

Hidrodinâmica de uma coluna de adsorção em leito expandido para uso em purificação de proteínas de malte de milho (*Zea mays*)

João Baptista Severo Júnior
Graduando em Engenharia Química – UFS
São Cristóvão – SE [Brasil]
jb_ufs@yahoo.com.br

José Carlos Curvelo Santana
Pós-doutorando da Faculdade de Engenharia Química
– Unicamp
Campinas - SP [Brasil]
jccurvelo@yahoo.com.br

Roberto Rodrigues de Souza
Professor do Departamento de Engenharia Química – UFS
São Cristóvão - SE [Brasil]
rrsouza@ufs.br

Elias Basile Tambourgi
Professor da Faculdade de Engenharia Química – Unicamp
Campinas – SP [Brasil]
eliastam@feq.unicamp.br

Neste trabalho, estudou-se o comportamento hidrodinâmico de uma coluna de adsorção em leito expandido com o objetivo de obter as condições ótimas para recuperação de amilases do malte de milho. Usou-se a resina de troca iônica Amberlite IRA 410, o tampão fosfato pH 6 em 0,07 M, sem e com 2 % do malte de milho, e água destilada como líquidos fluidizantes, nas temperaturas $295,15 \pm 1$ K e $301,15 \pm 1$ K. A equação de Richardson-Zack se ajustou perfeitamente à descrição do comportamento da fluidização dos adsorventes em leito expandido, e as velocidades terminais experimentais apresentaram um erro relativo abaixo dos 15% com relação à velocidade teórica, o que mostra que essas equações são válidas e podem também ser aplicadas em adsorção em leito expandido. O estudo de distribuição do tempo de residência mostrou que houve um aumento da D_{axial} e do Pe com a elevação da temperatura, da altura do leito e da porosidade. O N foi constante e igual a 2,14, sendo a condição ótima de recuperação de biomoléculas do malte de milho aquela que possuiu menor porosidade do leito fluidizado, por apresentar maior viabilidade econômica.

Palavras-chave: Caracterização hidrodinâmica.
Distribuição do tempo de residência. Índice de expansão.
Leito fluidizado. Velocidade terminal.



1 Introdução

A adsorção em leito expandido (ALE) é originária da cromatografia de proteínas e baseada na fluidização do leito de adsorventes cromatográficos. O acréscimo de interstícios pelo aumento dos vazios no leito permite a aplicação direta de uma alimentação bruta contendo suspensão de material biológico (ALMEIDA; KURTENBACH, 2002). A aplicação de uma tensão chamada cromatográfica média leva à formação de múltiplos estágios de adsorção das moléculas-alvo sobre as partículas de adsorvente fluidizadas, em decorrência da distribuição em camadas distintas pelo tamanho e densidade de tais partículas. Essa propriedade particular induz à formação de um leito classificado pela fluidização devido à redução da mobilidade local dos grãos de adsorvente utilizados na fluidização. A última das propriedades citadas é um pré-requisito essencial para o desenvolvimento do aumento de espaços vazios entre as partículas sólidas (KALIL, 2000; SOSA; CÓRDOBA; PEROTTI, 2001).

Ainda que o descrito só seja válido para soluções livres de partículas diferentes da proteína modelo, recentes estudos evidenciaram que a fluidização pode ser bem empregada também com soluções de materiais biológicos brutos. Dependendo dos parâmetros sistemáticos efetivos, tais como tipo e concentração da biomassa, características do ligante, força iônica da fase fluida e pH, podem-se observar diferentes situações hidrodinâmicas durante o processo ideal em *plug flow* até a sorção-limite, e que ocorrem fluidização agregativa e estagnação do meio. Contudo, a ALE está sendo estudada para que se possa caracterizar os diferentes processos a serem utilizados na recuperação de matérias de importância biotecnológica (FERNÁNDEZ-LAHOIRE et al., 2001).

