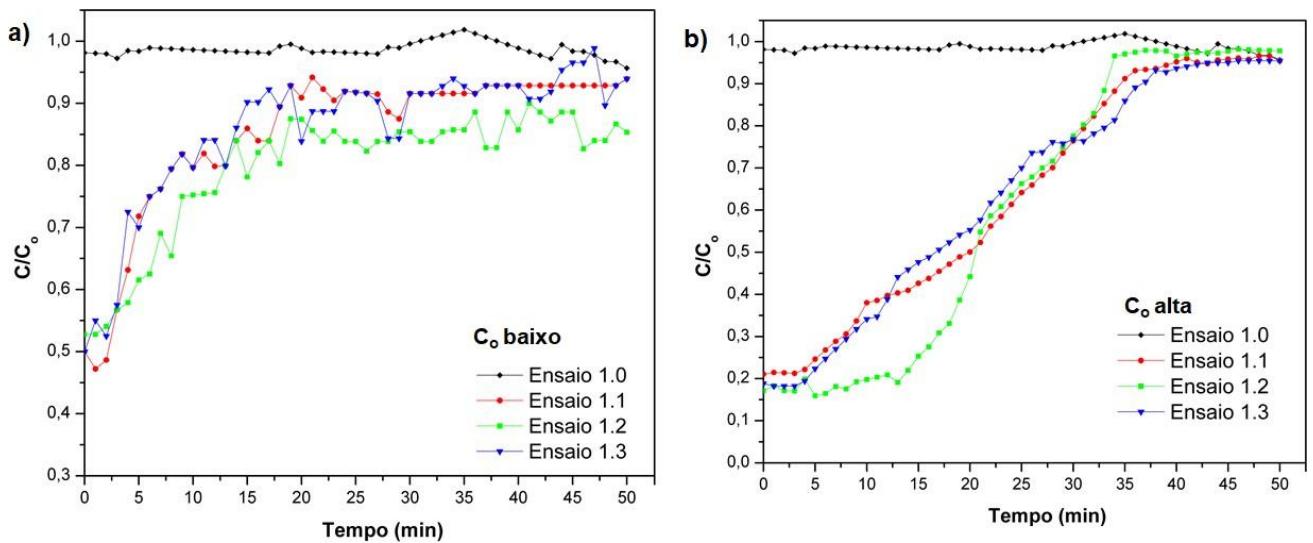
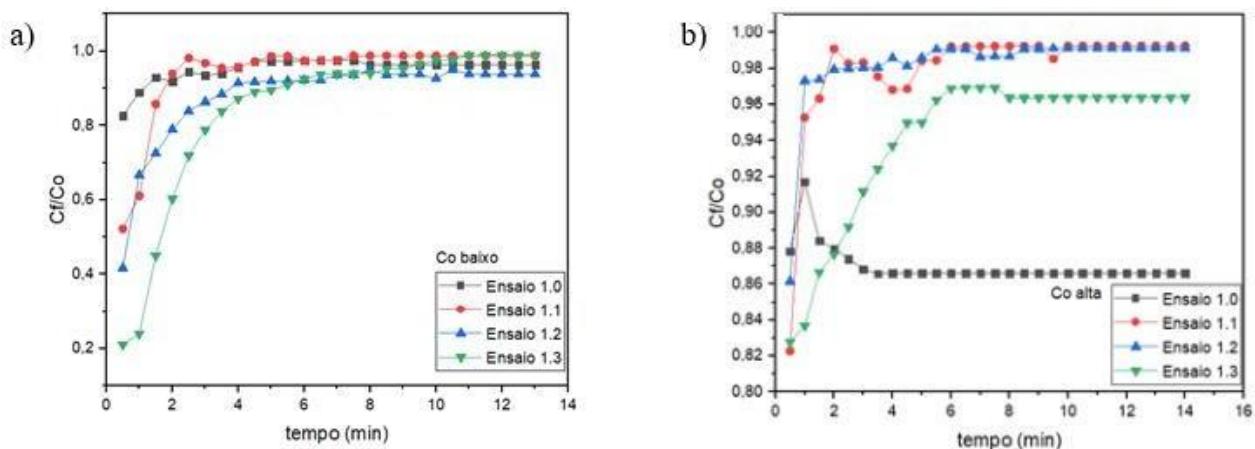


Figura 17 – Curvas de *breakthrough* obtidas para a cortiça torrificada

a) C_0 baixa, b) C_0 alta



Analisando as curvas de ruptura, nota-se que a redução da concentração inicial trouxe um aumento da relação $C/C_{0\text{ inicial}}$, mostrando uma diminuição na eficiência da capacidade de adsorção. Além disso, as curvas com concentração inicial baixa promoveram curvas de ruptura com declividade mais acentuada, atingindo o ponto de ruptura mais rapidamente, enquanto que para concentração inicial alta as curvas tiveram características mais alongadas e um tempo maior para atingir o ponto de ruptura. Este comportamento foi o oposto dos resultados encontrados na literatura, sabendo que com o aumento do número de moléculas de formaldeído na coluna de leito fixo, a saturação do adsorvente tende a ocorrer mais rápido.

