ESTUDO DA ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO EM MICROESFERAS DE QUITOSANA

STUDY OF THE ADSORPTION OF METHYLENE BLUE DYE IN CHITOSAN MICROSPHERES

PEREIRA, Anna Karla dos Santos^{1*}; SCHEIDT, Gessiel Newton¹, SANTOS, Lucas Samuel Soares¹

¹ Universidade Federal do Tocantins, Departamento de ciência exatas e biotecnológicas, Rua Padejós, L 7 Chácara 69/72 Zona Rural Caixa Postal 66 CEP: 77402-970, Gurupi – TO, Brasil
(Fone: (63) 3311-3500; Fax: (63) 3311-3501)

* Autor correspondente
e-mail: anna_karla@uft.edu.br

Received 20 June 2015; received in revised form 2 July 2015; accepted 2 July 2015

RESUMO

A quitosana é um polímero que pode ser empregado como material adsorvente. Neste trabalho, a quitosana foi sintetizada via hidrólise alcalina da quitina. A estrutura química foi caracterizada por espectroscopia no IV e o grau de desacetilação (%GD) dos grupos acetamido presentes na matriz polimérica por titulação de neutralização. O modelo de adsorção mais adequado para análises dos dados experimentais foi o de Langmuir. A capacidade máxima de adsorção das microesferas (Ns) de quitosana foi de $3,36 \times 10^{-6}$ mol g⁻¹ de adsorvente. A velocidade de adsorção é regida pela cinética de pseudo segunda-ordem, onde a saturação dos sítios de adsorção ocorreu após duas horas de contato entre o adsorvente e o adsorvato. Ao analisar os dados frente ao modelo de isoterma de Dubinin-Radushkevich (D-R) foi possível constatar que neste processo a adsorção é de natureza física.

Palavras-chave: *Biomassa, Adsorção, Corante.*

ABSTRACT

Chitosan is a polymer that can be used as adsorbent material. In this work, chitosan was synthesized via alkaline hydrolysis of chitin. The chemical structure was characterized by IR spectroscopy and the degree of deacetylation (% DG) of the acetamido groups present in the polymer matrix by neutralization titration. The most suitable adsorption model for analysis of experimental data was Langmuir. The maximum adsorption capacity of the microspheres (Ns) of chitosan was 3.36×10^{-6} mol g⁻¹ adsorbent. The rate of adsorption is governed by the kinetics of the pseudo-second order, where the saturation of adsorption sites occurred after two hours of contact between the adsorbent and the adsorbate. By analyzing data across the isotherm model Dubinin-Radushkevich (DR) it was found that this process adsorption is physical in nature.

Keywords: Biomass, adsorption, dye.

INTRODUÇÃO

Estima-se que atualmente cerca de 10000 corantes são produzidos em escala industrial, onde aproximadamente 2000 destinam-se às indústrias têxteis (DALLAGO, *et. al.*, 2005). Esta ampla utilização dos corantes gera uma preocupação da área ambiental, uma vez que,

com a intensificação do seu uso, aumenta-se a quantidade de efluente gerado. Desta forma, o problema destina-se ao monitoramento e remoção dos corantes das águas residuais (KIMURA, *et. al.* 1999). Os impactos negativos decorrentes da poluição de corpos d'água por corantes vão desde poluição visual ao seu poder carcinogênico e mutagênico (KUNZ, *et. al.* 2002).

A dificuldade encontrada no tratamento dos efluentes contaminados por corantes está relacionada ao fato de que estas substâncias possuem moléculas resistentes à digestão aeróbica e a agentes oxidantes. Deste modo, uma alternativa é a remoção de corantes das águas residuais através do processo de adsorção, visto que ferramentas tradicionais utilizadas são onerosas ou mesmo de difícil manuseio (DOTTO, *et. al.* 2011).

A adsorção é um processo físico-químico que visa determinar o potencial de determinados sólidos em reter, na sua superfície, substâncias presentes em matrizes aquosas ou em gases e consequentemente promover uma separação dessas substâncias por meio de interações entre os componentes do sistema (ATKINS & PAULA, 2012). Para uma melhor eficácia do processo de adsorção é essencial que os parâmetros cinéticos de sejam conhecidos (TAIWO & KING, 2003).

