



## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS EM MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO COM SOLUTOS MACROMOLECULARES

Jacqueline K. Muslera\*, Keiko Wada., Isabel C. Tessaro

Laboratório de Processos de Separação com Membranas, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Luiz Englert s/n, 90040-040, Porto Alegre (RS), Brasil

**Resumo.** Este trabalho tem como objetivo a análise da influência de parâmetros operacionais na separação utilizando a ultrafiltração com membranas poliméricas porosas, assimétricas e soluções de dextrana ou albumina bovina. As membranas selecionadas são comerciais e possuem o mesmo peso molecular de corte fornecido pelo fabricante (20.000 Dalton), duas com características hidrofílicas e uma hidrofóbica. Os experimentos foram realizados em uma unidade de bancada com um módulo para membrana plana, com uma área útil de 51,75 cm<sup>2</sup>, em regime de refluxo total. Variando parâmetros de operação como pressão e vazão de alimentação, mantendo temperatura e concentração constantes, avaliou-se o fluxo de permeado e o coeficiente de rejeição (R) para as três membranas testadas. Os resultados demonstraram que membranas de mesmo peso molecular de corte com características diferentes (hidrofílicas/hidrofóbicas) apresentam comportamentos diferentes quanto ao fluxo e ao coeficiente de rejeição para soluções de dextrana e albumina bovina. A interação do soluto com o material da membrana pode aumentar em algumas condições operacionais e com isso comprometer o processo de separação.

**Palavras chaves:** Ultrafiltração, Dextrana, Albumina bovina, Polarização, Fouling

### 1. INTRODUÇÃO

O desempenho de um processo de separação por membranas (PSM) é uma função das características da membrana, do projeto do módulo, composição da solução a ser testada e das condições operacionais do processo.

A Ultrafiltração (UF) é um PSM que devido a sua vasta aplicação e redução nos gastos de energia, tem se desenvolvido de maneira acelerada. Por isso, é normal encontrar diversos tipos de membranas poliméricas ou de outros materiais sendo comercializadas no mundo todo. Porém, a dificuldade está na falta de informações das características dessas membranas quando se deseja utilizá-las para um dado processo industrial. Os fornecedores geralmente informam o PSM que a membrana se destina (microfiltração, ultrafiltração, osmose inversa etc.) e, no caso de ultrafiltração, o peso molecular de corte da membrana, o qual é definido como sendo o menor valor de peso molecular de soluto que apresenta rejeição acima de 90 %. Para o usuário torna-se muito difícil a escolha da membrana adequada para seu processo, pois não existe ainda um padrão de caracterização das membranas e o fabricante muitas vezes não divulga o material de que é feita a membrana, nem em que condições de operação foi determinado o peso molecular de corte. Sabe-se que as membranas de mesmo peso molecular de corte, podem apresentar comportamentos diferentes na separação conforme a morfologia, porosidade, composição e natureza química. Dependendo do material de que a membrana é

\* A quem toda a correspondência deve ser submetida  
jacquek@ez-poa.com.br

feita e do soluto a separar podem ocorrer ainda interações membrana-soluto que influem no desempenho da membrana.

Este trabalho tem como objetivo principal a análise da influência de parâmetros operacionais na separação de soluções de macromoléculas usando membranas comerciais de UF. Pretende-se determinar as melhores condições de operação assim como a melhor membrana a ser utilizada para concentrar os solutos testados e verificar, também, se o peso molecular de corte fornecido pelo fabricante é suficiente para a escolha e especificação de membranas de UF.

Os solutos usados foram dextranas de diferentes pesos moleculares e albumina bovina. A dextrana foi usada em várias pesquisas científicas de ultrafiltração. Bagassi e Chauveteau (1985) e Nobrega e Balmann (1989), por exemplo, estudaram a influência da deformação e larga dispersão de peso molecular do soluto na permeação. Segundo estes autores, a dextrana é um polímero que apresenta baixa adsorção aos polímeros empregados no preparo das membranas. Segundo Bagassi e Chauveteau (1985), um dos problemas que deve ser considerado ao trabalhar com dextranas é a deformação da macromolécula provocada pela sua flexibilidade, a qual poderá obstruir os poros da membrana. A fim de observar mais adequadamente este problema, decidiu-se repetir os experimentos e ensaios com um soluto de maior rigidez estrutural, como a albumina bovina. Os estudos de Aimar et al. (1986), forneceram os critérios para a seleção da albumina bovina como soluto de maior rigidez em relação à dextrana.