Na Tabela 4 12 são apresentados os parâmetros extraídos das curvas de *breakthrough* para cada uma das biomassas. Nela é apresentado o tempo de ruptura, tempo de saturação, a C/C_0 no início do ensaio ($C/C_{0\text{ inicial}}$) e a C/C_0 após a saturação do adsorvente ($C/C_{0\text{ saturação}}$).

Tabela 121 – Parâmetros das curvas de *breakthrough* para a casca de amendoim torrificada, para o bagaço de cana torrificado e para a cortiça torrificada

Parâmetros	Casca de amendoim		Bagaço de cana		Cortiça	
	C_0 baixa	C_0 alta	C_0 baixa	C_0 alta	C_0 baixa	C_0 alta
Ensaios 1.1 e 1.2	tempo de ruptura (min)	1,0	7,0	1,5	4,0	0,5
	tempo de saturação (min)	27,5	42	18	35	9
	C/C_0 inicial	0,48	0,20	0,5	2,2	0,21
	C/C_0 saturação	0,92	0,98	0,92	0,95	0,99
	tempo de ruptura (min)	2,0	8,0	2,5	5,0	0,5

Ensaio 1.3	tempo de saturação (min)	22,5	44	22	37,5	7	8
	C/Co inicial	0,33	0,08	0,65	1,9	0,41	0,68
	C/Co saturação	0,95	0,97	0,86	0,95	0,94	0,99
	tempo de ruptura (min)	2,0	8,0	2,5	4,0	0,5	4
	tempo de saturação (min)	27,5	46	18	33,5	6	8
	C/Co inicial	0,40	0,15	0,5	1,9	0,52	0,82
	C/Co saturação	0,93	0,96	0,92	0,95	0,99	0,96

4.3.8 Determinação da capacidade de adsorção

Na Tabela estão apresentados os valores das capacidades de adsorção para os ensaios realizados com cada uma das amostras, onde pode-se observar que a redução da concentração inicial de formaldeído provocou uma grande diminuição na capacidade de adsorção para a casca de amendoim, para o bagaço de cana e para a cortiça, logo, mesmo a curva de *breakthrough* tendo divergido da literatura, a capacidade de adsorção mostrou-se semelhante, com valores menores em concentrações mais baixas.

Tabela 132 – Capacidades de adsorção para os ensaios realizados com a casca de amendoim torrificada, com o bagaço de cana torrificado e com a cortiça torrificada

Casca de amendoim (mg/g)		
Ensaios	C ₀ baixa	C ₀ alta
Ensaio 1.1	0,0016	0,0106
Ensaio 1.2	0,0040	0,0194
Ensaio 1.3	0,0041	0,0108
	0,0040 ± 0,0001	0,0107 ± 0,0001
Bagaço de cana (mg/g)		
Ensaios	C ₀ baixa	C ₀ alta
Ensaio 1.1	0,0010	0,0087
Ensaio 1.2	0,0011	0,0106
Ensaio 1.3	0,0015	0,0079
	0,0012 ± 0,003	0,0091 ± 0,0014
Cortiça (mg/g)		
Ensaios	C ₀ baixa	C ₀ alta
Ensaio 1.1	0,0010	0,00038
Ensaio 1.2	0,0011	0,00047
Ensaio 1.3	0,0020	0,00046
	0,0014 ± 0,005	0,00044 ± 0,00006

4.3.9 Ajuste das curvas de breakthrough aos modelos matemáticos

Para o ajuste dos dados experimentais aos modelos linearizados de Thomas e Yonn-Nelson, foi novamente utilizado o software OriginPro 2019, obtendo assim os parâmetros de Thomas (K_{Th} e q_{Th}) e de Yonn-Nelson (K_{YN} e τ). Nas Tabelas 14 e 15 encontram-se os dados de ajuste e parâmetros dos modelos.

