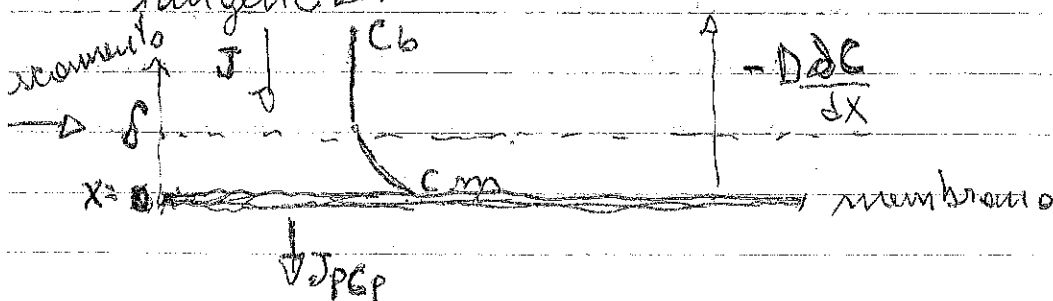


Pontos.

b) Considerando uma solução homogênea, consistindo em um solvente e um soluto e que a membrana utilizada seja uma barreira seletiva que permita a passagem (permeação) apenas do solvente, resultará na completa retenção do soluto. Isso resultará em um aumento da concentração de soluto próxima à superfície da membrana (C_m), que, por sua vez, será maior que a concentração de soluto no seio da solução de alimentação (C_b).

O resultado disso é a formação de uma camada (filme) de soluto próximo à superfície da membrana (no lado de alimentação) que atuará como uma resistência adicional ao transporte de massa através da membrana, influenciando a permeabilidade e a seletividade da mesma.

Essa filme é formado pois, pela ação do gradiente de pressão entre os dois lados da membrana, soluto e solvente são direcionados à membrana e apenas o solvente atravessa (no caso de membrana com 100% de retenção de soluto) e o soluto retido forma um filme de soluto próximo à membrana (com concentração maior do soluto que aquela no seio da solução), de modo que, por diferença de concentração ocorre um fluxo difusivo de soluto desde a membrana até o seio da solução. Na figura abaixo é representada a polarização de concentração ocorrendo em uma membrana plana com escoamento tangencial.



Considerando que próximo à superfície da membrana a concentração de soluto é C_m e a concentração no seio da solução é C_b e D é o coeficiente de difusão do soluto desde a membrana até o seio da solução, ao longo do filme de espessura δ , pelo modelo da camada limite do filme a equação geral que representa a polarização de concentração é:

$$J_p = \frac{D}{\delta} \ln \left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} \right)$$

onde J_p é o fluxo de permeado, C_p é a concentração de soluto no permeado e D/δ é o coeficiente de transmissão de massa (K).

$$J_p = K \ln \left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} \right)$$

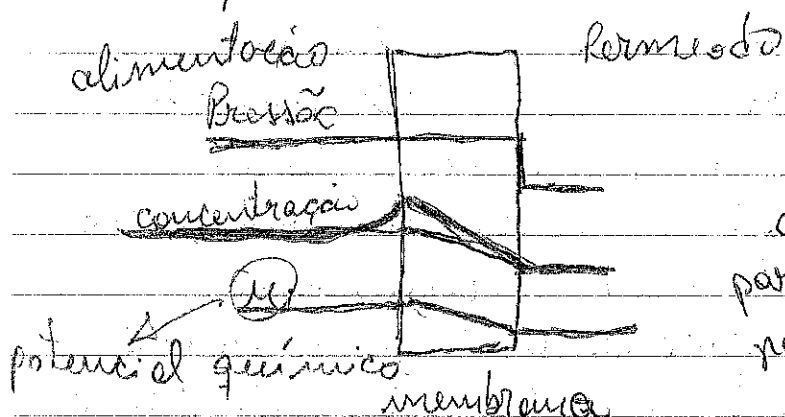
Como mencionado anteriormente, a polarização de concentração influencia na permeabilidade e seletividade da membrana. Sua ocorrência ocasiona uma nova resistência à transmissão de massa, resultando em uma queda no fluxo de permeado. Além disso, ela é precursora da incrustação (fouling) das membranas, que é um dos principais inconvenientes (problemas) de processos de separação por membranas, podendo levar à inviabilização do processo.

A polarização de concentração também influencia na seletividade das membranas pois a medida que há um aumento na concentração de soluto próximo à superfície da membrana no lado da alimentação, pode haver a passagem, permeação, de soluto pela membrana (associado ao aumento da pressão osmótica, gradiente de concentração entre C_m e C_p), reduzindo, assim, a retenção da membrana.