Em leitos expandidos, deve-se atentar para a sedimentação e a fluidização do material par-

ticulado, com o fito de obter as condições ideais de operação dos sistemas. Em 1954, Richardson e Zaki estudaram o comportamento de vários tipos de materiais e chegaram à equação que relaciona a velocidade do fluido (U) e a velocidade terminal da partícula (U_T) com a porosidade do meio (ϵ), descrita por:

$$\frac{U}{U_T} = \epsilon^n \quad (1)$$

Em que n é o índice de Richardson-Zaki, ou índice de expansão, que é uma função do número de Reynolds terminal (Re_t).

$$Re_t = \frac{d_p \rho_L U_T}{\mu} \quad (2)$$

Para o regime de Stokes, em que o Reynolds de partícula (Re_p) $< 0,1$, a velocidade terminal de uma partícula isolada (U_T) é dada por:

$$U_T = \frac{gd_p^2(\rho_P - \rho_L)}{18\mu} \quad (3)$$

Sendo o Re_p dado por:

$$Re_p = \frac{gd_p \rho_L U}{\mu} \quad (4)$$

Para avaliar a viabilidade técnica da ALE para um determinado processo de recuperação, é possível valer-se de um método simples de quantificação das limitações das potencialidades hidrodinâmicas que podem surgir por meio da interação da biomassa com o adsorvente. O procedimento é baseado no estudo da performance de distribuição do tempo de residência (DTR) durante o emprego do licor de processo bruto, que fornece uma percepção da situação hidrodinâmica antes das condições reais de processamento.

A DTR é um parâmetro importante para o estudo e conhecimento do comportamento da hidrodinâmica em sistemas fluidizados, se ela se encontrar em regime empistonado (*plug flow*), de mistura perfeita (*back mixing*) ou intermediário.

O conhecimento do regime é de grande importância, pois influencia no comportamento cinético de adsorção e leva a uma avaliação da possibilidade de aplicação do leito na recuperação das moléculas-alvo (SANTOS, 2001).

A medida das DTR em ALE, entretanto, é complicada, em razão da presença de material biológico particulado que impede o uso comum do traço da absorbância na região do visível, tal como a acetona. As interferências surgidas das partículas contidas no licor de processo requerem a identificação (localização) das substâncias que (1) não interajam com as substâncias da matriz cromatográfica nem com a do licor de processo e (2) sejam de fácil detecção entre as partículas originárias da suspensão biológica de proteínas (FERNÁNDEZ-LAHOIRE et al., 2001; YAMAMOTO; OKAMOTO; WATLER, 2001).

Neste trabalho, foi realizado um estudo do comportamento hidrodinâmico em uma coluna de adsorção em leito expandido para obtenção de parâmetros que proporcionem as melhores condições de utilização de tal coluna na recuperação das enzimas amilases de malte de milho. Para tanto, utilizou-se uma coluna de vidro com dimensões 1 x 30 cm, usando a resina trocadora aniônica Amberlite IRA 410, com os líquidos fluidizantes tampão fosfato pH 6 a 0,07 M, com e sem a adição de 2 % de malte de milho, comparando-os com a fluidização aplicando água, nas temperaturas de $295,15 \pm 1$ K e $301,15 \pm 1$ K.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais utilizados

- Agentes Fluidizantes: água destilada (H_2O), soluções tampão fosfato 0,07 M a pH 6,0 (TpF) e de malte de milho a 2% (p/p) (MM), no tampão citado. A Tabela 1 apresenta as

propriedades físicas dos fluidos, obtidas experimentalmente em viscosímetro e por medição do deslocamento de volume de determinada massa do fluido. O pH 6 foi escolhido por ser intermediário entre os pH ótimos das enzimas α e β -amilases (5,5 e 6,5), já que estas são as moléculas-alvo e se encontram no malte de milho.