Diferentes modelos cinéticos estão disponíveis na literatura, dos quais se destacam o de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e o difusão intrapartícula (SPINELLI, *et. al.* 2005; WU, *et. al.* 2001; HO & MCKAY, 2000; SAG, & AKTAY, 2002). A equação de pseudo-primeira ordem, na sua forma linearizada, é apresentada pela na equação 1:

$$\log(N_f - N_{f(t)}) = \log N_f - \frac{K_1}{2,303} t \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que N_f é o numero de mols adsorvidos no tempo t , $N_{f(t)}$ é o número de mols adsorvidos no equilíbrio e K_1 é a constante de velocidade. A equação que representa o modelo de pseudo-segunda ordem pode ser expressa pela equação 2.

$$\frac{t}{N_{f(t)}} = \frac{1}{K_2 N_f^2} + \frac{1}{N_f} t \quad (\text{Eq. 2})$$

E para o modelo de difusão intrapartícula a equação linearizada é representada pela equação 3 (WU, *et. al.* 2001).

$$N_{f(t)} = K_i \sqrt{t} \quad (\text{Eq. 3})$$

Uma forma de analisar quantitativamente o processo de adsorção é por meio da realização

das isotermas de adsorção. A informação transmitida pela isoterma é a relação entre a quantidade adsorvida e a concentração da solução em contato com o adsorvente (FALONE & VIERA, 2004).

Diante dos modelos disponíveis na literatura o presente trabalho utilizou as descrições de Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich. A equação original de Langmuir é descrita pela equação 4. Onde serão oferecidos os valores de máxima adsorção, N^s , que é obtido após a construção da isoterma [concentração do sobrenadante (C_s) x número de mols fixos (N_f)], em que b é uma constante relacionada à constante de equilíbrio do processo sólido-líquido (ATKINS & PAULA, 2012).

$$N_f = \frac{N^s b C_s}{1 + b C_s} \quad (\text{Eq. 4})$$

A isoterma de Freundlich é representada pela equação 5:

$$N_f = K_f C_s^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde: N_f é a quantidade de adsorvato retido no sólido no equilíbrio; C_s é a concentração da solução de corante retido no sólido no equilíbrio; K_f e n são constantes.

A isoterma D-R representada pela equação 6, e propõe a energia livre de adsorção (PAGANINI, 2007; ITODO & ITODO, 2010):

$$N_f = K_{DR} \cdot e^{(-B \epsilon^2)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde: K_{DR} é a constante de Dubinin-Radushkevich; ϵ é o potencial de Polanyi e B é a constante energética.

O potencial de Polanyi é o produto da diferença entre a energia livre na fase adsorvida e na fase líquida e é representado de acordo com a equação:

$$\epsilon = RT \ln \left[1 + \frac{1}{N_{f(t)}} \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde R é a constante dos gases ($8,314 \text{ JK}^{-1}$); T é a temperatura em Kelvin e $N_{f(t)}$ é o número de mols adsorvidos no equilíbrio.

Aplicando um logaritmo natural à equação 5, obtêm-se uma relação linear entre o numero de mols adsorvidos por grama de adsorvente e o potencial de Polanyi, representado pela equação

8:

$$\ln Nf = \ln K_{DR} - B x \varepsilon^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

Traçando o gráfico de **ln Nf versus ε^2** é possível obter uma reta. Os coeficientes linear e angular desta reta correspondem respectivamente aos valores de K_{DR} e B.

A constante **B** relaciona-se com o valor de **E** através da equação 9. Nesta equação é considerada a variação de energia livre quando um mol de soluto é transferido da solução para a superfície do adsorvente.

$$E = \sqrt{\frac{1}{2B}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Um dos principais benefícios no uso do processo de adsorção é a menor formação de resíduos. Além da possibilidade de se reutilizar o adsorvente empregado (FÁVERE *et. al.*, 2010). Uma das características desejadas em um adsorvente é que ele apresente um baixo custo, pois é utilizado em grandes quantidades. Um material de baixo custo e que pode ser obtido em grandes quantidades é a quitosana (BRASIL, *et. al.* 2007). A quitosana é um biopolímero proveniente da desacetilação, via hidrólise alcalina, da quitina (KLUG *et. al.* 1998). Quitina e quitosana, figura 1, são recomendadas como materiais funcionais, uma vez que estes polímeros naturais têm excelentes propriedades, tais como biocompatibilidade, biodegradabilidade, não toxicidade e propriedades de adsorção (MAJETE *et. al.* 2000).