Na Ultrafiltração (UF) observa-se um decréscimo contínuo do fluxo de permeado com o tempo, que ocorre basicamente devido a dois fenômenos: a polarização de concentração e o "fouling". A polarização de concentração ocorre quando há um acúmulo reversível de soluto retido na superfície da membrana. O fenômeno do "fouling" pode ser provocado pela adsorção do soluto na membrana, bloqueio dos poros ou formação de uma camada gel que afeta irreversivelmente o desempenho da membrana. Esses fenômenos foram amplamente analisados por Fane (1983), Aimar et al. (1986) e Jönsson (1995 e 1998), entre outros autores.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Materiais**

Foram utilizadas três membranas poliméricas, porosas, assimétricas com peso molecular de corte 20.000 Dalton. As membranas comerciais analisadas foram: GR61PP e SN04 de características hidrofílicas e HN06 de características hidrofóbicas, segundo especificações dos fabricantes. A membrana GR61PP foi fornecida pela Dow Denmark e as membranas HN06 e SN04 pela Osmonics.

Os solutos analisados foram dextranas de diferentes pesos moleculares (10.000, 40.000 e 70.000 Dalton), que são polissacarídeos e albumina bovina (66.700 Dalton), que é uma proteína globular.

As soluções de dextranas foram preparadas com concentrações de 1,5 g/l e a albumina bovina a 0,25 g/l. De acordo com Bottino et al. (1984), a escolha das concentrações baixas deve-se a estas serem suficientes para reduzir o fenômeno de polarização de concentração de modo a permitir a observação do fenômeno de "fouling".

Os experimentos foram realizados em uma unidade de bancada com um módulo para membrana plana, em regime de refluxo total como mostra a Fig. 1.

O módulo de membrana plana (5) de acrílico possui uma placa sinterizada de aço inox, para suportar a membrana. O módulo trabalha com escoamento tangencial. O canal de escoamento da solução de alimentação no interior do módulo, possui largura de 4,5 cm,

comprimento de 11,5 cm e altura de 0,1 cm, resultando em uma área de filtração de 51,75 cm<sup>2</sup>. Existe, na saída do módulo de membrana, uma válvula de contra pressão (6) para regular a pressão de operação.

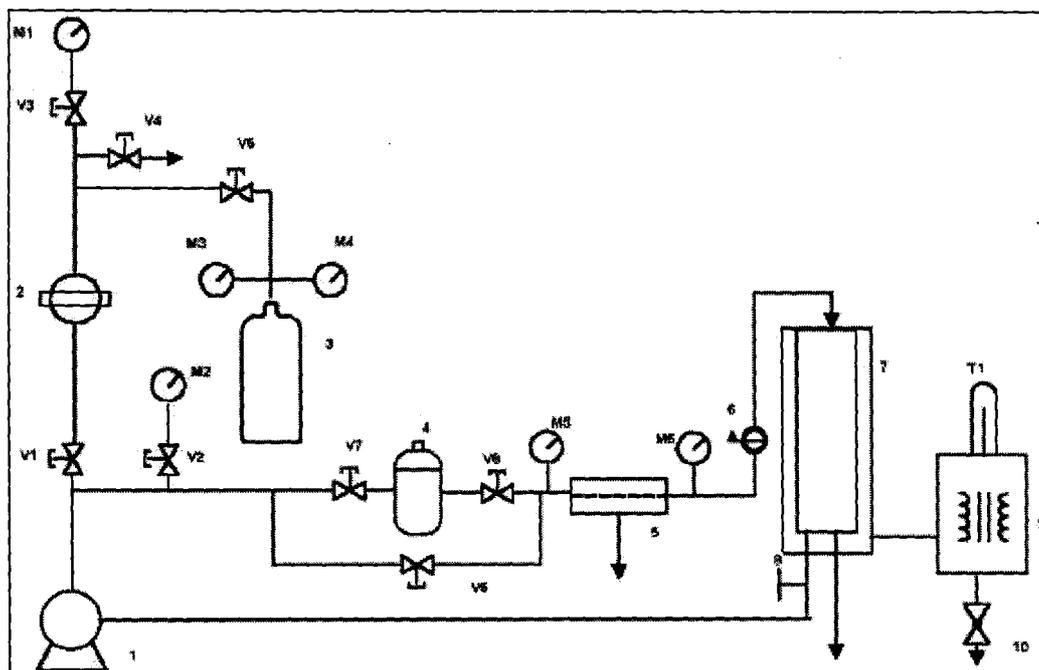


Figura 1 – Esquema do Sistema de Ultrafiltração.