Tabela 1: Propriedades físicas dos agentes fluidizantes

| Temperatura (K) | Propriedade | Tipo de fluido | | |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | H_2O^* | TpF | MM |
| 295,15 | ρ_L (kg/m ³) | 997,5 | 1011 | 1004 |
| | μ (kg/s.m) | $9,384 \cdot 10^{-4}$ | $9,870 \cdot 10^{-4}$ | $9,872 \cdot 10^{-4}$ |
| 301,15 | ρ_L (kg/m ³) | 996,8 | 1007 | 1023 |
| | μ (kg/s.m) | $8,569 \cdot 10^{-4}$ | $9,106 \cdot 10^{-4}$ | $9,899 \cdot 10^{-4}$ |

*Fonte: Streeter, 1977.

- Coluna de adsorção em leito expandido: a coluna utilizada neste trabalho está representada na Figura 1. Feita de vidro, com 1,0 cm de diâmetro interno e 30,0 cm de altura, possui um pistão que, por ser ajustável, reduz o espaço morto acima do leito quando este se encontrar expandido. Uma malha de 60 mesh foi posicionada nas entradas e saídas do leito para evitar a perda da resina por sedimentação e arraste. Uma régua foi posta na parede da coluna para o conhecimento da altura do leito.
- Malte de milho: as sementes foram selecionadas, pesadas, lavadas, postas à adsorção de umidade até alcançarem entre 40 e 45% (p/p) e colocadas em meio germinativo, em escala laboratorial, por aproximadamente 4 a 5 dias. O malte foi seco a 54° C, triturado, armazenado e guardado a 5° C (SANTANA, 2003).
- Partículas: resinas de troca iônica Amberlite IRA 410, de diâmetro médio $4,4 \cdot 10^{-4}$ m, massa específica 1,12 g/cm³ (Vetec).

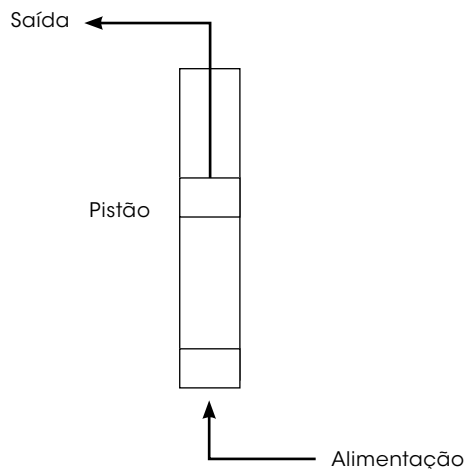


Figura 1: Esquema da coluna de adsorção utilizada em leito expandido

Fonte: Os autores.

- Traçador: como meio contendo material biológico, a utilização da acetona não é indicada, pois proteínas absorvem energia em comprimento de onda próximo a ela (FERNÁNDEZ-LAHORE et al., 2001), uma solução de glicose 5 mg/L foi utilizada, porque sua determinação é comumente realizada pelo método do Miles Laboratory (DNS), que analisa a 540 nm (região do visível), reduzindo, assim, o efeito de interferência do material biológico (REGULY, 1996).

2.2 Métodos

- Estudo de hidrodinâmica: uma massa próxima de 2 g da resina trocadora de íons Amberlite IRA 410 foi usada como partículas a serem fluidizadas, e água destilada, soluções de tampão fosfato e de malte em tampão fosfato, utilizadas como agentes fluidizantes nos experimentos. A alimentação do fluidizante se deu pelo fundo da coluna com velocidades lineares, de maneira que se pudesse obter as alturas (lidas na régua ao lado da coluna) do leito correspondente. Por meio da equação 1 linearizada (na forma de ln) foram determinados o índice de Richardson-

Zaki e a velocidade terminal experimental (U_{TExp}) (CHANG; McCREATH; CHASE, 1994; FERNÁNDEZ-LAHORE et al., 2001; SANTOS, 2001).

- Distribuição do tempo de residência (DRT): utilizando o tampão fosfato como o líquido fluidizante, expandiu-se o leito até a altura desejada, sendo injetados 5 mL do traçador (solução de glicose) na base inferior da coluna (abaixo do leito). Na saída da coluna, foram coletadas amostras de tempo em tempo e medidas as concentrações de glicose pelo método do Miles Laboratory (Método do DNS), apresentado por Reguly (1996).

