


## Avaliação da capacidade de adsorção em paletes de carbono

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.007-016>

**Jhonatan Junio de Freitas**

**Gisely Luzia Ströher**

**Gylles Ricardo Ströher**

---

### RESUMO

Os paletes são muito utilizados para movimentação de cargas, no entanto, muitas vezes são descartados de forma inadequada, devido ao custo associado ao seu descarte correto. Este estudo concentrou-se na transformação de paletes expirados em carvão de palete (PC) e na investigação de suas propriedades, realizando a determinação da isoterma de Langmuir, empregando soluções padrão primárias. Os resultados obtidos com o rendimento gravimétrico foram de 66,05%, o que indica um excelente custo/benefício. A isoterma obtida é característica de uma adsorção favorável, com saturação dos sítios ocorrendo em torno de 0,014 g.L<sup>-1</sup>, com uma camada próxima a uma concentração de 3,3 mol. L<sup>-1</sup>. A área ativa desse carvão palete foi estimada em 715,94m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. Este estudo dedicou-se a avaliar a capacidade de adsorção do material descartado, visando sua reutilização de forma mais sustentável, contribuindo para a preservação do meio ambiente. A transformação do material descartado em adsorvente não só agrega valor ao produto, como também reduz significativamente os custos industriais associados ao descarte convencional.

**Palavras-chave:** Palete de madeira, Carvão ativado, Adsorção, Isotermas de Langmuir.

## 1 INTRODUÇÃO

Observamos que o crescimento industrial é sempre desejável e bem-quisto para o desenvolvimento humano. No entanto, diferentes emissões de resíduos e poluentes ambientais são observadas praticamente nas mesmas proporções dessa evolução industrial (AGUIAR, SILVA, EL-DEIR, 2019).

Segundo Bertaglia (2005), o palete é uma plataforma utilizada na movimentação de cargas feitas de madeira ou de fibra e metal e é amplamente utilizado no setor de logística e armazenagem para atividades de transporte dentro da indústria e comércio.

O pallet de madeira tem presença significativa no mercado brasileiro desde a década de 1960 como facilitador logístico na indústria automotiva, e sua participação permaneceu estagnada até meados da década de 1980 (MENDES, 2023).

No mercado brasileiro atual existem cerca de oito tipos de paletes, cada um projetado para uma função específica, tanto econômica quanto sustentável. Entre elas, as planejadas pela ABRAS (Associação Brasileira de Supermercados) feitas de madeira PBR (Paleta Padrão Brasileiro) e plásticas (MENDES, 2023).

Figura 1 - Paleta de madeira PBR.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Os paletes podem ser produzidos a partir de madeira de reflorestamento, autorizada pelo Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente), com predominância de pinus e eucalipto, sendo este último mais destacado (HASSMADEIRAS, 2018).

A madeira não possui uma data de validade específica, porém os pallets de madeira comercializados possuem vida útil média de no máximo três anos, além de estarem sujeitos a alterações devido ao clima, fungos e falta de manutenção adequada (SBPALLETS, 2022).

O consumo de paletes de madeira no Brasil anualmente gira em torno de três milhões, como as empresas ainda não encontraram uma forma de maximizar os custos/benefícios destes após sua vida útil, é comum observar seu abandono no meio ambiente (GÜLLICH, UHMANN, 2019).

A reciclagem, a redução e o reaproveitamento são fundamentais para reduzir o desperdício ou o descarte inadequado de materiais. O pallet pode ser reutilizado, evitando o aumento da poluição ambiental e reduzindo o consumo de matérias-primas na purificação de resíduos, preservando os recursos naturais (FONSECA, 2013)

Segundo Lima e Silva (2005), a economia proveniente de outras fontes de energia também pode estar ligada à utilização de diversos resíduos como matéria-prima na obtenção deles, desde que preferencialmente livres de contaminantes ou substâncias que possam prejudicar o funcionamento e/ou a vida útil das caldeiras, entre outros. Nesse processo energético, é interessante combinar materiais com alta capacidade térmica a fim de melhorar o custo-benefício de toda a ação.

A utilização de resíduos de madeira, empregando pirólise na produção de carvão ativado, tem valor agregado devido ao fato de absorverem poluentes, pois possuem porosidades compatíveis e enorme potencial nesse tipo de aplicação (CZAJCZYNSKA et al., 2017).

A transformação de resíduos de madeira em carvão vegetal pode ser realizada por aquecimento em ambiente de baixa oxidação, concentrando carbono e eliminando oxigênio no processo de pirólise (SILVA, ANDRADE, JÚNIOR, 2020; SILVA et al., 2022).

Existem vários tipos de carvão, sendo as principais diferenças decorrentes da forma de obtenção, porosidade e área superficial. Os mais comuns são os minerais, vegetais e carvão ativado (MIMURA, SALES, PINHEIRO, 2010; GAMA et al., 2022).

O carvão ativado tem sido o adsorvente mais utilizado para remover compostos voláteis em condições gasosas (AMÉRICO-PINHEIRO, BENINI, AMADOR, 2016).

A capacidade de adsorção de um material pode ser correlacionada com a área superficial disponível. Às vezes, a remoção de compostos orgânicos carbonáceos pode ser realizada simplesmente com a aplicação controlada de altas temperaturas ao material (AMÉRICO-PINHEIRO, BENINI, AMADOR, 2016).