Figura 1: Representação estrutural: a) Quitina e b) Quitosana

A quitina, biopolímero contendo grupos N-

acetamido (NHCOCH_3), pode ser desacetilada com solução concentrada de NaOH, produzindo a quitosana. Esta é solúvel em meio ácido, formando um polímero catiônico com a adição de prótons ao grupo amino ($-\text{NH}_2 \rightarrow -\text{NH}_3^+$) (AZEVEDO *et. al.* 2007).

O objetivo deste trabalho foi realizar a síntese de microesferas de quitosana, o que proporciona uma maior área de superfície do polímero, a fim de aplicá-las como material adsorvente para o corante catiônico Azul de metileno.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiais

Quitina Sigma Aldrich, corante azul de metileno. Todos os reagentes usados (ácido acético, ácido clorídrico, hidróxido) foram de grau analítico.

Obtenção da quitosana

A quitina (12,6 g) foi deixada numa solução de 600 mL de solução de hidróxido de sódio 50% e colocada num sistema de refluxo em manta aquecedora em temperatura de refluxo (acima de 100°C), por 24 horas (CAMPANA & SIGNINI, 2001). Após esse período filtrou-se a solução e os flocos de interesse foram lavados até a completa neutralização da água de lavagem. O material obtido foi seco em estufa à temperatura de 60°C por 24 horas.

Caracterização da quitosana

Espectroscopia na região do infravermelho. A quitosana obtida foi analisada em um espectrofotômetro 23 Bomen Hartmann & Braun (MB-Series) com uma resolução de 4 cm^{-1} e com 32 varreduras consecutivas. Desta forma, foi possível identificar os grupos funcionais presentes e obter informações a respeito da conversão da quitosana em quitina.

Determinação do Grau de Desacetilação

O grau de desacetilação (%GD), para determinar a quantidade de grupos amino presentes na quitosana, foi determinado pelo método de titulação simples com auxílio de um pHmêtro (CZECHOWSKA-BISKUP *et. al.*, 2012;

TOLIMATE *et. al.* 2000; WOJTASZ-PAJAK *et. al.* 1998; CZECHOWSKA-BISKUP *et. al.* 2004). Os flocos obtidos na etapa anterior foram previamente secos em uma estufa aquecedora por 2 horas a 60°C. Em seguida, colocou-se 0,2 g de quitosana seca em 20 mL de solução de ácido clorídrico 0,1 mol L⁻¹. Adicionou-se 25 mL de água destilada e deixou-se a mistura sob agitação por 30 minutos. Para completar a solubilização, adicionou-se mais 25 mL de água e agitou-se por mais 30 minutos. A solução obtida foi titulada com NaOH.

Preparação das microesferas de quitosana

A quitosana (5g) foi solubilizada em 200 mL de ácido acético 5% (v/v). Essa mistura foi mantida em agitação por 24 horas. A solução obtida foi gotejada, por meio de uma bureta, em uma solução de hidróxido de sódio 2,0 mol L⁻¹. O gotejamento foi conduzindo com o auxílio de uma ponteira de micropipeta com capacidade para 200 µL. As microesferas formadas foram lavadas com água destilada até a neutralização do pH. Para medida do diâmetro médio das microesferas, utilizou-se um paquímetro digital 6" ZAAS Precision, onde cada microesfera de quitosana foi individualmente manuseada, num total significativo de 120 microesferas.