A DTR é comumente obtida por meio de técnicas de estímulo e resposta. A técnica de pulso com sinal negativo (Figura 2) e de comparação das variâncias de modelos de dispersão axial (equação 6) em tanques em série foram usadas para encontrar os valores do coeficiente de dispersão axial (D_{axl}) e o número de pratos teóricos (N), como mostra a equação a seguir:

$$N = \frac{t^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

A Figura 2 ilustra como se determina experimentalmente o tempo de residência (DTR), na qual se encontram:

- o tempo de residência médio (t), que é a distância (no papel) entre a leitura do tempo inicial até que este alcance a metade desta leitura;
- o desvio-padrão (σ), que é a metade da distância entre os pontos de leitura 15,85 e 84,15 %.

Com a substituição desses dados na equação 6, obteve-se o número de pratos teóricos (N) e, a partir da equação 7, o número de Peclet

(*Pe*) (FERNÁNDEZ-LAHOIRE et al., 2001; SANTOS, 2001; YAMAMOTO; OKAMOTO; WATLER, 2001):

$$N = \frac{UH}{2\epsilon D_{axl}} \quad (6)$$

$$Pe = \frac{HU}{D_{axial}} \quad (7)$$

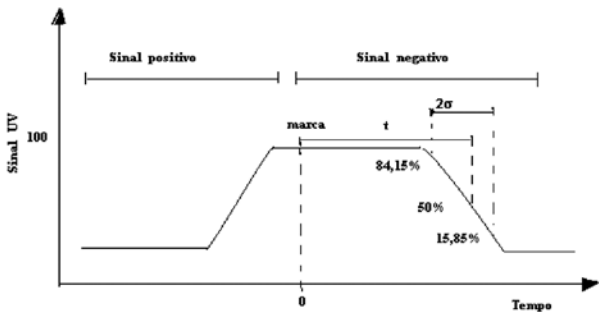


Figura 2: Esquema de determinação da DTR

Fonte: Amersham Pharmacia Biotech, 1997.

3 Resultados e discussão

Os resultados das regressões lineares dos valores, em logaritmo natural, da porosidade do leito (ϵ) versus a velocidade linear (U), geraram as equações apresentadas nas Figuras 3 e 4, para as temperaturas 295,15 e 301,15 K, respectivamente. Observando-se essas figuras, percebe-se que há uma queda no valor de n com a adição do sal (fosfato de potássio e fosfato de di-sódio) e com a adição de material biológico, com relação ao sistema fluidizado por água destilada. Também é perceptível que o aumento da temperatura reduziu o valor de n , isto provavelmente devido à redução das propriedades físicas dos fluidos por causa da elevação da temperatura, indicando que é necessária uma velocidade maior para que o leito alcance uma porosidade igual à do leito fluidizado pela

água destilada, na seguinte ordem $MM > TpM > H_2O$ para 295,15 K, e esta é invertida para a temperatura de 301,15 K.

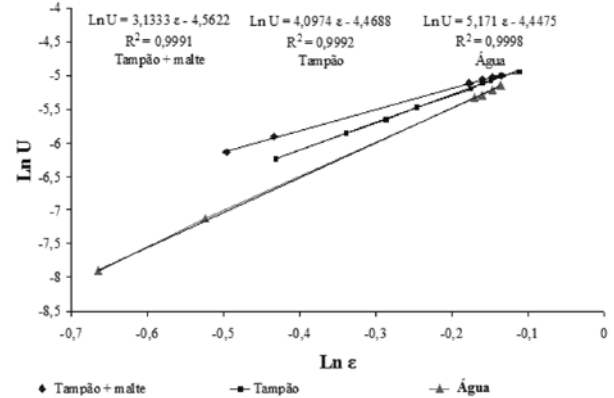


Figura 3: Linearização da equação de Richardson-Zaki a 295,15 K

Fonte: os autores.