Tabela 143 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com a casca de amendoim

Casca de amendoim	Thomas				Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)
Ensaio 1.1 C₀ alta	0,9198	0,8461	0,0294	0,0132	0,9202	0,8468	0,0643	5,2379	0,0052
Ensaio 1.2 C₀ alta	0,9771	0,9547	0,0358	0,0241	0,9761	0,9528	0,0719	7,1196	0,0071
Ensaio 1.3 C₀ alta	0,9924	0,9849	0,0699	0,0100	0,9953	0,9866	0,1148	18,4286	0,0108

Tabela 154 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com o bagaço de cana

Bagaço de cana	Thomas					Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)	
Ensaio 1.1 C₀ alta	0,9747	0,9501	0,0747	0,0112	0,9910	0,9821	0,0831	17,9290	0,0091	
Ensaio 1.2 C₀ alta	0,9325	0,8695	0,1047	0,0119	0,9761	0,9528	0,0719	34,5596	0,0115	
Ensaio 1.3 C₀ alta	0,9926	0,9853	0,0872	0,0102	0,9953	0,9866	0,1148	18,4285	0,0083	

Tabela 165 – Parâmetros do ajuste dos dados experimentais aos modelos de curvas de *breakthrough* para os ensaios realizados com a cortiça

Bagaço de cana	Thomas					Yoon-Nelson				
	R	R ²	K _{Th} (m ³ /mg. min)	q _{Th} (mg/g)	R	R ²	K _{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	q _{YN} (mg/g)	
Ensaio 1.1 C₀ alta	0,8467	0,717	0,1590	0,0095	0,8467	0,717	0,2195	9,5417	0,0095	
Ensaio 1.2 C₀ alta	0,8236	0,6783	0,0915	0,0214	0,8236	0,6783	0,2086	10,9626	0,0214	
Ensaio 1.3 C₀ alta	0,7966	0,6346	0,0841	0,01820	0,7966	0,6346	0,1396	12,1647	0,0182	

O grau de ajuste entre os dados experimentais e os modelos matemáticos, foi considerado razoável, tendo em vista que os valores de R^2 obtidos foram entre 0,85 – 0,99. Observa-se que os valores de q_{YN} e q_{Th} foram próximos dos valores experimentais apenas nos ensaios onde o R^2 foi aproximadamente 0,99. Deste modo, comparando os valores de K_{Th} e K_{YN} , pode-se observar que o bagaço de cana apresentou resultados levemente superiores aos da casca de amendoim.

Na Figura 18, na Figura 19 e na Figura 20 são expostas as curvas de *breakthrough* para os modelos ajustados aos dados experimentais que mostraram maior correlação (R^2) para os dados analisados da casca de amendoim (Ensaio 1.3), do Bagaço de Cana (Ensaio 1.3) e da Cortiça (Ensaio 1.1). Analisando as curvas é possível visualizar o ajuste que os modelos tiveram com os dados experimentais.

Deste modo, tendo os melhores valores de capacidade de adsorção sido em uma C_o alta (1,0 – 2,5 ppm), as condições experimentais admitidas como ótimas foram: $UR < 1\%$, $Q = 1,0\text{L}/\text{min}$ e C_o alta (1,0–2,5ppm).

Figura 18 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.3 da casca de amendoim torrificada (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,9853$; Modelo de Yoon-Nelson – $R^2 = 0,9866$)

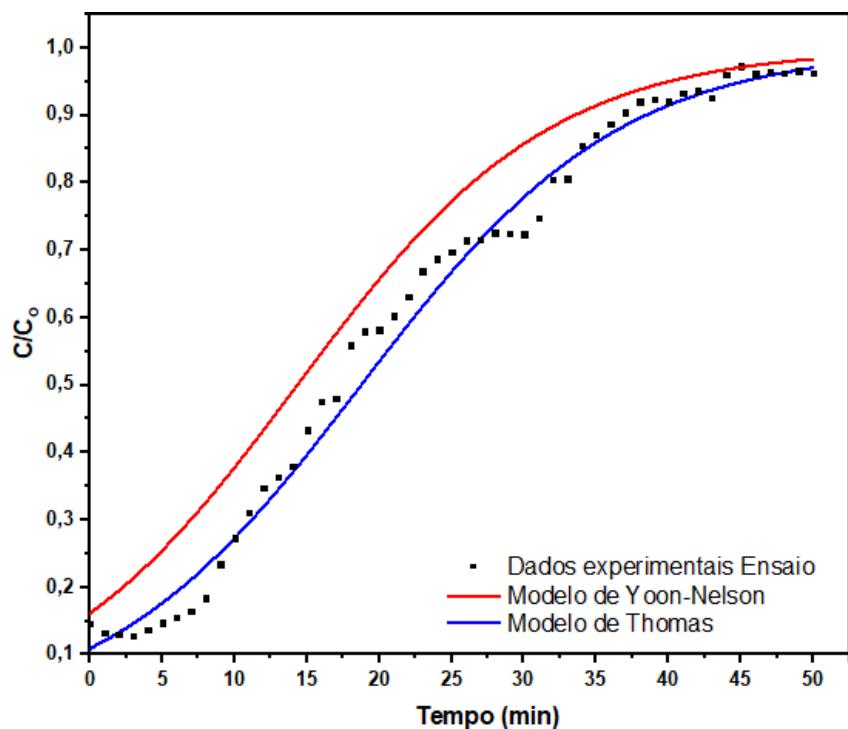


Figura 19 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.3 do bagaço de cana torrificado (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,9710$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,9754$)