Langmuir trabalhou fundamentando a teoria da adsorção aplicada a superfícies homogêneas, onde se forma uma camada monomolecular, baseada no conceito de que cada sítio ativo acomoda apenas uma unidade adsorvida e que a energia pode ser distribuída igualmente para todos os sítios, conforme equação 1 (MORAIS, 2014; MELANI et al., 2021).

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{1}{K_L} C_e \quad \text{equação 1}$$

Nesta equação (1)  $K_L$  representa a constante de Langmuir que é a capacidade teórica de adsorção na monocamada,  $C_e$  a concentração de adsorbato em equilíbrio,  $Q_m$  a constante relacionada à energia de adsorção e  $Q_e$  é a razão entre a quantidade de adsorbato e adsorvente em equilíbrio (ATKINS, 2017).

Segundo Fernandes (2008), no modelo proposto por Langmuir, o parâmetro de equilíbrio ( $R_L$ ) indica adsorção favorável quando os valores estão acima de zero e abaixo de um, conforme equação 2 (FERNANDES, 2008).

$$R_L = \frac{1}{(1 + K_L Q_m)} \quad \text{equação 2}$$

Acima de tudo, as isotermas de adsorção são curvas, que em temperatura constante, podem ser descritas por equações matemáticas, uma vez que provêm de modelos físicos, que são determinados experimentalmente com adsorção (DABROWSKI, 2001).

As informações geradas a partir da interpretação desse modelo de equações projetam que tipo de adsorção ocorreu, quanto da substância foi adsorvida e, ainda, se o processo é viável (DABROWSKI, 2001).

Este trabalho utilizou paletes de madeira ou paletes descartados pela indústria, e os transformou em carvão ativado através da pirólise a baixa temperatura, com o objetivo de agregar valor aos resíduos muitas vezes descartados incorretamente e utilizá-los como adsorvente de impurezas.

## 2 METODOLOGIA

A matéria-prima para este trabalho foram paletes de madeira, após o término de sua vida útil, doados por empresas da cidade de Apucarana, Estado do Paraná, Brasil. Estes foram desmontados e cortados antes de serem submetidos a várias análises.

Apenas uma quantidade razoável do palete foi utilizada para a realização dos experimentos, sendo as dimensões médias obtidas após o corte (2 cm x 2 cm x 4 cm) sendo largura, altura e comprimento.

Os paletes foram submetidos a análises de umidade e teor de cinzas de acordo com a metodologia da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1998).

A massa foi inicialmente pesada em triplicatas de aproximadamente 500 g, as quais foram submetidas à pirólise com auxílio de um forno de mufla Jung, LF0212, em diferentes testes experimentais de temperatura para maximizar a produtividade. Após esta etapa, uma isoterma de aquecimento foi utilizada a 350°C por 7 horas para obtenção do carvão vegetal. As massas inicial e final foram utilizadas para determinar o rendimento gravimétrico.

O carvão obtido foi triturado em liquidificador Blend até a obtenção do pó e colocado em frascos herméticos para determinação das isotermas de Langmuir, de acordo com os trabalhos de Perry (1988) e Valencia (2007) adaptados por Melani et al., 2021.

As isotermas de Langmuir foram caracterizadas, utilizando-se diferentes concentrações de ácido oxálico (padrão primário), e tituladas com hidróxido de sódio, para serem quantificadas (PERRY, 1998; VALÊNCIA, 2007; MELANI *et al.*, 2021).

Amostras de carvão de paleta (PC) foram pesadas a um valor médio de massa (m) de 0,5g. E os frascos de erlenmeyer foram preenchidos com ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) e água, como mostra a Tabela 1, para as análises de verificação da quantificação da adsorção de PC utilizando ácido oxálico, na concentração de 0,003 mol. L<sup>-1</sup>.

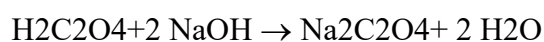
Mesa 1 - Volumes de ácido oxálico, água e volume final em experimentos de adsorção.

Experimental	Ácido VOxálico (mL)	VWater (mL)	Vfinal (mL)
01	100,0mL	0mL	100,0mL
02	80,0mL	20,0mL	100,0mL
03	60,0mL	40,0mL	100,0mL
04	50,0mL	50,0mL	100,0mL
05	40,0mL	60,0mL	100,0mL
06	20,0mL	80,0mL	100,0mL
07	10,0mL	90,0mL	100,0mL
08	5,0mL	95,0mL	100,0mL
09	3,0mL	97,0mL	100,0mL
10	1,0mL	99,0mL	100,0mL
11	0,5mL	99,5mL	100,0mL
12	0,2mL	99,8mL	100,0mL

Fonte: Autoria própria, 2024.

As amostras foram preparadas em laboratório, sem alterações de temperatura (T) e pressão (P). Os frascos de erlenmeyer foram colocados em incubadora de agitação orbital, *Cienlab, CE 725*, por 3h, a 50 rpm, em temperatura ambiente, para efeito de maior interação entre adsorvente e adsorbato.