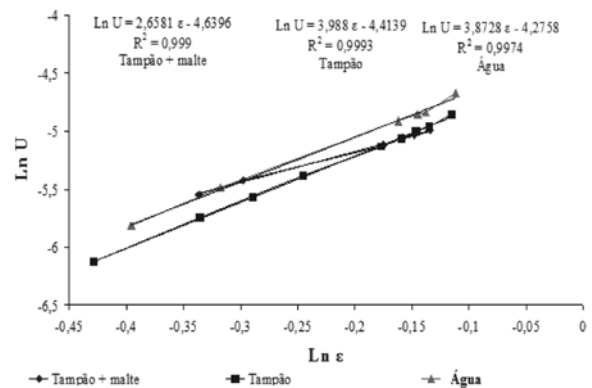


Figura 4: Linearização da equação de Richardson-Zaki a 301,15 K

Fonte: os autores.

Foi possível notar que, para as duas temperaturas na região de baixa porosidade, ocorreu maior interferência das forças de atrito em razão da ocorrência de interações entre partícula-partícula, partícula-biomolécula e partícula-fluido. Uma maior velocidade é necessária à obtenção da mesma porosidade para o sistema fluidizado por malte de milho (MM) com relação ao sistema contendo apenas tampão.



Na região de porosidade elevada, houve inversão no comportamento hidrodinâmico desses dois sistemas, ou seja, a velocidade para que o sistema com malte de milho alcançasse uma determinada porosidade foi menor que a do sistema que continha apenas o tampão. Isso ocorre porque a força de empuxo do primeiro sistema é maior que a do segundo, uma vez que a massa específica do fluido contendo malte de milho é maior que a do tampão, e as forças de atrito são praticamente nulas (SANTOS, 2001; YAMAMOTO; OKAMOTO; WATLER, 2001).

O fluidizante contendo malte de milho não possui propriedades físicas constantes, porque, à medida que esse fluido entra em contato com as partículas do adsorvente, parte de seu material suspenso vai-se adsorvendo, aumentando o volume e reduzindo a massa específica das partículas. Isso faz que haja menor inclinação da reta. Esse acréscimo de interstícios pelo aumento dos vazios no leito permite a aplicação direta do malte de milho até a sorção-limite, quando ocorrem fluidização agregativa e estagnação do meio (SANTOS, 2001; YAMAMOTO; OKAMOTO; WATLER, 2001).

A Tabela 2 apresenta os resultados comparativos entre as velocidades terminais das partículas (U_T) para os fluidos nas diferentes temperaturas de trabalho, além dos respectivos erros relativos ao valor teórico (U_T calculado). Nessa tabela, nota-se que os erros entre os valores experimentais e calculados são relativamente baixos, o que mostra que a equação de Richardson-Zaki ainda é válida, mesmo para sistemas com alta concentração de material biológico suspenso (SANTOS, 2001).

A velocidade terminal da partícula se reduz à medida que se adiciona sal e material biológico no meio (água destilada). Contudo, a velocidade terminal não apresentou um comporta-

Tabela 2: Velocidades terminais das partículas

| T (K) | Fluido | UT (m/s) | | Erro (%) |
|--------|------------------|----------|--------|----------|
| | | Exp. | Calc. | |
| 295,15 | H ₂ O | 0,0134 | 0,0135 | -0,74 |
| | TpF | 0,0115 | 0,0114 | +0,88 |
| | MM | 0,0104 | 0,0121 | -14,05 |
| 301,15 | H ₂ O | 0,0164 | 0,0147 | +11,56 |
| | TpF | 0,0125 | 0,0127 | -1,57 |
| | MM | 0,0097 | 0,0099 | -2,02 |

Fonte: os autores.

to definido com relação ao fator temperatura, provavelmente porque a solução fluidizante de malte de milho mostrou elevação da massa específica (ρ) e da viscosidade (μ) com a temperatura, comportamento inverso ao dos outros dois fluidos estudados.