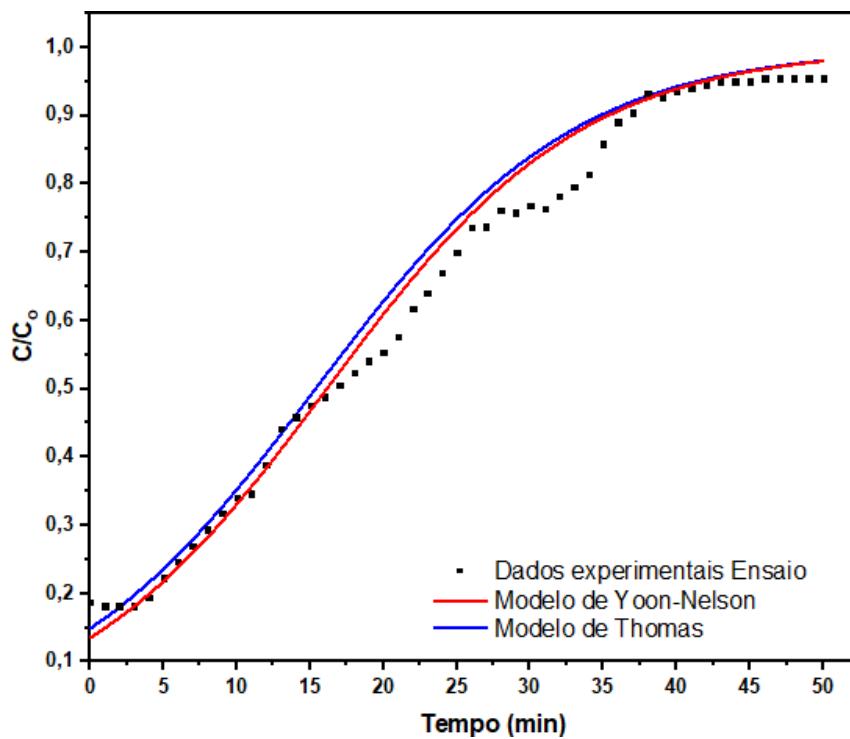
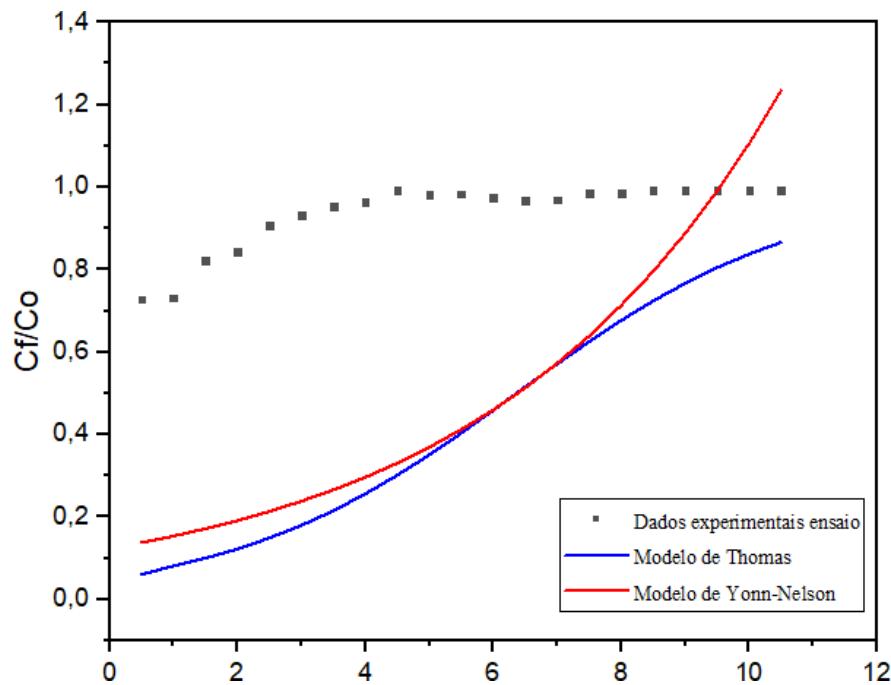


Figura 20 – Curvas de *breakthrough* teóricas e experimental para o Ensaio 1.3 da cortiça torrificada (Modelo de Thomas - $R^2 = 0,717$; Modelo de Yonn-Nelson – $R^2 = 0,717$)



Analizando os resultados obtidos, foi possível identificar como as condições experimentais analisadas e adotadas como ótimas nos ensaios foram determinantes para maiores valores de capacidade de adsorção das biomassas torrificadas utilizadas nesta pesquisa.