Estudo da adsorção

A fim de avaliar o processo de adsorção do biopolímero foram realizados dois estudos: um cinético e outro de equilíbrio. Para análise cinética, foram utilizados 15 frascos de polietilenocom 20 ml de solução 2x10⁻⁵ mol L⁻¹ de azul de metileno e 0,020 g do adsorvente (microesferas de quitosana). Os frascos foram colocados numa mesa agitadora com velocidade de 100 rpm pelo período de 24 horas. Para a construção da isoterma de adsorção, foram utilizados 14 frascos de polietileno com aproximadamente 0,020g de microesferas e 20 mL de solução de corante. Nesse estudo as concentrações variaram de 1x10⁻⁶ a 4x10⁻⁵ mol L⁻¹. Para a quantificação do corante em solução, foi utilizado um espectrofotômetro da PG Instrumentos, modelo T70+ UV/Vis, com variação de feixe de 190 a 1100 nm e cubetas de quartzo de 1 cm de caminho óptico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Caracterização da quitosana

A análise no espectro de infravermelho, figura2, permitiu a identificação da quitosana sintetizada. As bandas características referentes ao polímero foram: a) banda de estiramento axial de OH entre 3440 a 3480 cm⁻¹, banda esta que parece sobreposta à banda de estiramento N-H; b) deformação axial de C = O de amida I (entre 1661 a 1671 cm⁻¹); c) deformação angular de N-H (entre 1583 a 1594 cm⁻¹); d) deformação angular simétrica de CH₃ (entre 1380 a 1383 cm⁻¹); e) deformação axial de -CN de amida (por volta de 1425 cm⁻¹); f) deformação axial de -CN de grupos amino (entre 1308 a 1380 cm⁻¹) e g) bandas características de estruturas polissacarídicas na região de 890 – 1156 cm⁻¹ (SANTOS *et. al.* 2003).

Figura 2: Espectro de infravermelho da quitosana

O grau de desacetilação foi determinado por titulação de neutralização, figura 3, dos grupos amino protonados usando uma solução de NaOH. A porcentagem de grupos aminos presente no polímero foi de 94%.

As microesferas sintetizadas apresentaram diâmetro entre 0,7 e 1,0 mm, com valor médio de 0,887 (±0,059) mm. Isto mostra que o método empregado gera microesferas com diâmetro bem controlado.

Figura 3. Curva de titulação da solução de quitosana

Cinética de adsorção

A Figura 4 demonstra a variação do número de mols adsorvidos (N_f) em função do tempo de contato com o adsorvente. O tempo ótimo para a completa interação do corante azul de metileno com as microesferas de quitosana foi alcançado a partir de 2 h.

Figura 4. Cinética de adsorção de solução de azul de metileno em microesferas de quitosana até 24 horas

Como forma de verificar o mecanismo que rege o processo de adsorção, bem como transferência de massa na solução e reação química, modelos de pseudoprimeira ordem, pseudosegunda ordem e difusão intrapartícula foram testados no presente estudo. Os parâmetros que foram obtidos através da linearização dos diferentes modelos encontram-se na Tabela 1.

De acordo com as informações

apresentadas na Tabela 1, é possível afirmar que os dados cinéticos que mais se adequaram são referentes ao modelo de pseudo segunda-ordem. A avaliação dos resultados foi por meio da comparação entre os coeficientes de correlação (R^2). Com base nos valores de coeficiente linear e coeficiente angular obtido pela equação de pseudo segunda-ordem foi possível calcular os parâmetros cinéticos da constante de velocidade ($K_2 = 8230,5 \text{ g mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$), a velocidade de adsorção inicial ($h = 1,215 \times 10^{-4} \text{ mol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$) e a quantidade adsorvida no equilíbrio ($N_f = 3,49 \times 10^{-6} \text{ mol g}^{-1}$) que foi bem semelhante ao valor obtido pelo cálculo do modelo ($N_f \text{ calc.} = 3,64 \times 10^{-6} \text{ mol g}^{-1}$).

Os dados obtidos no equilíbrio de adsorção foram analisados conforme o modelo de isoterma de Langmuir, Freundlich. Com o intuito de identificar o tipo de adsorção (física ou química), o modelo de Dubinin-Radushkevick (D-R) também foi aplicada aos dados experimentais. A isoterma de Langmuir é aplicada para adsorção em que os sítios do adsorvente são homogêneos, ou seja, todos os sítios de adsorção são idênticos e energeticamente análogos. Este modelo de isoterma prevê que a adsorção se realizará de modo uniforme sobre os sítios propícios do adsorvente, de tal forma que uma molécula do adsorvato ao ocupar um sítio nenhuma outra adsorção ocorrerá naquela posição, atingindo assim uma consequente saturação. Logo, a isoterma de Langmuir é adequada para adsorção em monocamada, em que adsorvente tem uma quantidade limitada de adsorvato (ATIKNS & PAULA, 2012).