- |                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| 1.bomba dosadora,            | 7.tanque de alimentação, |
| 2.amortecedor de pulsações,  | 8 e 10 válvulas,         |
| 3.cilindro de nitrogênio,    | 9.banho termostático,    |
| 4.pré-filtro,                | V.válvula agulha,        |
| 5.módulo de membrana plana,  | M.manômetro,             |
| 6.válvula de contra pressão, | T.termomêtro.            |

## 2.2. Métodos

### a) Compactação das Membranas.

Primeiramente foi realizada a compactação das membranas com a finalidade de acomodar sua estrutura na pressão acima da utilizada nos experimentos, pois, membranas de UF sofrem um efeito conhecido como compactação, que se deve a um adensamento da microestrutura da membrana. Este procedimento foi realizado com água destilada, numa vazão de alimentação de  $37,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , temperatura de  $(35 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  e pressão de 344,7 kPa. Acompanha-se o comportamento do fluxo de permeado em função do tempo até a estabilização do mesmo.

### b) Testes de Ultrafiltração.

Foram realizados vários experimentos para avaliar a influência da pressão e da vazão de alimentação no processo de UF.

Com vazão de  $37,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  e temperatura de  $(35 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ , variou-se a pressão de operação entre 103,4 e 310,3 kPa para as três membranas utilizando-se solução de dextrana 10.000, 40.000 e 70.000 Dalton e de albumina bovina.

Para os ensaios com variação de vazão de alimentação entre  $27,85$  e  $71,43 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , fixou-se uma pressão de 206,8 kPa, uma temperatura de  $(35 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  e trabalhou-se com as mesmas soluções.

### c) Métodos analíticos.

Para a quantificação de dextrana no permeado e no concentrado foi usado o método colorimétrico desenvolvido por Dubois (1956).

O método consiste na reação do fenol com o ácido sulfúrico concentrado, que é utilizado para determinar quantidades pequenas de açúcares e seus derivados. Este método foi utilizado para determinação de concentração de dextrana, conforme estudos de Youn et al. (1996).

Após a preparação das soluções padrões e amostras, estas foram analisadas em um espectrofotômetro da Varian, modelo Cary 1E, na faixa de comprimento de onda de 490 nm, como recomendado por Dubois (1956).

Para os testes com albumina bovina as soluções padrões para a curva de calibração e as amostras foram analisadas diretamente no espectrofotômetro na faixa de comprimento de onda de 211 nm.

## 3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1. Efeito da Pressão de Operação no Fluxo de Permeado

A influência da pressão foi verificada com vazão de  $37,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , para soluções de alimentação de dextrana 10.000, 40.000, 70.000 a uma concentração de 1,5 g/L e albumina bovina a 0,25 g/L. Os resultados estão apresentados individualmente na Fig. 2 para a membrana GR61PP, na Fig. 3 para a SN04 e na Fig. 4 para a HN06. Nas Figuras 2, 3 e 4 são mostradas as curvas de fluxo de permeado em função da pressão de operação. Agi e Agf são os testes com água destilada antes e após os experimentos com dextranas e D10, D40 e D70 se referem aos ensaios com solução de dextrana 10.000, 40.000 e 70.000 Dalton respectivamente.