A polarização de concentração pode ser minimizada melhorando a hidrodinâmica do escoamento na alimentação, com o aumento do número de Reynolds. (2) *transmembrana*

Por isso

a), Na osmose inversa o transporte de massa através da membrana ~~corre~~ pelo mecanismo de solução-difusão onde o permeante se dissolve na membrana (no lado de alimentação) e se difunde através dela até a corrente de permeado.



NA figura ao lado, ~~plote-se~~ considere apenas as linhas vermelhas para o caso da concentração, pressão e potencial químico (μ).

O mecanismo de transporte pelo modelo solução-difusão está explicado com mais detalhes nas páginas 5 e 6 para o ponto 2, e devem ser consideradas.

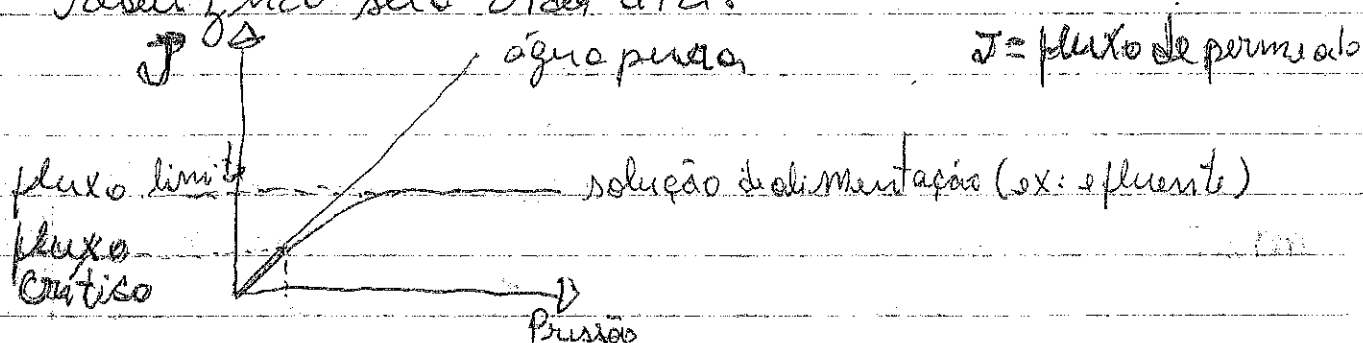
Nesse sentido, o fluxo molar de um soluto N_A , parcial ~~mente~~ rejeitado pela membrana é função da permeabilidade deste soluto na membrana e das concentrações desse soluto na membrana nos lados da alimentação (C_{ma}) e do permeado (C_{mp}).

$N_A = B(C_{ma} - C_{mp})$, onde B é a permeabilidade do soluto.

Esse parâmetro B , permeabilidade do soluto, é função da sorção do soluto na membrana (S) e sua difusão através dela, que depende também da espessura da membrana.

Como explicado detalhadamente nas páginas 5 e 6, pelo modelo da solução-difusão, o aumento da pressão hidrostática leva ao aumento do fluxo de permeado (solvente) que é muito maior que o aumento observado

no fluxo de soluto. Como a membrana é seletiva, permitindo a passagem do solvente e retraindo o soluto, forma-se ~~um~~ polarização de concentração (conforme apresentado no ponto 1b). O aumento progressivo da pressão resulta em um aumento progressivo da camada polarizada, aumentando a resistência ao transporte através da membrana. Essa resistência ao transporte pode ser tão elevada ao passo que o aumento da pressão não acarreta no aumento do fluxo de permeado, o qual atinge um platô. Esse platô é denominado fluxo limite. Operar um sistema de membranas no fluxo limite não é recomendado pois, além de haver um desperdício de gasto energético, também cause sérios danos de incrustação nas membranas, reduzindo sua vida útil.



Na figura acima também é apresentado o fluxo crítico, caracterizado pelo ponto onde há um desvio da linearidade do fluxo com a pressão (observado apenas para o caso do exemplo do efluente). Nesse caso, observa-se um desvio das curvas de fluxo da água pura em relação ao fluxo com o efluente. Portanto, uma operação eficiente para o tratamento desse efluente seria com um fluxo inferior ao fluxo crítico. Abaixo do fluxo crítico considera-se que a incrustação é mínima ou aceitável em um processo com membranas.