Os experimentos foram deixados em repouso por 19 h, ainda vedados para evitar interferência no ambiente. Imediatamente após esse período, as alíquotas foram filtradas, descartando-se uma pequena quantidade inicial durante a limpeza do papel de filtro. As pipetas foram condicionadas, exceto para remover contaminantes ou substâncias indesejáveis, e então tituladas com hidróxido de sódio (NaOH) de 0,2 mol. L<sup>-1</sup>, aplicando o indicador fenolftaleína para quantificação da adsorção de ácido oxálico, de acordo com a reação química:



Com os dados obtidos através dos experimentos, a construção das isotermas de Langmuir foi realizada por meio das equações 1 e 2.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do rendimento gravimétrico pode ser definido como a relação entre a quantidade de carvão vegetal produzida e a quantidade de lenha queimada, sendo que a composição química da madeira e a faixa de temperatura utilizada influenciam no rendimento do carvão vegetal (OLIVEIRA *et al.*, 2010; PETROFF & DOAT, 1978).

Os resultados de rendimento gravimétrico obtidos neste estudo com a transformação de paletes em carvão vegetal foram iguais a 66,05%. Esses valores são extremamente satisfatórios, uma vez que os métodos utilizados em sistemas tradicionais de produção de carvão vegetal, em geral, estabelecem um rendimento na faixa de 25% a 33% (BARCELLOS, 2004).

O valor de rendimento gravimétrico obtido da obra foi superior ao de Gomes (2019), que apresentou maior rendimento médio de carvão vegetal de 37,15%, proveniente da operação com temperatura final de pirólise de 400°C.

O alto desempenho obtido com paletes é provavelmente justificado por ser obtido a uma temperatura média baixa (350°C) e proveniente de madeira prensada (com alta densidade) capaz de suportar o transporte de cargas pesadas (MACHADO *et al.*, 2014; BRIANE DOAT, 1985).

Durante a pirólise, são liberados materiais voláteis, o que contribui para a perda de volume e massa (faixa de temperatura entre 300°C a 500°C), resultando em uma redução na densidade (GOMES, 2019).

A taxa de aquecimento, a natureza da matéria-prima e a temperatura final são os parâmetros relevantes que determinarão a qualidade e o rendimento do material carbonizado (CLAUDINO, 2003).

O estudo de Brito e Barrichelo (1981) realizado com diferentes tipos de madeira da região amazônica concluiu que a densidade da madeira influencia diretamente o rendimento do carvão vegetal. Além disso, as empresas produtoras de carvão vegetal tentam homogeneizar o diâmetro médio das toras queimadas, a fim de reduzir os finos (cinzas) e melhorar a padronização da qualidade do produto final (OLIVEIRA, 2009).

Dados de Mello e Anunciação (2015) relatam que em 2013 o custo de descarte de um pallet foi de aproximadamente US\$ 6,30 (seis dólares e 30 centavos). As empresas que processam e coletam os pallets precificam de acordo com localização e quantidade, e preferem manter os valores em sigilo. Enquanto isso, nos sites de venda de paletes, os novos paletes modelo PBR podem variar de aproximadamente US\$ 9,60 (nove dólares e sessenta centavos) e padrão de exportação com certificado de aproximadamente US\$ 24 (vinte e quatro dólares), sujeitos a alterações de acordo com a demanda do comprador.

É interessante notar que ao comparar o preço do novo em 2024 e o preço de descarte de 10 anos atrás, o descarte custa em torno de 66% do novo, mas hoje em dia o percentual pode ser ainda

maior. Assim, desta forma, a produção de carvão vegetal com paletes torna-se viável, devido ao seu baixo custo.

Os resultados do teor de umidade e voláteis e da porcentagem de cinzas obtidos na matéria-prima são apresentados na Tabela 2

Mesa 2 - Umidade e teor de voláteis e porcentagem de cinzas em paletes.

<b>Umidade e voláteis</b>	<b>Freixo</b>
12,12% ± 0,38	1,87% ± 0,37

Resultados expressos em Média ± Desvio padrão das análises em triplicata

Fonte: Autoria própria, 2024.

O teor de umidade e volátil obtido neste trabalho com o paleta foi igual a 12,12%, valores que são satisfatórios segundo Farinhaque (1981), pois para carvões produzidos a partir de madeira valores abaixo de 25% resultam em aproveitamento energético satisfatório.

Vale ressaltar que uma das operações mais importantes no uso da madeira é a secagem e que esta é inversamente proporcional ao poder calorífico (CAMPOS *et al.*, 1985). Os paletes utilizados neste trabalho provavelmente foram submetidos a processos de desumidificação e preservação que corroboraram a determinação de umidade e voláteis.

Apenas o núcleo de madeira é utilizado para fazer o pallet, e toda madeira deve ser descascada, antes de ser aquecida, para realizar o tratamento térmico, com temperatura média de 56°C ou 132°F (LOGIMINAS, 2023).

A remoção de umidade da madeira pode ser feita por meio de tratamento térmico, criando condições que diminuam a propensão ao apodrecimento e aumentem a resistência às variações climáticas (LOGIMINAS, 2023).