Os dados completos acerca dos ensaios realizados encontram-se no Apêndice 1.

5. Conclusões

Os testes de adsorção realizados em coluna de leito fixo com biomassas torrificadas e *in natura* permitiram a avaliação dos efeitos provocados no processo quando as variáveis testadas foram alteradas, desta forma, pôde-se concluir, a partir das curvas de *breakthrough* construídas e ajustadas aos modelos matemáticos de Thomas e Yoon-Nelson, que os valores ótimos para os ensaios ocorreram com umidade relativa <1%, vazão de arraste de 1L/min e com concentração inicial de formaldeído considerada alta, na faixa de 1,0 – 2,5 ppm.

Além disso, foi possível a constatação da eficiência no processo de adsorção ao modificar termicamente as biomassas utilizadas, tendo em vista que a capacidade adsorptiva dos materiais *in natura* foram desprezíveis nas condições avaliadas, enquanto que para a biomassa torrificada houver a adsorção, sendo de 0,0106 – 0,0108 mg/g para a casca de amendoim e 0,079 – 0,0106 mg/g para o bagaço de cana.

Entretanto, mais estudos são necessários para identificar a verdadeira capacidade de adsorção destas biomassas para o formaldeído em ambientes interiores, pois sua concentração normalmente encontrada é inferior a 1 ppm e os resultados dos testes para baixas concentrações de C_0 não obtiveram uma capacidade de adsorção elevada.

6. Perspectivas de futuros trabalhos

Para os trabalhos que seguirão nesta mesma linha de pesquisa, torna-se interessante o estudo sobre a dessorção do formaldeído nos materiais utilizados e sua posterior eficiência nos testes, a fim de comparar o desempenho dos adsorventes utilizados após alguns ciclos.

Recomenda-se também a utilização de um sensor conectado diretamente na fonte de geração de formaldeído, de modo que torne possível o acompanhamento da concentração de formaldeído antes de passar pela coluna de adsorção e após passar pela coluna de adsorção, para que haja um maior controle de equilíbrio do sistema.

Como última recomendação, é sugerida a realização de testes em condições de trabalho diferentes das utilizadas (temperatura, vazão, concentração e umidade relativa),

abrangendo uma faixa maior de dados a serem analisados, permitindo assim uma caracterização mais completa dos materiais estudados.

7. Referências bibliográficas

ALVES, C. A.; ACIOLE, S. D. G. FORMALDEÍDO EM ESCOLAS: UMA REVISÃO. *Química Nova*, v. 35, n. 10, p. 2025–2039, 2012.

BERTON, R. P. **Análise Teórica Comparativa de Eficiência Energética de Sistemas Integrados para Pirólise Rápida de Biomassa Análise Teórica Comparativa de Eficiência Energética de Sistemas Integrados para Pirólise Rápida de Biomassa.** 2012.

BRUM, S. S. Caracterização E Modificação Química De Resíduos Sólidos Do Beneficiamento Do Café Para Produção De Novos Materiais. p. 152, 2007.

CARPINÉ, D. **Recuperação do Aroma Álcool Feniletílico por Adsorção em Batelada e em Coluna.** 2011. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Tecnologia de Alimentos.

CARVALHO, M. H. A. **Avaliação da Qualidade do Ar Interior em Ambientes Acadêmicos: um estudo de caso.** 2016. Tese de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Gestão Pública.

COSTA, F. F.; COSTA, M. Evaluation of Particle Fragmentation of Raw and Torrified Biomass in a Drop Tube Furnace. *Physics Procedia*, v. 66, p. 277–280, 2015.

CUSSELER, E. L. **Difusion: mass transfer in fluid systems.** v. 2, p. 580, 1997.

FREUNDLICH, H. **Über die adsorption in losungen.** v. único, p 385 – 470, 1906.