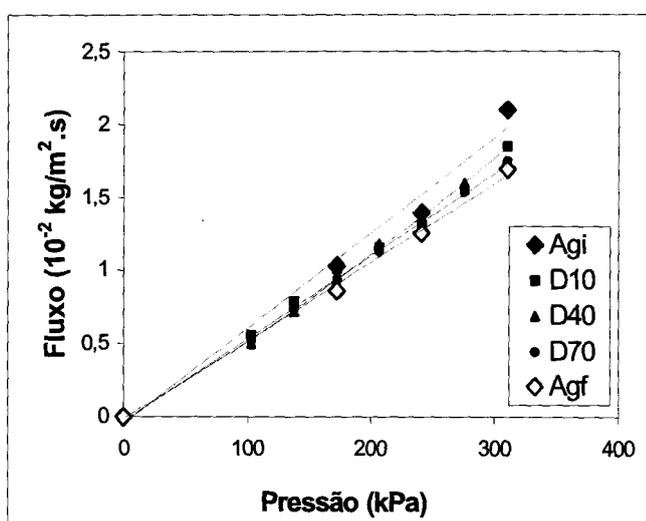


Figura 2 - Influência da pressão sobre o fluxo de permeado na membrana GR61PP com dextranas 10.000, 40.000 e 70.000 em uma vazão de  $37,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  à temperatura de  $(35,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

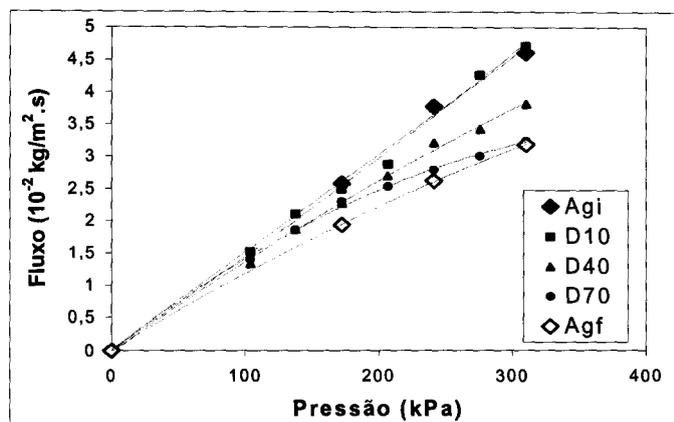


Figura 3 - Influência da pressão sobre o fluxo de permeado na membrana SN04 com dextranas 10.000, 40.000 e 70.000 em uma vazão de  $37,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  à temperatura de  $(35,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

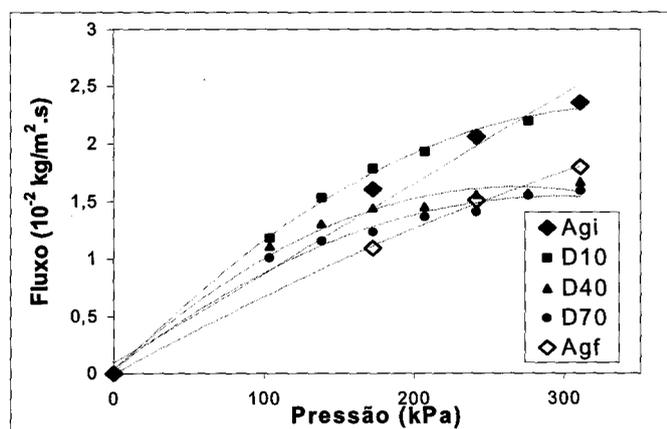


Figura 4 - Influência da pressão sobre o fluxo de permeado na membrana HN06 com dextranas 10.000, 40.000 e 70.000 em uma vazão de  $37,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  à temperatura de  $(35,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

Na Fig. 2, observa-se que a variação da permeabilidade hidráulica inicial e final (Agi e Agf) foi pequena, podendo-se admitir que ocorreu uma pequena alteração da membrana pelo contato com as soluções de dextranas durante os testes de ultrafiltração. Já nas Figuras 3 e 4 observa-se que a variação da permeabilidade hidráulica inicial e final (Agi e Agf) é maior, podendo-se afirmar que ocorreu alteração significativa das membranas pelo contato com as soluções de dextranas durante os testes de ultrafiltração. Isto poderia ter ocorrido devido a adsorção ou entupimento dos poros, segundo o trabalho de Rudie et al. (1990). Para este autor e seus colaboradores, a adsorção ocorre quando as espécies ultrafiltradas interagem com a membrana utilizada e neste caso os solutos adsorvidos podem alterar irreversivelmente a permeabilidade da membrana. Bottino et al. (1984) observaram também a pequena diferença entre os fluxos de permeado para água pura e para as soluções de dextranas de diferentes pesos moleculares e explica o fato através do efeito osmótico provocado pela polarização de concentração. À medida que se eleva a pressão de operação, aumenta o fluxo permeado e consequentemente a concentração de soluto na superfície da membrana tende a aumentar. Este aumento de concentração ocasiona uma diferença de pressão osmótica significativa através da membrana, o que provoca a queda da força motriz do sistema e, consequentemente, uma diminuição no fluxo de permeado quando comparado à permeabilidade hidráulica.