As Figuras 5 e 6 mostram as curvas de dispersão axial do traçador, solução de glicose 5 mg/L. Como é perceptível, a forma das curvas é característica de DTRs comuns, mostrando que a solução de glicose empregada neste estudo pode ser utilizada como traçador, já que, para tanto, possui as qualidades exigidas (FERNÁNDEZ-LAHOIRE et al., 2001; YAMAMOTO; OKAMOTO; WATLER, 2001).

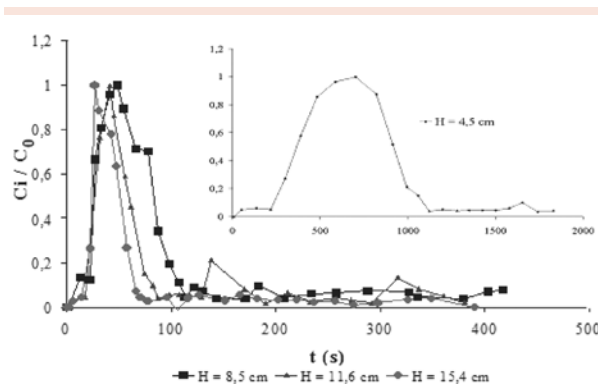


Figura 5: Estudo da distribuição do tempo de residência a 295,15 K

Fonte: os autores.

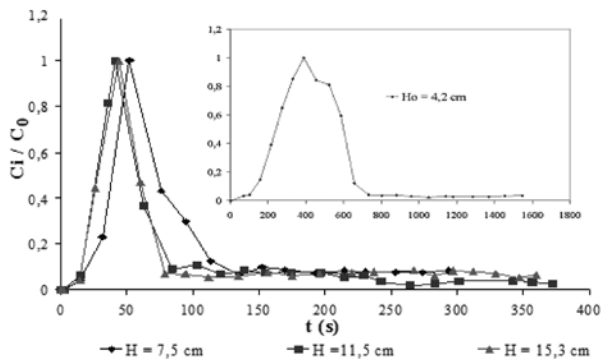


Figura 6: Estudo da distribuição do tempo de residência a 301,15 K

Fonte: os autores.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos após a realização do estudo da distribuição do tempo de residência na coluna de adsorção em leito expandido, todos calculados de acordo com a metodologia descrita em Fernández-Lahore et al. (2001), Santos (2001) e Yamamoto, Okamoto e Watler (2001).

Uma observação minuciosa desta tabela mostra que a dispersão axial do líquido eleva-se com o aumento da altura e da porosidade do leito, com a velocidade do agente fluidizante e com a temperatura do sistema. Há uma elevação de cerca de 10 vezes quando se dobra o valor da altura inicial, alcançando até 30 vezes ao se quadruplicá-la, o que facilita a passagem de material biológico no meio e eleva o contato entre as partículas do adsorvente e o material que se deseja recuperar.

- Assim, é possível a alimentação da coluna diretamente do reator de fermentação, reduzindo os custos com pré-tratamentos, pré-purificações, com a redução da porosidade e a formação de torna no leito e com o tempo de obtenção do material purificado, que são os principais problemas da cromatografia comum (em leito fixo) (AMERSHAM PHARMACIA BIOTECH, 1997; FERNÁNDEZ-LAHOURE et al., 2001; SOSA; CÓRDOBA; PEROTTI, 2001).

O número de Peclet (Pe), que também é parâmetro para medir a passagem de massa pelo sistema, sofre uma elevação considerável à medida que o leito é expandido, chegando a dobrar seu valor na máxima altura estudada, o que indica melhora significativa na facilidade de transferência de massa no sistema com relação ao leito fixo. Também se nota que o número de pratos não variou com os parâmetros estudados.