KHAN, F. I.; KR. GHOSHAL, A. Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 13, n. 6, p. 527–545, 2000

KLEINÜBING, S. J. **Remoção de cádmio, chumbo e cobre utilizando zeólita natural clinoptilolita em coluna de leito fixo.** Tese de Mestrado. UNICAMP, 2006.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 1918.

LU, C.; PAN, L.; ZHU, B. **Study the Static Adsorption / Desorption of Formaldehyde**

on Activated Carbons. n. Ifeesm, p. 943–947, 2015.

MEDEIROS, A. C. D. S. Preparo e Uso de Soluções Salinas Saturadas para a Caracterização Fisiológica de Sementes Florestais. Circular Técnica Embrapa, v. 125, p. 1–4, 2006

NASCIMENTO, R. F. DO; NETO, V. DE O. S.; MELO, D. DE Q. Uso de bioadsorventes lignocelulósicos na remoção de poluentes de efluentes aquosos.

Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NASCIMENTO et al., Adsorção – Aspectos teóricos e aplicações ambientais.

Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

PEREIRA, E. et al. Preparation of activated carbon at low carbonization temperatures: Utilization of FeCl₃ as an alternative activating agent. *Química Nova*, v. 31, n. 6, p. 1296–1300, 2008.

RUTHVEN, D. M. Principles of adsorption and adsorption processes, v. único, p. 433, 1984.

SEKAR, M. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead (II) onto activated carbon prepared from coconut shell, v. 279, p 307 – 313, 2004.

8. Outras atividades

- 10 a 13 de julho de 2018 – Participação no V Congresso Baiano de Engenharia Ambiental e Sanitária, com carga horária de 20hs.
- Publicação do artigo: Diagnóstico dos impactos ambientais provenientes de ações antrópicas no Morro do Urubu, Aracaju –SE em E-book no V Congresso Baiano de Engenharia Ambiental e Sanitária.
- Publicação do artigo: Diagnóstico dos impactos ambientais provenientes de ações antrópicas no Morro do Urubu, Aracaju –SE no livro digital “Engenharia Sanitária e Ambiental: Tecnologias para a Sustentabilidade 2” da Atena Editora, com previsão de publicação para abril de 2019.
- 7 de novembro de 2018 – Participação na V SEMAC – 28º EIC/COPES como atividade de extensão, coordenado pela professora Raquel Simões Mendes Netto com carga horária de 4hs, promovida pela coordenação de pesquisa.

Código de verificação: a964a9f913

Número do documento: 487206

- 5 a 7 de novembro de 2018 – Participação na atividade de extensão V SEMAC – 28º EIC/COPES como monitora do evento, com carga horária de 20hs.
- Participação na EASY Jr Soluções Ambientais – Início em janeiro de 2019 até a presente data.
- Curso de Empreendedorismo Ambiental ministrado pela Envipro Soluções e Treinamentos, com carga horária de 16hs

APÊNDICE 1 – Dados dos ensaios de adsorção realizados

Tabela 1.1 – Dados dos Ensaios de adsorção para a variação da Umidade Relativa

Parâmetros	Condição Experimental 1											
	UR60%						UR<1%					
	Casca de amendoim			Bagaço de cana			Casca de amendoim			Bagaço de cana		
	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3
Q (L/min)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Co (ppm)	1,50 ± 0,14	1,75 ± 0,46	1,54 ± 0,18	1,47 ± 0,05	1,66 ± 0,10	1,71 ± 0,15	1,30 ± 0,15	1,71 ± 0,24	1,71 ± 0,15	1,08 ± 0,15	1,27 ± 0,17	1,06 ± 0,23
tempo de ruptura (min)	2,0	2,5	2,5	2,0	0,0	0,5	2,5	2,0	3,0	4,0	5,0	3,0
tempo de saturação (min)	27,0	21,5	16,5	31,0	24,0	35,0	24,0	20,0	22,5	31,5	33,5	28,0
C/Co inicial	0,53	0,58	0,58	0,05	0,04	0,12	0,30	0,40	0,47	0,25	0,29	0,20
C/Co saturação	0,88	0,85	0,95	0,92	0,92	1,0	0,95	0,94	0,94	0,96	0,98	0,98
q experimental	0,0079	0,0069	0,0058	0,0049	0,0046	0,0039	0,0089	0,0074	0,0078	0,0087	0,0141	0,0105
R² (Modelo de Thomas)	-	-	-	-	-	-	0,9704	0,9596	0,9905	0,984	0,7754	0,9069
K_{Th}	-	-	-	-	-	-	0,0794	0,1085	0,0988	0,1098	0,0686	0,1524
q_{Th}	-	-	-	-	-	-	0,0082	0,0066	0,0071	0,0096	0,0164	0,0087
R² (Modelo de Yoon-Nelson)	-	-	-	-	-	-	0,9572	0,9545	0,9831	0,984	0,9529	0,9862
K_{YN}	-	-	-	-	-	-	0,1206	0,1267	0,1581	0,1206	0,1267	0,1581
τ	-	-	-	-	-	-	11,9204	12,4467	10,6882	11,9204	12,4467	10,6882
q_{YN}	-	-	-	-	-	-	0,0078	0,0082	0,0071	0,0081	0,0100	0,0087