Ao contrário da isoterma de Langmuir, a isoterma de Freundlich é aplicada em superfícies heterogêneas, por isso não assume uma capacidade de adsorção em monocamada (ATIKNS & PAULA, 2012). Neste trabalho o modelo de melhor ajuste dos dados experimentais de adsorção foi o de Langmuir. A figura 5 demonstra o número de mols adsorvidos na superfície do adsorvente e a concentração da solução sobrenadante.

Figura 5: Adsorção de solução de azul de metileno em diferentes concentrações

A figura 5 mostra que o aumento da adsorção é diretamente proporcional ao aumento da concentração da solução, ou seja, a quantidade adsorvida aumenta à medida que a concentração também aumenta. Com o aumento da concentração da solução de azul de metileno os sítios de adsorção da quitosana vão sendo ocupados, mas a tendência é uma decorrente saturação (SPINELLI *et. al.* 2005).

A forma linear, e mais adequada para determinar os parâmetros de adsorção (SPINELLI *et. al.* 2005), da equação de Langmuir está representada na equação 10.

$$\frac{C_s}{N_f} = \frac{1}{N^s b} + \frac{C_s}{N^s} \quad (\text{Eq.10})$$

A curva linear obtida resultou na seguinte equação: $Y = 2,0889 + 235664,437 X$ ($R = 0,85662$). A capacidade máxima de saturação do corante na superfície do adsorvente (N^s) foi de $3,36 \times 10^{-6}$ mols g^{-1} .

O valor de **E**, energia aparente de adsorção, calculado através da isoterma D-R, indicará se a interação entre adsorvente e adsorvato é física ou química. Quando a adsorção encontra-se na faixa de 2 a 6 Kcal mol^{-1} , a adsorção é considerada física. Para a adsorção química o valor de **E** raramente é menor que 10 Kcal mol^{-1} . Os parâmetros obtidos pela equação linearizada da isoterma D-R juntamente com o respectivo valor de energia de adsorção estão dispostos na Tabela 2.

Analisando o parâmetro **E** é possível dizer

que a interação que há entre adsorvato/adsorvente no presente trabalho trata-se de uma adsorção física.

CONCLUSÕES:

A desacetilação da quitina para formação de quitosana foi conduzida com sucesso, resultando num polímero com 94% de grau de desacetilação. Devido ao alto GD% foi possível solubilizar a quitosana em meio ácido para posterior formação das microesferas. As microesferas obtidas apresentaram um bom controle no diâmetro, apresentando o diâmetro médio de 0,887 mm e desvio padrão relativamente baixo ($\pm 0,059$ mm). O estudo da cinética de adsorção mostrou que este sistema tem comportamento cinético de pseudo-segunda ordem, com saturação dos sítios após duas horas em contato com a solução do corante. O estudo de adsorção com o corante azul de metileno apresentou um perfil mais adequado ao modelo de adsorção de Langmuir. O modelo de Dubinin-Radushkevich revelou que a adsorção entre adsorvente e adsorvato é de natureza física.

AGRADECIMENTOS

À UFT e UNICAMP

REFERÊNCIAS:

1. Atkins, P.; Paula J. Físico-Química. Rio de Janeiro: LTC, 2012, 488p.
2. Azevedo, V. V. C.; Chaves, S. A.; Bezerra, D. C.; Lia Fook, M. V.; Costa A. C. F. M. Eletrônica de Materiais e Processos, v.2.3 (2007)27-34.
3. Brasil, J. L.; Vaghetti, J. C. P.; Royer, B.; Júnior, A. A. S.; Simon, N.M.; Pavan, F. A.; Dias, S. L. P.; Lima, E. C. Quim. Nova, Vol. 30, No. 3, 548-553, 2007.
4. Campana, S. P.; Signini, R. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 11, nº 4, p. 169-173, 2001.
5. CZECHOWSKA-BISKUP, R.; Jarosinska, D.; Rokita, B.; Ulanski, P.; Rosiak, J. M. Determination of degree of deacetylation of chitosan – Comparision of methods. Progress on Chemistry and Application of Chitin and Its Derivatives, vol. XVII, 2012.
6. CZECHOWSKA-BISKUP, R.; ULAŃSKI, P.; ROSIAK, J.M.; KUMOR, A.; KOZAK-