Conclui-se então que a membrana GR61PP de característica hidrofílica e de baixo fluxo sofreu uma menor interação com a solução de dextrana do que a SN04 de característica hidrofílica de alto fluxo e a HN06 de característica hidrofóbica.

Analisando a Fig. 2, verifica-se que, para os diferentes pesos moleculares da dextrana, as curvas de fluxo de permeado são praticamente coincidentes. Além disso, estas curvas coincidem, na faixa de baixa pressão, com as curvas de água pura. À medida em que se aumenta a pressão, observa-se que as curvas de fluxo de permeado da dextrana se afastam em relação à curva do fluxo de permeado de água pura. Esse comportamento é mais acentuado para as membranas SN04 e HN06 como pode ser visto nas Figuras 3 e 4.

Segundo Aimar et al. (1986) nos processos de ultrafiltração, verificam-se comportamentos diferentes para fluxos de permeado do solvente puro e soluções contendo macromoléculas. Segundo este autor e seus colaboradores, verifica-se uma eventual linearidade apenas na região de baixa pressão e à medida que se aumenta a pressão, o fluxo de permeado tende a aumentar cada vez menos, podendo atingir um fluxo limite, onde, um aumento da pressão não mais resulta em um aumento do fluxo de permeado. Isto se verificou para a membrana HN06 de característica hidrofóbica, como pode ser visto na Fig. 4. Analisando ainda este gráfico, verifica-se que não ocorreu variação linear do fluxo para soluções de dextrana, na região de baixa pressão, mencionada por Aimar et al. (1986), o que sugere que a solução não segue a lei de Darcy, ao passar pelos poros da membrana HN06.

Segundo Thorn e Wood (1981), Matthiasson (1983), Suki et al. (1984 e 1986) e Wang e Hu (1985), a diminuição do fluxo de permeado para solução contendo macromoléculas, se deve a adsorção do soluto na membrana ou pela polarização de concentração de acordo com Porter (1972), Bellucci e Drioli (1978), Reihanian et al. (1983) e Aimar et al. (1986), que resulta do acúmulo de soluto sobre a superfície da membrana.

Na seqüência do trabalho foram escolhidos dois solutos com pesos moleculares muito próximos, para avaliar-se o "fouling" no processo de ultrafiltração em condições operacionais idênticas. Os solutos foram dextrana 70.000 Dalton e albumina bovina de 66.700 Dalton. Determinou-se a permeabilidade hidráulica antes e após os experimentos com os solutos macromoleculares e avaliou-se a diminuição do fluxo de permeado em percentual como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados da Permeabilidade Hidráulica e da Diminuição do Fluxo de Permeado

Membranas	Solutos	Pressão (kPa)	Agi(10 <sup>-2</sup> kg/m <sup>2</sup> .s)	Agf(10 <sup>-2</sup> kg/m <sup>2</sup> .s)	Diminuição do fluxo (%)
G R 6	Dextrana 70.000	172,4	1,03	0,86	16,5
		241,3	1,40	1,25	10,3
		310,3	2,10	1,69	19,3
1 P P	Albumina Bovina	172,4	0,86	0,34	60,5
		241,3	1,25	0,49	60,9
		310,3	1,69	0,62	63,4
S N 0 4	Dextrana 70.000	172,4	2,57	1,94	24,7
		241,3	3,77	2,62	30,6
		310,3	4,60	3,18	30,8
	Albumina Bovina	172,4	1,94	1,78	7,99
		241,3	2,62	2,38	8,97
		310,3	3,18	3,00	5,81
H N 0 6	Dextrana 70.000	172,4	1,17	1,09	7,23
		241,3	1,52	1,50	0,99
		310,3	1,67	1,79	0,00
	Albumina Bovina	172,4	1,09	0,65	40,4
		241,3	1,50	0,94	37,5
		310,3	1,79	1,17	34,6

Analisando-se os resultados da Tabela 1, nota-se que as membranas GR61PP e HN06 sofrem uma maior interação com a albumina bovina do que com a dextrana, enquanto a SN04 interagiu mais com a dextrana do que com a albumina bovina.