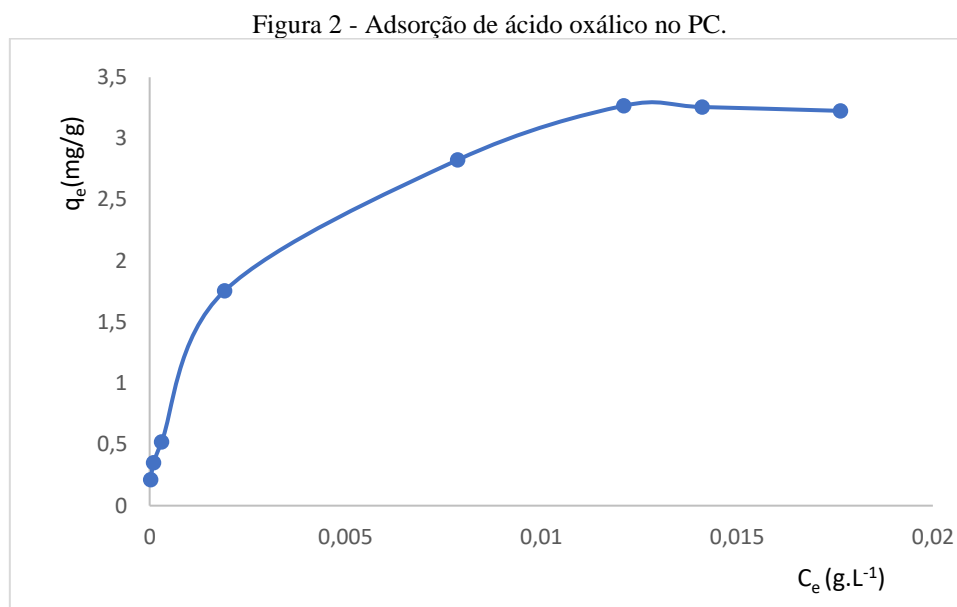
O teor de cinzas está relacionado ao teor de matéria inorgânica, à origem e composição do material, que possuem características que determinam a formação de cinzas, geralmente a biomassa lignocelulósica tem valores entre 0,2% e 9,5% (LOPES *et al.*, 2013).

Baixos valores de cinzas são sempre preferidos, neste estudo realizado com paletes o valor obtido foi igual a 1,87%, de acordo com os parâmetros que são estabelecidos para obtenção de carvão vegetal (LOPES *et al.*, 2013).

O efeito que a cinza causa na adsorção é uma redução devido ao fato de causar bloqueio da matriz carbônica e, conseqüentemente, promover a adsorção preferencial de água, devido ao seu caráter hidrofílico (RAO *et al.*, 2000).

O resultado da relação mássica da matéria-prima utilizada por massa de carvão vegetal produzido a partir de paletes foi, em média, igual a  $3,92 \pm 0,59$  g.g-1. Resultados inferiores aos obtidos por Santos e Hatakeyama (2012) que obtiveram valores de 4,5 a 5 g.g-1 utilizando eucalipto.

A Figura 2 foi construída com os valores de  $q_e$  (quantidade máxima de soluto retido no adsorvente em equilíbrio) e  $C_e$  (concentração neste equilíbrio).



Fonte: Autoria própria, 2024.

A visualização da Figura 2 permite observar uma isoterma côncava característica de uma adsorção extremamente favorável (SCHONS, 2010).

A isoterma tipo I obtida mostra que o adsorbato e o adsorvente têm afinidade. Além disso, observa-se que a primeira região da curva aparece altamente vertical (evidencia a formação da monocamada) provavelmente devido à adsorção de microporos seguida do platô (saturação limite correspondente ao preenchimento dos microporos) característico das isotermas descritas por Langmuir (BRUNAER *et al.*, 1938; HAMADAUI & NAFFRECHOW, 2007).

Na Figura 2, pode-se observar uma saturação dos sítios ativos (platô) no carvão palete próxima a 0,014 g.L<sup>-1</sup>, o que pode indicar uma alta capacidade de adsorção, em relação ao seu custo de produção, lembrando que este trabalho foi realizado com material descartado. Além disso, uma camada com concentração de 3,3 mol. L<sup>-1</sup> foi formado.

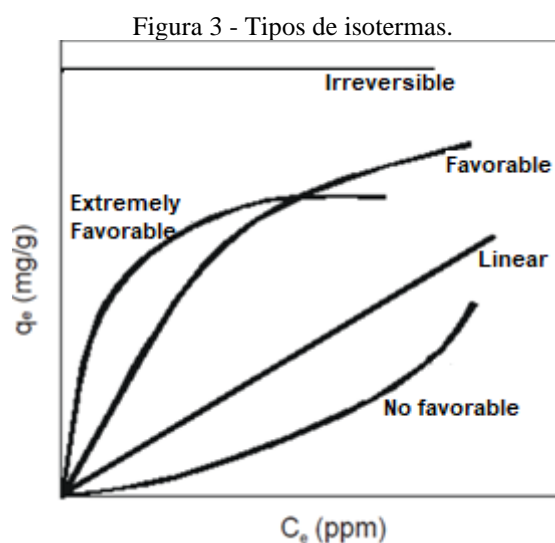
Segundo Nascimento *et al.* (2014), à medida que ocorre o contato entre o adsorbato e o adsorvente, moléculas e íons circulam da solução para a superfície do adsorvente, até atingir uma concentração de equilíbrio constante do soluto na fase líquida ( $C_e$ ).

A determinação da capacidade de adsorção do adsorvente ( $q_e$ ) é prevista no momento em que o estado de equilíbrio é atingido no sistema, de acordo com a equação 4 (SCHONS, 2010).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad \text{equação 4}$$



O trabalho de Schons (2010) apresentou a Figura 3, com diferentes tipos de isotermas para facilitar sua caracterização, onde  $q_e$  é a quantidade máxima de soluto retido no adsorvente em equilíbrio e  $C_e$  é a concentração neste equilíbrio.