- MICHAŁOWSKA, I.; LORENC, J.; MELER, J. (2004). preliminary data; in H. Struszczyk (ed), Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives, vol. X, Lodz, 121-130.
7. Dallago, R. M.; Smaniotto, A.; Oliveira, L. C. A. Quim. Nova, Vol. 28, No. 3, 433-437, 2005.
  8. Dotto, G.L.; Vieira, M. L. G.; Gonçalves, J. O.; Pinto, L. A. A. Quim. Nova, Vol. 34, No. 7, 1193-1199, 2011.
  9. Falone, S. Z.; Vieira, E. M.. Quim. Nova, Vol. 27, No. 6, 849854, 2004.
  10. Fávere, V. T.; Riella, H. G.; Rosa, S. Quim. Nova, Vol. 33, No. 7, 1476-1481, 2010
  11. Ho, S. Y.; Mckay, G. – Water Research, 34,3, p.735 (2000).
  12. Itodo, A.U.; Itodo, H.U. Life Science Journal, Vol 7, 2010.
  13. Kimura, I. Y.; Júnior, A. C. G.; Stolberg, J.; Laranjeira, M. C. M.; Fávere, V. T. Polímeros: Ciência e Tecnologia - Jul/Set – 99.
  14. Klug, M.; Sanches, M. N. M.; Laranjeira, M. C. M.; Fávere, V. T.; Rodrigues, C. A. Quim. Nova, 21(4), 1998.
  15. Kunz, A.; Zamora, P. P.; Moraes, S. G.; Durán, N. Quim. Nova, Vol. 25, No. 1, 78-82, 2002.
  16. Majeti, N. V.; Ravi, K. Reactive & Functional Polymers 46 (2000) 1–27.
  17. PAGANINI, P.P. Síntese e caracterização de trocadores iônicos inorgânicos a base de óxidos mistos estanho-titânio para utilização na recuperação de cádmio e níquel e estudos fotoluminescentes. 2007.152f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
  18. Sag, Y.; Aktay, Y. – Biochemical Engineering Journal, 12, p.143 (2002).
  19. Santos, J.E.; Soares, J. P.; Dockall, E. R.; Filho, S. P. C.; Cavalheiro, E. T. G. Polímeros, vol.13, no.4, 2003.
  20. Spinelli, V. A.; Laranjeira, M. C.M.; Fávere, V. T.; Kimura, I. Y. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 3, p. 218-223, 2005.
  21. Taiwo, O.; King, R. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. v. 42, p. 561-568, 2003.
  22. Tolimate, A.; Desbrieres, J.; Rhazi, M.; Alagui, A.; Vincendon, M.; Vottero, P. (2000). Polymer 41, 2463–2469.
  23. WOJTASZ-PAJAK, A.; KOLODZIEJSKA, I.; DEBOGORSKA, A.; MALESACIECWIERZ, M. (1998). Bull Sea Fish Inst 143, 29-39.
  24. Wu, C.F., Tseng, L.R., Juang, S.R. - Water Research, 35, 3, p.613 (2001).

Tabela 1: Parâmetros obtidos através da linearização da curva cinética

Modelo Cinético	Equação da reta
pseudo primeira-ordem	$Y = -5,94569 - 0,00101 X$ ($R^2 = 0,46148$)
pseudo segunda-ordem	$Y = 9,1731 \times 10^6 + 275059,48 X$ ($R^2 = 0,997$)
difusão intrapartícula	$Y = 1,52885 \times 10^{-6} + 5,79345 \times 10^{-8} X$ ($R^2 = 0,50667$)

Tabela 2: Parâmetros obtidos através da linearização da isoterma D-R

Equação da reta	Parâmetros da Isoterma D-R			
	R^2	K_{DR}	B	E (kcal/mol)
$Y = -6,84435 - 5,9156 \times 10^{-9} X$	0,99942	-6,84435	$-5,9156 \times 10^{-9}$	2,2