Segundo Fane (1983), Aimar et al. (1986) e Jönsson (1995 e 1998) entre outros autores, a diminuição do fluxo de permeado mesmo após a lavagem da membrana caracteriza o fenômeno do “fouling”, causado pela adsorção do soluto no material da membrana, bloqueio dos poros ou formação de uma camada gel sobre a membrana.

### 3.2. Efeito da Pressão de Operação na Rejeição

O coeficiente de rejeição R, é definido por:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_o}\right) \times 100 \quad (1)$$

onde  $C_p$  e  $C_o$  são as concentrações de soluto nas correntes de permeado e de alimentação, respectivamente.

Para avaliar o desempenho das três membranas está mostrado na Fig.5 o diagrama de rejeição em função do fluxo, para a dextrana 70.000. Esses experimentos foram realizados com vazão de  $37,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  e temperatura de  $(35 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

Na Fig. 5 observa-se que para um mesmo valor de fluxo a rejeição é praticamente a mesma para as membranas GR61PP e SN04, sendo maior do que aquela observada para a membrana HN06.

Este comportamento pode ser causado devido à diferença na afinidade da membrana com água. A membrana hidrofílica adsorve água preferencialmente formando uma película de água na superfície da membrana dificultando acesso do soluto à sua superfície.

Observa-se que a rejeição decresce com o aumento do fluxo de permeado, que por sua vez tem origem no aumento da diferença de pressão através da membrana.

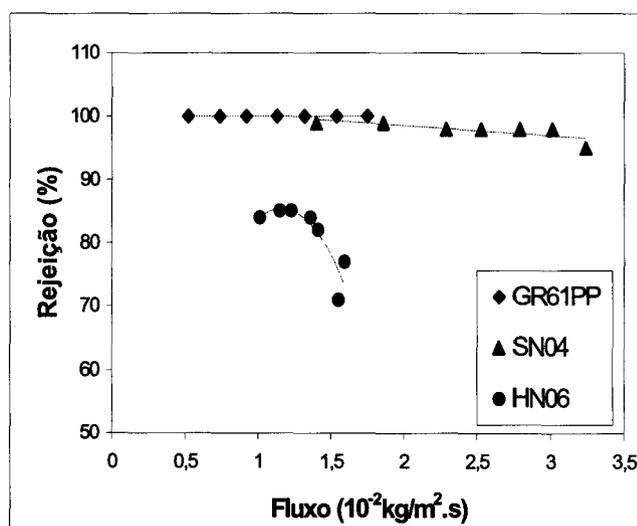


Fig. 5 – Influência da pressão sobre a rejeição de soluto com dextrana 70.000 Dalton.

Esse comportamento também foi verificado por Baker e Strathmann (1970), onde a rejeição de dextranas à taxa constante de alimentação, diminui com o aumento da pressão. A diminuição da rejeição da dextrana pode ser explicada devido a este soluto ser uma macromolécula flexível e devido ao aumento de pressão, as forças de cisalhamento dentro dos poros da membrana alterariam a estrutura da dextrana, forçando-a a atravessar a barreira seletiva. Caldeira (1984) também verificou a queda da rejeição com a pressão, atribuindo este fato, ao “empistonamento” do soluto através do poro, ou seja, também atribui à deformação da macromolécula provocada pelo cisalhamento.

### 3.3. Efeito da vazão de alimentação na rejeição

A influência da vazão de alimentação no coeficiente de rejeição pode ser vista na Fig. 6. Esses experimentos foram realizados com pressão de 206,8 kPa e uma temperatura de  $(35 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

Analisando a Fig. 6, observa-se um aumento considerável da rejeição com a vazão de alimentação. O aumento da vazão de alimentação provoca uma maior turbulência, causando diminuição da espessura da camada polarizada de concentração, aumentando, desta forma, a contra difusão e diminuindo a concentração do soluto na interface com a membrana. Uma vez que os fenômenos de adsorção e de eventual precipitação do soluto sobre a membrana dependem fundamentalmente da concentração do soluto na interface membrana/solução, o “fouling” e a polarização de concentração são minimizados com o aumento da vazão de alimentação, como argumenta Bottino et al. (1984).