Fonte: SCHONS, 2010.

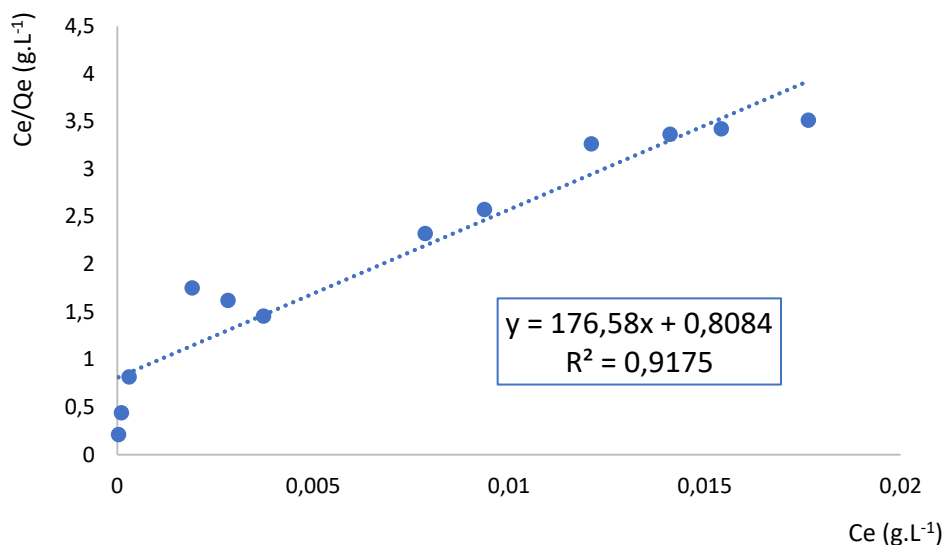
A comparação visual entre a Figura 2 e a Figura 3 indica que a adsorção de ácido oxálico no CP foi extremamente favorável (SCHONS, 2010).

Isotermas do tipo H (alta afinidade), é um ato onde a curva tipo L, sendo este um caso especial, onde no momento da visualização, a superfície do adsorvente tem grande afinidade pelo soluto adsorvido (FALONE, VIEIRA, 2004).

As isotermas que são expressas como tipo H (alta afinidade) são características de quando o adsorbato tem uma alta afinidade pelo adsorvente, funcionando da seguinte forma, a quantidade adsorvida no início é alta, mas logo após atingir o equilíbrio (SCHONS, 2010).

Acima de tudo, as isotermas de adsorção são curvas, que em temperatura constante, podem ser descritas por equações matemáticas, uma vez que provêm de modelos físicos, que são determinados experimentalmente com adsorção (DABROWSKI, 2001).

Figura 4 – Isoterma de Langmuir para PC.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A equação obtida da isoterma de Langmuir para paletes de carvão foi igual a  $\frac{C_e}{Q_e} = 176,58 C_e + 0,8084$ . Com essa equação combinada com a equação 2, os parâmetros da Tabela 3 podem ser determinados (FAHMI *et al.*,2021).

Mesa 3 - Principais parâmetros obtidos a partir das isotermas de Langmuir.

Parâmetro	Qm (mol.g-1)	KL (L.mol-1)	RL	Área de carvão ativo (m2.g-1)
CP	Diâmetro 5,66x10-3	218,43	6,96x10-3	715,94

Fonte: Autoria própria, 2024.

De acordo com estimativas de FAHMI *et al.* (2021), para o carvão ativado, a área superficial desse material sintético pode variar entre 100 e 500 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> dependendo da temperatura de carbonização. Os materiais produzidos nas temperaturas de 350°C obtiveram 523 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, enquanto os obtidos a 250°C resultaram em 325 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, seguidos daqueles com área igual a 147 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> a 150°C.

O CP obteve área ativa de 715,94 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, valores superiores aos estimados pelo FAHMI *et al.*, (2021). No entanto, Melani *et al.*, (2021) obtiveram valores iguais a 965,20 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> em carvão de casca de coco e 887,35 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> em carvão ativado de pinus comercialmente disponível. É interessante destacar que o PC foi feito com paletes tratados para suportar cargas.

Costa *et al.* (2015) trabalhou com carvão vegetal de casca de noqueira, não ativado (408 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) e ativado com ZnCl<sub>2</sub> (427 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>). Em relação a esse trabalho, o CP foi de 40% a 43% maior na área ativa.

A área ativa foi calculada multiplicando-se a constante de Avogadro (6,02x10<sup>23</sup> mol), pela área de secção transversal do ácido oxálico (2,10x10<sup>-19</sup> m<sup>2</sup>) e pela quantidade de matéria adsorvida por grama de adsorvente (mol.g<sup>-1</sup>).

O nível de adsorção de carbono aos materiais adsorvidos é dependente de determinados fatores, como a distribuição dos sítios ativos ou poros, a superfície do carvão ativado, as moléculas adsorvidas e o processo de ativação (CLAUDINO, 2013).

A quantidade máxima de ácido oxálico adsorvido pelo carvão vegetal foi igual a  $5,66 \times 10^{-3}$  mol.g<sup>-1</sup>. Esse valor foi aproximadamente 50% superior ao estudo realizado por FOYA *et al.* (2014), com carvão ativado de sementes de tamarindo com ácido oxálico, que obteve valores iguais a  $4,66 \times 10^{-3}$  mol.g<sup>-1</sup>.