Parâmetros	UR60%			UR<1%		
	Cortiça					
	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3
Q (L/min)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Co (ppm)	2,07 ± 0,19	2,21 ± 0,24	2,70 ± 0,28	1,66 ± 0,23	2,28 ± 0,21	1,38 ± 0,19
tempo de ruptura (min)	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	4,0
tempo de saturação (min)	6,5	11,0	6,5	8,0	8,0	8,0
C/Co inicial	0,82	0,79	0,88	0,72	0,68	0,82
C/Co saturação	0,98	0,95	0,99	0,98	0,99	0,96
q experimental				0,0049	0,0046	0,0039
R² (Modelo de Thomas)	-	-	-	0,717	0,6783	0,6346
K_{Th}	-	-	-	0,1590	0,0915	0,0841
q_{Th}	-	-	-	0,0095	0,0214	0,0182
R² (Modelo de Yoon-Nelson)	-	-	-	0,717	0,6783	0,6346
K_{YN}	-	-	-	0,2195	0,2086	0,1396
τ	-	-	-	9,5417	10,9626	12,1647
q_{YN}	-	-	-	0,0095	0,0214	0,0182

Tabela 1.2 – Dados dos Ensaios de adsorção para a variação da Vazão de Arraste

Parâmetros	Condição Experimental 2											
	Q = 0,5 L/min						Q = 1,0 L/min					
	Casca de amendoim			Bagaço de cana			Casca de amendoim			Bagaço de cana		
	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3
UR %	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,0	1,0
Co (ppm)	1,81 ± 0,11	1,10 ± 0,25	1,25 ± 0,08	1,64 ± 0,65	1,66 ± 0,84	1,96 ± 1,15	1,76 ± 0,45	1,50 ± 0,14	1,70 ± 0,15	0,97 ± 0,15	1,27 ± 0,17	1,06 ± 0,23
densidade de empacotamento (g/cm³)	0,0593	0,0593	0,0593	0,0480	0,0480	0,0480	0,0593	0,0593	0,0593	0,0480	0,0480	0,0480
tempo de ruptura (min)	5,0	7,0	5,0	3,0	2,5	3,0	2,5	1,5	2,5	2,5	5,0	3,0
tempo de saturação (min)	29,0	29,0	27,0	32,5	37,5	39,0	27,5	27,0	28,0	36,0	33,5	28,0
C/Co inicial	0,42	0,40	0,32	0,39	0,39	0,39	0,65	0,45	0,50	0,36	0,29	0,20
C/Co saturação	0,95	0,98	0,96	0,89	0,93	0,88	0,95	0,95	0,90	0,95	0,98	0,98
q experimental	0,0036	0,0023	0,0031	0,0021	0,0039	0,0029	0,0046	0,0043	0,0081	0,0064	0,0141	0,0105
R² (Modelo de Thomas)	-	-	-	-	-	-	0,8178	0,9624	0,9671	0,9478	0,7754	0,9069
K_{Th}	-	-	-	-	-	-	0,0435	0,0494	0,0595	0,0463	0,0686	0,1524
q_{Th}	-	-	-	-	-	-	0,0041	0,0042	0,0069	0,0041	0,0164	0,0087
R² (Modelo de Yoon-Nelson)	-	-	-	-	-	-	0,7739	0,9624	0,9574	0,9501	0,9529	0,9862
K_{YN}	-	-	-	-	-	-	0,057	0,0719	0,0561	0,0643	0,1267	0,1581
τ	-	-	-	-	-	-	3,2035	7,1196	8,697	5,238	12,4467	10,6882
q_{YN}	-	-	-	-	-	-	0,0036	0,0047	0,0071	0,0053	0,0100	0,0087