Observa-se contudo que a membrana GR61PP mostra pouco efeito da vazão de alimentação sobre a rejeição. As membranas SN04 e HN06 mostram forte crescimento da rejeição até cerca de  $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  e, acima deste valor, a rejeição mantém-se praticamente constante. Nota-se que o comportamento das membranas GR61PP e SN04, embora ambas hidrofílicas, são bastante diferentes. Este fato é causado essencialmente pela diferença na permeabilidade hidráulica. Sendo a GR61PP, uma membrana de baixo fluxo o efeito da vazão é pouco significativo, principalmente porque a solução de alimentação é bastante diluída. Ao passo que a membrana SN04 de alto fluxo, sofre influência maior da vazão. O efeito do fluxo de permeado sobre a formação da camada polarizada é mais acentuado que o efeito da interação membrana-solvente.

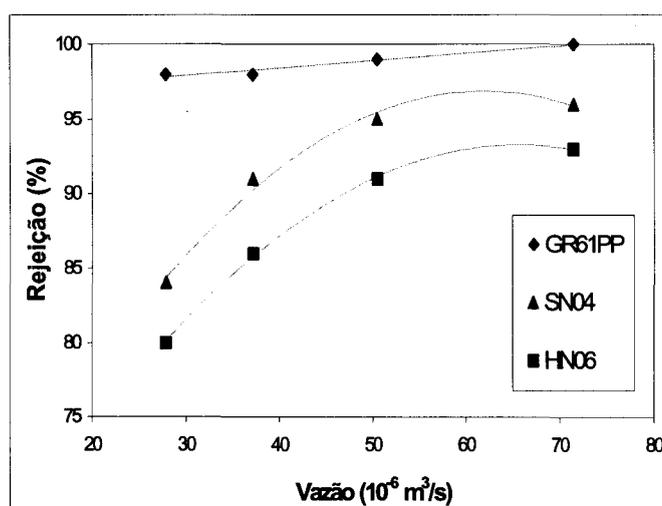


Fig. 6 – Influência de vazão de alimentação sobre a rejeição com dextrana 40.000.

#### 4. CONCLUSÕES:

Analisando a influência da pressão de operação e da vazão de alimentação na separação de soluções de macromoléculas usando membranas comerciais de ultrafiltração conclui-se que:

- A membrana GR61PP de característica hidrofílica e de baixo fluxo sofreu uma menor interação com a solução de dextrana do que a SN04 de característica hidrofílica de alto fluxo e a HN06 de característica hidrofóbica.
- Trabalhando-se em pressões elevadas e soluções com macromoléculas, o fluxo de permeado aumenta até atingir um fluxo limite que varia de acordo com cada membrana. Para uma mesma pressão, a membrana GR61PP de menor fluxo, não atingiu o fluxo limite como as outras duas membranas testadas.
- As membranas GR61PP e HN06 sofrem uma maior interação com a albumina bovina do que com a dextrana, enquanto a SN04 interagiu mais com a dextrana do que com a albumina bovina. A diminuição do fluxo de permeado mesmo após a lavagem da membrana caracteriza o fenômeno do “fouling”, que afeta irreversivelmente a performance da membrana.
- As membranas hidrofílicas apresentam maior rejeição para um dado fluxo do que a hidrofóbica quando utilizada para separação de dextrana. A diferença na afinidade da membrana com água é pouco significativa quando se analisa a rejeição da solução de albumina bovina.
- O aumento da vazão de alimentação provoca um aumento na rejeição de soluto. O “fouling” e a polarização de concentração são minimizados com o aumento da vazão de alimentação. O efeito da vazão de alimentação é mais significativo para membranas de alto fluxo. Neste caso, a membrana GR61PP mostra pouco efeito da vazão de alimentação sobre a rejeição e as membranas SN04 e HN06 mostram forte crescimento da rejeição até cerca de  $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  e, acima deste valor, a rejeição mantém-se praticamente constante.
- Entre as membranas testadas a SN04 se mostrou mais adequada, já que apresenta boa rejeição e fluxos maiores que as demais para uma dada pressão nas condições experimentadas.