Na comparação entre a quantidade máxima adsorvida pelo CP e o estudo de Melani *et al.* (2021), nota-se que o valor ficou aproximadamente 23% abaixo dos valores médios ( $7,35 \times 10^{-3}$  mol.g<sup>-1</sup>).

Na constante de Langmuir (KL), a capacidade teórica de adsorção na monocamada obtida em PC foi igual a 218,43 L.mol<sup>-1</sup>, valor superior ao obtido por Foya *et al.* (2014), (58,96 L.mol<sup>-1</sup>) com carvão vegetal de semente de tamarindo e próximo ao estudo de Melani *et al.* (2021), com carvão vegetal de casca de coco verde (167,59 L.mol<sup>-1</sup>) e carvão ativado comercial de pinus (227,16 L.mol<sup>-1</sup>).

O valor de RL em CP foi maior que zero e menor que um, indicando que o processo de adsorção foi favorável (FERNANDES, 2008).

Os resultados obtidos com o PC mostram um produto com potencial para contribuir como adsorvente. Transformar o pallet descartado em adsorvente (carvão) agrega valor a esse resíduo, preservando o meio ambiente e ajudando a minimizar a prática de abandono irregular desse material.

É importante destacar que a utilização de paletes descartados para a produção de um novo produto (carvão) pode promover maior conscientização no setor de logística, armazenagem e produtividade, ampliando as próximas possibilidades de reaproveitamento do material descartado.

O Brasil importa carvão ativado da China a um custo que varia de R\$ 3.000,00 (três mil reais) a R\$ 7.400,00 (sete mil e quatrocentos reais) por tonelada, ou seja, entre US\$ 600 (seiscentos dólares) a US\$ 1480,00 (mil quatrocentos e oitenta dólares) (MADE IN CHINA, 2023). Produzir seu próprio carvão vegetal a partir de paletes (descartados) pode ser um diferencial na relação custo/benefício para diversas empresas.

A utilidade do carvão ativado varia enormemente, pois tem sido aplicado desde os tempos romanos em processos primários de purificação de água, produtos farmacêuticos, higiene pessoal, purga de gás, recuperação de óleo, purificação de esgoto, entre outros (FOYA *et al.*, 2014).

Estudos envolvendo maiores fontes de carvão ativado devem ser incentivados a fim de otimizar o abastecimento ambiental.

No entanto, o carvão vegetal feito a partir de paletes tem mostrado grande potencial em se estabelecer como um bom adsorvente, além de ser econômica e ambientalmente viável.

## 4 CONCLUSÃO

Esse trabalho transformou os resíduos sólidos, o pallet vencido, em carvão vegetal. O resultado de rendimento gravimétrico obtido foi igual a 66,05%, valor elevado que proporciona um excelente custo/benefício, uma vez que a matéria-prima foi doada, ou seja, é necessário receber valores das empresas para realizar o descarte adequado.

Com a construção da isoterma de Langmuir, aplicando-se a adsorção de ácido oxálico, evidenciou-se que a adsorção foi favorável com PC, com a saturação dos sítios próxima a 0,014 g.L<sup>-1</sup> com uma camada próxima a uma concentração de 3,3 mol L<sup>-1</sup>.

As isotermas de Langmuir obtidas através do experimento apresentaram resultados significativos, com valor de r<sup>2</sup> igual a (0,9175).

O CP obteve uma área ativa de 715,94 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, resultados estes obtidos com paletes expirados. Esses valores são 40% a 43% superiores aos encontrados por Costa *et al.* (2015) com carvão vegetal de casca de noqueira, não ativado (408 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) e ativado com ZnCl<sub>2</sub> (427 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>).

A quantidade máxima de ácido oxálico adsorvido pelo carvão vegetal foi igual a 5,66x10<sup>-3</sup> mol.g<sup>-1</sup>. Esse valor ficou aproximadamente 23% abaixo dos valores médios obtidos por Melani *et al.*, 2021, que trabalharam com diferentes carvões de casca de coco com valor médio igual a 7,35x10<sup>-3</sup> mol.g<sup>-1</sup>.

É importante lembrar que trabalhamos com pallets de madeira, que passaram por todo um ciclo de uso na indústria, e que em muitos casos, após a saturação, são descartados irregularmente na natureza.

Este trabalho teve como foco estudar as capacidades de adsorção do material descartado, planejando e prevendo se haveria viabilidade para uma nova forma de utilização do produto, tendo como principal viés contribuir com o meio ambiente.

A transformação do material descartado em adsorvente agrega valor ao produto e, além disso, reduz substancialmente o custo de descarte regular da indústria.



## REFERÊNCIAS

AGUIAR, . C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G. Resíduos sólidos: impactos ambientais e inovações tecnológicas. 1. ed. - Recife: EDUFRPE, 2019. 557p.

AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; BENINI, S. M.; AMADOR, M. B. M. Recursos Hídricos: gestão e sustentabilidade. Ed. Tupã, 2016. Disponível em: [www.google.com.br/books/edition/Recursos\\_h%C3%ADricos\\_gest%C3%A3o\\_e\\_sustentabil/MGPvDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Recursos+h%C3%ADricos:+gest%C3%A3o+e+sustentabilidade&printsec=frontcover](http://www.google.com.br/books/edition/Recursos_h%C3%ADricos_gest%C3%A3o_e_sustentabil/MGPvDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Recursos+h%C3%ADricos:+gest%C3%A3o+e+sustentabilidade&printsec=frontcover). Acesso em: 12 abr. 2023.