4 Considerações finais

A partir dos resultados é possível concluir que:

- a equação de Richardson e Zack se ajustou à descrição do comportamento da fluidiza-

Tabela 3: Distribuição do tempo de residência na coluna de ALE

| Temperatura | Leito | H (cm) | ϵ | U (m/s) | N | D_{axial} (cm ² /s) | Pe |
|-------------|------------|--------|------------|---------|------|----------------------------------|-------|
| 295,15 K | Fluidizado | 15,4 | 0,8477 | 0,0058 | 2,14 | 2,477 | 3,628 |
| | | 11,6 | 0,7971 | 0,0045 | 2,14 | 1,536 | 3,411 |
| | | 8,5 | 0,7235 | 0,0030 | 2,14 | 0,835 | 3,097 |
| | Fixo | 4,2 | 0,4405 | 0,0004 | 2,14 | 0,0887 | 1,885 |
| 301,15 | Fluidizado | 15,3 | 0,8460 | 0,0062 | 2,14 | 2,623 | 3,621 |
| | | 11,5 | 0,7951 | 0,0048 | 2,14 | 1,637 | 3,403 |
| | | 7,5 | 0,6864 | 0,0027 | 2,14 | 0,6891 | 2,938 |
| | Fixo | 4,2 | 0,4399 | 0,0004 | 2,14 | 0,1022 | 1,883 |

Fonte: os autores.



ção dos adsorventes em leito expandido, e as velocidades terminais experimentais apresentaram um erro relativo abaixo dos 15% com relação à velocidade teórica, o que mostra que essas equações ainda são válidas e também podem ser aplicadas em adsorção em leito expandido;

- houve maior interferência das forças de atrito em decorrência das interações partícula-partícula, partícula-biomolécula e partícula-fluido, principalmente no sistema contendo malte de milho a 2% em tampão fosfato 0,07 M pH 6, o que provocou a queda do coeficiente de expansão (n) nesse sistema em relação aos demais;
- com a elevação da temperatura, ocorreu uma inversão no comportamento dos sistemas de leitos fluidizados a 295,15 K. A velocidade do fluido, para alcançar uma determinada porosidade, se deu na seguinte ordem decrescente: MM > TpF > H₂O, sendo esta invertida com a elevação da temperatura para 301,15 K. Isso se deve a mudanças nas propriedades dos fluidos com a temperatura maior para MM e TpF do que para água, além de mudanças sofridas nas propriedades das partículas do adsorvente, com a adsorção ocorrida durante as etapas do estudo;
- O estudo de distribuição do tempo de residência mostrou que é possível usar a glicose como traçador, que não houve influência da temperatura, da altura do leito expandido e da porosidade sobre o número pratos, que foi de 2,14. Houve aumento gradativo da dispersão axial e do número de Peclet com relação ao leito fixo, à medida que se elevaram os mesmos fatores, o que promove melhor interação entre as partículas de adsorbato e adsorvente e maior transferência de massa do sistema fluido para o sólido.

Assim, é possível a utilização de quaisquer alturas estudadas neste trabalho para a recuperação de biomoléculas do malte de milho, cabendo usar a condição de menor gasto de energia, ou seja, aquela que possui menor porosidade do leito fluidizado, uma vez que isso promove uma boa recuperação com maior viabilidade econômica.

Nomenclatura

Latinos

| | |
|-------------|---|
| Exp | Dados experimentais |
| $Calc$ | Dados calculados |
| D_{axial} | Dispersão axial (cm ² /s) |
| H | Altura do leito (cm) |
| N | Nº de pratos teóricos (adimensional) |
| n | Coefficiente ou índice de expansão (adimensional) |
| Pe | Nº de Peclet (adimensional) |
| Re_p | Reynolds de partícula (adimensional) |
| Re_t | Reynolds terminal (adimensional) |
| t | Tempo (s) |
| U | Velocidade do fluido (m/s) |
| U_T | Velocidade terminal da partícula (m/s) |

Gregos

| | |
|------------|---------------------------------------|
| ϵ | Porosidade |
| ρ_L | Massa específica (kg/m ³) |
| ρ_p | Massa específica (kg/m ³) |
| μ | Viscosidade dinâmica (kg/s.m) |
| σ | Desvio-padrão (adimensional) |