#### REFERÊNCIAS

- Aimar, P., et al. (1986), “Membrane-Solute Interaction: Influence on Pure Solvent Transfer During Ultrafiltration”, *Journal of Membrane Science*, 29, 207-224.
- Bagassi, M. e Chauveteau, G., (1985), “Passage de Macromolécules Flexibles à Travers des Micropores Non-adsorbants”, *Interactions solide-liquide dans les Milieux Poreux*, Editions Technip, Paris, 681-692.
- Baker, R. W. e Strathmann, H., (1970), “Ultrafiltration of Macromolecular Solutions with High – Flux Membranes”, *Journal of Applied Polymer Science*, 14, 1197-1214.
- Bellucci, F. e Drioli, E., (1975), “Protein Ultrafiltration: an Experimental Study”, *Journal of Applied Polymer Science*, 19 (6), 1639-1647, 1975.
- Bottino, A. et al., “Ultrafiltration of Hydrosoluble Polymers. Effect of Operating Conditions on the Performance of the Membrane”, (1984), *Journal of Membrane Science*, 21, 247-267.
- Caldeira, L. E., (1984), “Síntese e Caracterização de Membranas de Acetato de Celulose para Ultrafiltração”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ.
- Dubois, M. et al., (1956), “Colorimetric Method for determination of Sugars and Related Substances”, *Anal. Chem.* 28, 350-356.
- Fane, A.G., (1983), “Factors affecting flux and rejection in ultrafiltration”, *J. Sep. Proc. Technol.*, 4 (1), pp15.
- Granath, K. A., (1958), “Solution Properties of Branched Dextrans”, *Journal of Colloid Science*, 13 (4), 308-328.
- Jönsson, C. e Jönsson, A. -S., (1995), “Influence of the Membrane Material on the Adsorptive Fouling of Ultrafiltration Membranes”, *Journal of Membrane Science*, 108, 79-88.

- Jönsson, A. -S, (1998), "Fouling During Ultrafiltration of Low Molecular Weight Hydrophobic Solute", *Separation Science and Technology*, 33 (4), 503-516.
- Matthiasson, E., (1983), "The role of macromolecular adsorption on fouling of ultrafiltration membranes", *Journal of Membrane Science*, 16, pp. 23.
- Nobrega, R. e Balmann, H., (1989), "The Deformation of Dextran Molecules: Causes and Consequences in Ultrafiltration", *Journal of Membrane Science*, 40, 343-350.
- Porter, M. C., (1972), "Concentration Polarization with Membrane Ultrafiltration", *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop.*, vol 11, n° 3.
- Reihanian, H., Robertson, C. R. e Michaels, S. A, (1983), Mechanisms of Polarization and Fouling of Ultrafiltration Membranes by Proteins", *Journal of Membrane Science*, vol 16, pp. 237-258.
- Rudie, B.J. et al. (1990),"Influence of Operating Parameters on Ultrafiltration Membrane Dextran Rejection", *International Congress on Membranes and Membranes Processes*, Chicago.
- Suki, A, Fane, A.G., Fell, C. J. D., (1984), "Flux Decline in Protein Ultrafiltration", *Journal of Membrane Science*, vol 21, pp. 269-283.
- Suki, A, Fane, A G., Fell, C. J. D., (1986), "Modeling Fouling Mechanisms in Protein Ultrafiltration", *Journal of Membrane Science*, vol 27, pp. 181-194.
- Thorn, T. M. e Wood, P. W., (1981), "Observations on the Fouling of Polysulphone Membranes by Acid Whey", *New Zealand Journal of Dairy Science and Technology*, vol 16, pp. 113-120.
- Wang, S. S., Hu, G. J., (1985), "Membrane Fouling and Determination of Gel Layer Growth Rate in Membrane Separation", *Desalination*, vol 56, pp. 405-412.
- Youn, K et al., (1996), "Effects of Natural Convection Instability on Membrane Performance in Dead-end and Cross-flow Ultrafiltration", *Journal of Membrane Science*, 116, 229-241.