Tabela 1.2 – Dados dos Ensaios de adsorção para a variação da Vazão de Arraste

	Q = 0,5 L/min			Q = 1,0 L/min		
	Cortiça					
	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3
UR %	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Co (ppm)	2,47 ± 0,13	2,24 ± 0,22	2,47 ± 0,10	1,66 ± 0,23	2,28 ± 0,21	1,38 ± 0,19
tempo de ruptura (min)	0,5	1,0	0,5	3,0	2,5	3,0
tempo de saturação (min)	12,0	13,0	12,0	32,5	37,5	39,0
C/Co inicial	0,7	0,6	0,68	0,72	0,68	0,82
C/Co saturação	0,9	0,93	0,9	0,98	0,99	0,96
q experimental	0,0006	0,0009	0,0011	0,00038	0,00047	0,00046
R² (Modelo de Thomas)	-	-	-	0,717	0,6783	0,6346
K_{Th}	-	-	-	0,1590	0,0915	0,0841
q_{Th}	-	-	-	0,0095	0,0214	0,01820
R² (Modelo de Yoon-Nelson)	-	-	-	0,717	0,6783	0,6346
K_{YN}	-	-	-	0,2195	0,2086	0,1396
τ	-	-	-	9,5417	10,9626	12,1647
q_{YN}	-	-	-	0,0095	0,0214	0,0182

Tabela 1.3 – Dados dos Ensaios de adsorção para a variação da Concentração Inicial

Parâmetros	Condição Experimental 3											
	C_o baixa						C_o alta					
	Casca de amendoim			Bagaço de cana			Casca de amendoim			Bagaço de cana		
	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3
UR %	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
C_o (ppm)	0,84 ± 0,17	0,67 ± 0,50	0,77 ± 0,18	0,64 ± 0,25	0,59 ± 0,18	0,86 ± 0,19	1,12 ± 0,16	1,70 ± 0,17	1,12 ± 0,16	1,44 ± 0,19	1,44 ± 0,09	1,94 ± 0,25
densidade de empacotamento (g/cm^3)	0,0593	0,0593	0,0593	0,0480	0,0480	0,0480	0,0749	0,0749	0,0749	0,0886	0,0886	0,0886
tempo de ruptura (min)	1,0	2,0	2,0	1,5	2,5	2,5	7,0	8,0	8,0	4,0	5,0	4,0
tempo de saturação (min)	27,5	22,5	27,5	18,0	22,0	18,0	42,0	44,0	46,0	35,0	37,5	36,5
C/C_o inicial	0,48	0,33	0,40	0,50	0,65	0,50	0,20	0,08	0,15	2,20	1,90	1,90
C/C_o saturação	0,92	0,95	0,93	0,92	0,86	0,92	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,95
q experimental	0,0016	0,0040	0,0041	0,0010	0,0011	0,0015	0,0106	0,0194	0,0108	0,0087	0,0106	0,0079
R^2 (Modelo de Thomas)	-	-	-	-	-	-	0,8461	0,9547	0,9849	0,9501	0,8695	0,9853
K_{Th}	-	-	-	-	-	-	0,0294	0,0358	0,0699	0,0747	0,1047	0,0872
q_{Th}	-	-	-	-	-	-	0,0132	0,0241	0,0100	0,0112	0,0119	0,0102
R^2 (Modelo de Yoon-Nelson)	-	-	-	-	-	-	0,8468	0,9528	0,9866	0,9821	0,9528	0,9866
K_{YN}	-	-	-	-	-	-	0,0643	0,0719	0,1148	0,0831	0,0719	0,1148
τ	-	-	-	-	-	-	5,2379	7,1196	18,4286	17,929	34,5596	18,4285
q_{YN}	-	-	-	-	-	-	0,0052	0,0071	0,0108	0,0091	0,0115	0,0083

	C_o baixa			C_o alta		
	Cortiça			Cortiça		
	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 1.3
UR %	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Co (ppm)	0,81 ± 0,17	0,86 ± 0,22	0,86 ± 0,20	1,66 ± 0,23	2,28 ± 0,21	1,38 ± 0,19
tempo de ruptura (min)	0,5	0,5	0,5	2,0	2,0	4,0
tempo de saturação (min)	9,0	7,0	6,0	8,0	8,0	8,0
C/Co inicial	0,21	0,41	0,52	0,72	0,68	0,82
C/Co saturação	0,99	0,94	0,99	0,98	0,99	0,96
q experimental	0,0010	0,0011	0,0020	0,00038	0,00047	0,00046
R² (Modelo de Thomas)	-	-	-	0,717	0,6783	0,6346
K_{Th}	-	-	-	0,1590	0,0915	0,0841
q_{Th}	-	-	-	0,0095	0,0214	0,01820
R² (Modelo de Yoon-Nelson)	-	-	-	0,8467	0,6783	0,6346
K_{YN}	-	-	-	0,2195	0,2086	0,1396
τ	-	-	-	9,5417	10,9626	12,1647
q_{YN}	-	-	-	0,0095	0,0214	0,0182