Hydrodynamic of an expanded bed adsorption column for use in purification of maize malt proteins (*Zea mays*)

In this work, it was studied the hydrodynamic behavior of an expanded bed adsorption column to obtain the optimum conditions for amylase recovery from maize malt. Amberlite IRA 410

ion-exchange resin was used in chromatographic bed, phosphate buffer with and without 2% of maize malt and distiller water as fluidizers at temperatures of 295.15 ± 1 K and 301.15 ± 1 K. The results showed that the experimental data were fitted to the Richardson and Zack equation, and the comparison between the experimental and calculated terminal velocities demonstrated low relative error, minor than 15% from theoretical velocity values; it validates the use and application of these equations in expanded bed adsorption. The study of residence time distribution indicated that D_{axial} and Pe increased by reason of elevation of temperature, bed height and bed voidage. N had constant value of 2.14, being the best condition of amylase recovery that which represented low bed voidage, due to better economic viability.

Key words: Expansion Index. Fluidized bed. Hydrodynamic characterization. Residence time distribution. Terminal velocity.

Referências

- ALMEIDA, M. S.; KURTENBACH, E. *Como purificar proteínas*. Disponível em: <<http://www.icb.ufrj.br>>. Acesso: jul. 2002.
- AMERSHAM PHARMACIA BIOTECH. *Eba handbook: principles and methods*. Uppsala, IBSN 91-630-5519-8, 1997. 160p.
- CHANG, Y. K.; McCREATH, G. E.; CHASE, H. A. Purification of G6PDH from unclarified yeast cell homogenate using expanded bed adsorption (EBA) with STREAMLINE™ red H-E7B. In: GALINDO, E.; RAMIREZ, O. T. (Ed.). *Advances in Bioprocess Engineering*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1994. p. 519-525.
- FERNÁNDEZ-LAHOIRE, H. M. et al. The use of ion-selective electrodes for evaluating residence time distributions in expanded bed adsorption systems. *Biotechnology Progress*, v. 17, p. 1128-1136, 2001.
- KALIL, S. J. *Produção de ilunilase por "Kluyveromyces marxianus" e purificação da enzima por cromatografia de troca iônica em coluna de leito expandido*. 2000. Tese (Doutorado)-FEA/Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Estado de São Paulo, 2000.132p.
- REGULY, J. C. *Biotecnologia dos processos fermentativos*. 1. ed. Pelotas-RS: EdUFPel, 1996, 230p. v. 1.
- RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. Sedimentation and fluidization: Part I. *Tran. Inst. Chem. Engs.*, v. 32, p. 35-53, 1954.
- SANTANA, J. C. C. *Recuperação das enzimas α e β -amilases em sistema bifásico aquoso PEG/ $CaCl_2$ para uso como biocatalizador de amiláceos*. 2003. Dissertação (Mestrado)-FEQ/ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Estado de São Paulo, 2003, 232p.
- SANTOS, E. S. *Recuperação e purificação de enzimas usando adsorção em leito expandido*. 2001. Tese (Doutorado)-FEQ/ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Estado de São Paulo, 2001. 152p.
- STREETER, V. L. *Mecânica dos fluidos*. Tradução de Celso da Silva Muniz et al. São Paulo: Mcgraw Hill, 1977. 736p.
- SOSA, A. V.; CÓRDOBA, P. R.; PEROTTI, N. Fluidized bed design parameters affecting novel lactic acid downstream processing. *Biotechnology Progress*, v. 17, p.1079-1083, 2001.
- YAMAMOTO, S.; OKAMOTO, A.; WATLER, P. Effects of adsorbent properties on zone spreading in expanded bed chromatography. *Bioseparation*, v. 10, p.1-6, 2001.

Recebido em 28 ago. 2007 / aprovado em 2 jun. 2008

Para referenciar este texto

SEVERO JÚNIOR, J. B. et al. Hidrodinâmica de uma coluna de adsorção em leito expandido para uso em purificação de proteínas de malte de milho (*Zea mays*). *Exacta*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 129-135, jan./jun. 2008.