AOAC. Official Methods of Analysis Chemistry (16th ed.), Association of Official Analytical Chemists. 1988.

ATKINS, P.; PAULA, J. Físico-Química, vol. 2, 10<sup>a</sup> edição. Grupo GEN, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634751/>. Acesso em: 04 jun. 2023.

ATKINS, P. Físico-Química - Fundamentos, 6<sup>a</sup> edição. Grupo GEN, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634577/>. Acesso em: 05 mai. 2023.

BARCELLOS, D. C. Desempenho de um forno de carbonização semi-contínuo tipo container para produção de carvão vegetal. Revista Biomassa e Energia Renabio, n.2, p. 183-189, 2004.

BERTAGLIA, P. R. Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento. São Paulo: Saraiva, 2005.

BRIANE, D.; DOAT, J. Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. 1981. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Departamento de Silvicultura da ESALQ – USP, Série Técnica, Piracicaba – SP.

CAMPOS, J. C.; ASPIAZÚ, C.; RIBEIRO, J. C.; CAMPOS, J. C. C.; VALENTE, O. F. Sociedade de investigações florestais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Revista Árvore, n. 9, jul.-dez. de 1985.

CLAUDINO, A. Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC. 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86346/192226.pdf?sequence>. Acesso em: 07 nov. 2023.

COSTA, P. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. Revista Virtual de Química, n. 4, p. 1272 –1285, mar. 2015. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v7n4a14.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.

CZAJCZYNSKA, D., ANGUILANO, L., GHAZAL, H., KRZYZYNSKA, R., REYNOLDS, A.J., SPENCER, N., JOUHARA, H. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. Thermal Science and Engineering Progress, n. 3, 2017. Disponível em: <https://eprints.kingston.ac.uk/id/eprint/38381/6/Ghazal-H-38381-VoR.pdf>. Acesso em: 01 out. 2023.

DABROWSKI, A. Adsorption - from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 93, p. 135–224, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868600000828>. Acesso em 01 ago. 2023.

FAHMI, A. G.; ABIDIN, Z.; KUSMANA, C; NOOR, E. Utilization of Palm Kernel Meal (PKM) as activated charcoal to remove organic pollutants. *Journal of Physics: Conference Series*, n.1882, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1882/1/012117/pdf>. Acesso em 13 nov. 2023.

FALONE, S. Z., VIEIRA, E. M. Adsorção / dessorção do explosivo tetril em turfa e em argissolo vermelho amarelo. Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. *Revista Química Nova*, v. 27, n°6, p. 849 – 854, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/DDLntbmnDZ3WgMp3mMX3TRL/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 01 dez. 2023.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth), e aspectos gerais de combustão. Curitiba: FUPEF, 1981. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/4887/1/sturion.pdf>. Acesso em 30 jul. 2023.

FERNANDES, F. L. Carvão de endocarpo de coco da baía ativado quimicamente com  $ZnCl_2$  e fisicamente com vapor d'água: produção, caracterização, modificações químicas e aplicação na adsorção de íon cloreto. 2008. Tese (Doutorado em química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008. Disponível em: [http://www.quimica.ufpb.br/ppgq/contents/documentos/teses-e-dissertacoes/teses/2008/Tese\\_Fabiana\\_L\\_Fernandes.pdf/@@download/file/Tese\\_Fabiana\\_L\\_Fernandes.pdf](http://www.quimica.ufpb.br/ppgq/contents/documentos/teses-e-dissertacoes/teses/2008/Tese_Fabiana_L_Fernandes.pdf/@@download/file/Tese_Fabiana_L_Fernandes.pdf). Acesso em: 29 set. 2023.

FONSECA, L. H. A. Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental, 2013. Google Acadêmico. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/reciclagem.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2023.

FOYA, H.; MDOE, J. E. G.; MKAYULA, L. L. Adsorption of Maleic and Oxalic Acids on Activated Carbons Prepared from Tamarind Seeds. *International Journal of Engineering Research & Technology*, n.3, apr. 2014. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64430101/adsorption-of-maleic-and-oxalic-acids-on-activated-carbons-prepared-from-tamarind-seeds-IJERTV3IS040652-libre.pdf>. Acesso em 11 nov. 2023.

GAMA, L.; STRÖHER, G. R.; STRÖHER, G. L. Diferentes experimentos para a produção de carvão vegetal com cascas de coco verde. *FOCO*. v.15, 2022.

GOMES, F. S. Investigando a temperatura de pirólise e o carvão vegetal. Monografia, 2019. UFES – Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. Disponível em: [https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/field/anexo/tcc\\_felipe\\_da\\_silva\\_gomes.pdf](https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/field/anexo/tcc_felipe_da_silva_gomes.pdf). Acesso em: 04 dez. 2023.

GÜLLICH, R. I. C.; UHMANN, R. I. M. Fronteiras para sustentabilidade. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, p.33, 2019.

HASS MADEIRAS. Paletes de madeira: terminologia. Venâncio Aires: Hass Madeiras, 2022. Disponível em: <https://haaspellets.com.br/haas-madeiras-palete-madeira-terminologia.pdf>. Acesso em 11 mar. 2023.



LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no polo moveleiro de Arapongas-PR. Floresta, n. 1, 2005. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2434/2036>. Acesso em: 29 mai. 2023.

LOGIMINAS. Matéria sobre pallets tratados termicamente. 2023. Disponível em: <https://logiminas.com.br/materia-sobre-pallets-tratados-termicamente/>. Acesso em: 02 dez. 2023.

MELLO, M. F.; ANUNCIACÃO, M. A. Logística reversa de paletes – Um estudo de caso. Engevista, v.17, n.1, p.136-151, Março 2015.

LOPES, C.W., BERTELLA, F., PERGHER, S.B.C., FINGER, P.H., DALLAGO, R.M., PENHA, F.G. Synthesis and characterization of activated carbons derived from corn cob. Perspectiva, n. 139, p. 27-35, 2013. Disponível em: [https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/139\\_360.pdf](https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/139_360.pdf). Acesso em 01 jun. 2023.

MACHADO, G. O; VOGEL, F.; SILVA, M. M. Influence of temperature carbonization in physical, chemical and energy of charcoal from cinamomo. AMBIÊNCIA, n. 1, p. 83-96, 2014. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/1967>. Acesso em: 22 jul. 2023.

MADE IN CHINA. Connecting buyers with Chinese Suppliers. 2023. Disponível em: [https://pt.made-in-china.com/tag\\_search\\_product/Activated\\_Carbon\\_Price\\_nein\\_1.html](https://pt.made-in-china.com/tag_search_product/Activated_Carbon_Price_nein_1.html). Acesso em: 12 nov. 2023.

MELANI, L. B.; STRÖHER, G. R.; STRÖHER, G. L. Estudo comparativo das Isotermas de Langmuir e Freundlich em carvão de casca de coco verde com carvão comercial ativado. Brazilian Journal of Development, n. 3, p. 22840–22851, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/25898>. Acesso em: 23 mai. 2023.

MENDES, P. R. Supply Chain: uma visão técnica e estratégica. São Paulo, Ed. Blücher, 2023.

MIMURA, A. M. S.; SALES, J. R. C.; PINHEIRO, P. C. Atividades Experimentais Simples Envolvendo Adsorção sobre Carvão, Revista Química Nova na Escola, n 1, fev. 2010. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/6313363/adsorcao-sobre-carvao-quimica-nova-na-escola>. Acesso em: 10 ago. 2023.

MORAIS, E. D. Produção de carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía (cocosnuciferalinn) utilizando H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COONa e KOH como ativantes. 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22732/1/EveraldoDantasDeMoraes\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22732/1/EveraldoDantasDeMoraes_DISSERT.pdf). Acesso em: 21 ago. 2023.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Estudos da Pós-Graduação. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014\\_liv\\_rfdnascimento.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf). Acesso em: 10 nov. 2023.

OLIVEIRA, R. L. M., Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal. 2009. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.

OLIVEIRA, R. L. M.; MULINA, B. H. O.; JÚNIOR, E. A.; PESSOA, J. S.; CARVALHO, S. R. Análise térmica e do rendimento gravimétrico em forno de produção de carvão vegetal. ABCM. VI



CONEM. Campina Grande-PB, 2010. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0963.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2023.

PERRY, J. Manual do Engenheiro Químico. 6.ed.México: Mc Graw Hill, 1998.

PETROFF, G; DOAT, J. Pyrolise des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. Bois et forêts des tropiques. Nogentsur-Marne, n. 177, jan/fev.1978.

RAO, R.M.; et al. Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. Bioresource Technology, vol. 71, pág. 113-123, 2000.

SANTOS, S. F. O.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. Produção, n.2, p. 309-321, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/gcrKw6mY3TfDRrxSZ9kKHDp/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 25 ago. 2023.

SBPALLETS. Pallet de madeira, quanto tempo dura?. SB pallets : apoio à logística, 2022. Disponível em: <https://www.sbpallet.com.br/pallet-de-madeira-quanto-tempo-dura/#:~:text=Devido%20ao%20fato%20de%20absorverem,podem%20durar%20at%C3%A9%203%20anos>. Acesso em: 10 out. 2023.

SCHONS, E. Fenômenos interfaciais; Aula 5- Adsorção, isoterma e filmes monomoleculares. UFG-Campus Catalão. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/fen\\_int\\_5.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/fen_int_5.pdf). Acesso em: 01 nov. 2023.

SILVA, T. H. G.; STROHER, G. R.; STRÖHER, G.L. Casca de coco verde na produção de carvão vegetal ativado. *International Journal of Development Research*. , v.12, , 2022.

SILVA, A. P.; ANDRADE, A. M.; JÚNIOR, A. F. D. Investigando o uso de resíduos do processamento da madeira de eucalipto para a produção de combustíveis sólidos compactados. Revista Matéria, 2020. Disponível em: [www.scielo.br/j/rmat/a/Dj8XHRqnKJtZX39FGRkvyS/?lang=pt](http://www.scielo.br/j/rmat/a/Dj8XHRqnKJtZX39FGRkvyS/?lang=pt). Acesso em: 21 abr. 2023.

VALENCIA, C.A.V. Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola. 2007. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Metalúrgica e Materiais) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=10607@1> . Acesso em: 08 nov. 2023.