Ponto 2 (a, b):

Na osmose inversa (OI), operação que utiliza membranas densas, o transporte ocorre pelo mecanismo de solução difusão, onde o permeante se dissolve na membrana (no lado da alimentação), se difundindo através dela até o compartimento de permeado. Na OI, a força motriz é o gradiente de pressão entre os dois lados da membrana, onde a pressão hidrostática aplicada deve ser superior à pressão osmótica da solução a ser tratada, para que ocorra a separação. Nesse sentido, o fluxo de solvente "i" através da membrana pode ser descrito pela seguinte equação:

$$J_i = \frac{L_p}{\mu} (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (\text{eq 1})$$

onde L_p é a permeabilidade hidráulica da membrana, μ é a viscosidade da solução, ΔP é o gradiente de pressão hidrostática, $\Delta \Pi$ é o gradiente de pressão osmótica e "e" é a espessura da membrana.

~~Considerando~~

O fluxo do soluto "j" pode ser descrito da seguinte forma:
(eq 2) $J_j = B(C_{ma} - C_{mp})$, onde C_{ma} e C_{mp} são as concentrações de soluto na membrana no lado da alimentação e no lado do permeado, respectivamente, enquanto o parâmetro B é a permeabilidade do soluto ~~e não é~~.

Para a determinação da capacidade de retenção de um determinado sal, deve-se medir a concentração de sal na corrente de alimentação (C_b) e na corrente de permeado (C_p), sendo então:

$$R(\%) = \frac{C_b - C_p}{C_b} \cdot 100$$

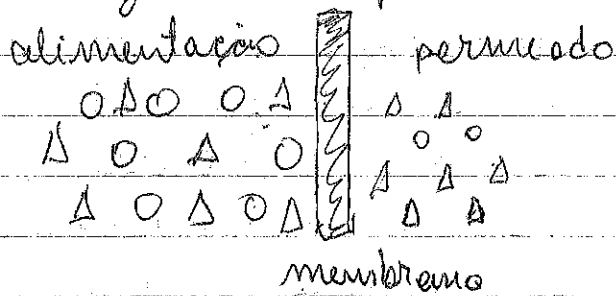
onde R é a capacidade de retenção (ou rejeição) da membrana

Pelo modelo da solução-difusão, usualmente utilizado para descrever o transporte através de membranas de OI, o fluxo de permeado (solvente) aumenta com o aumento da pressão hidrostática, conforme pode ser observado na equação 1. Por outro lado, o fluxo de soluto não depende da pressão hidrostática, dependendo apenas do gradiente de concentração através da membrana. Nesse sentido, o aumento do gradiente de pressão hidrostática leva a um aumento no fluxo de solvente, mas não influencia ^{significativamente} no fluxo de soluto. O fluxo de soluto, por sua vez, tem um leve aumento, mas está associado ao aumento na concentração de soluto próximo à superfície da membrana devido à polarização de concentração. Portanto, ~~conclui-se~~ ^{pode-se assumir} que a elevação da pressão na OI aumenta (significativamente) o fluxo de solvente ~~e~~ e o fluxo de soluto fica praticamente constante, resultando em um aumento na rejeição ao soluto.

ID:05

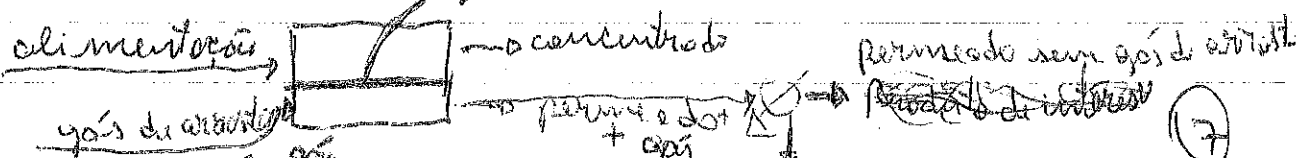
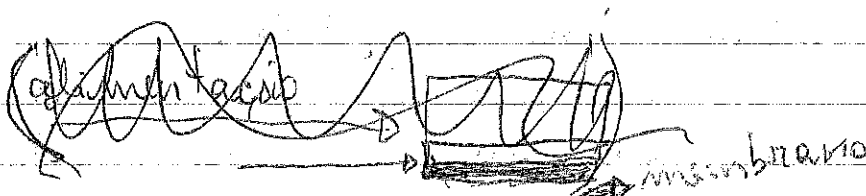
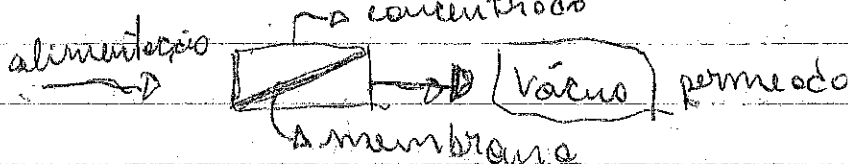
Paro 6:

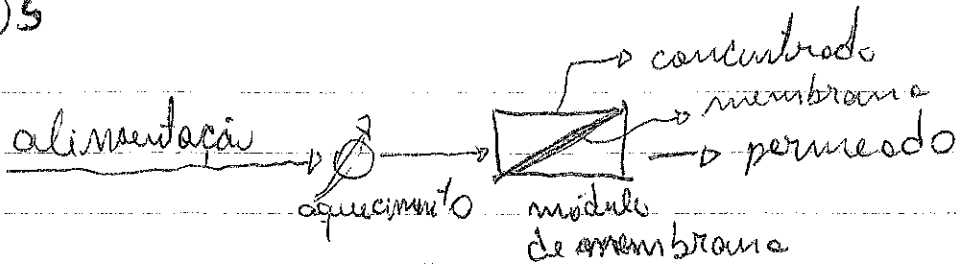
A permeação de vapor (ou separação de gases) é um processo de separação por membranas utilizado para separação de misturas gasosas. A separação só será possível se a membrana for seletiva a pelo menos um dos gases da mistura. A força motriz para a separação é o gradiente de pressão.



Δ = gás mais permeável
O = gás menos permeável

A pervaporação é um processo de separação por membrana, cuja alimentação está na fase líquida (inclusive) no interior da membrana, mas é coletado na fase ~~de~~ vapor na corrente de permeado. Nesse processo a pressão de vapor dos componentes da mistura tem papel importante na separação. A força motriz para promover a separação é gerada pela formação de vácuo no lado do permeado (ou passagem de um gás de arraste). Também pode haver aquecimento da corrente de alimentação, sem promover a vaporização (pois seria destilação por membrana).





As membranas utilizadas nos processos de pervaporação e permeação de vapor são, geralmente, membranas densas, poliméricas, preparadas a partir de uma variedade de polímeros como poli(etileno), PVDF, etc.

As membranas podem ter um maior ou menor grau de cristalinidade (rigidez da cadeia polimérica), que está associada ao tipo de polímero e também do método usado em sua preparação. Membranas mais amorfas têm uma maior mobilidade de suas cadeias poliméricas e, consequentemente, apresentam maior permeabilidade e menor seletividade. Por outro lado, membranas com maior grau de cristalinidade têm cadeias poliméricas mais rígidas, com menor mobilidade das cadeias, o que dificulta a dissolução do permeante na membrana, ocasionando menores fluxos de permeado, porém apresentam uma maior seletividade.

A permeação de vapor é utilizada na separação de gases, separando O_2 de N_2 ; na separação de CO_2 de CH_4 , importante para a purificação do CH_4 .

A pervaporação pode ser usada para separação de misturas azeotrópicas como a desidratação do etanol. Também pode ser usada para remoção de compostos orgânicos voláteis de efluentes, visando sua recuperação ou melhoria da qualidade do efluente. Além disso, também pode ser usada para recuperação (extração) de aromas de sucos e outras bebidas.

Na pervaporação o transporte de massa ocorre pelo modelo da solução-difusão, pois utilizam-se membranas densas nesse processo. Para tal, o permeante deve ter afinidade pelo material da membrana, onde ele deve se adsorver na membrana (no lado da alimentação), se difundir através dela (no estado líquido) e ser coletado como vapor no lado do permeado. Sendo assim, a permeabilidade (P) de uma espécie química é função do coeficiente de sorção (S) dessa espécie na membrana e sua difusão (D), através dela:

$$P = S \cdot D$$

Para baixas ~~concentrações~~ ^{concentrações de soluto} ~~pressão~~, a concentração de permeante adsorvido na membrana segue a lei de Henry: $C_p = S \cdot \Delta C$, onde C_p é a concentração de permeante que se dissolve (penetra) na membrana, S é o coeficiente de sorção e ΔC é ~~a diferença de concentração~~ ^{a concentração da solução}.

~~(Como apresentado na discussão sobre o ponto, para a polarização de concentração)~~

Na discussão do ponto 1 foi apresentado como ~~a~~ forma a polarização de concentração em processos conduzidos pelo gradiente de pressão, onde ocorre o aumento da concentração de soluto rejeitado pela membrana próximo à sua superfície. A equação geral da polarização de concentração é:

$$J_p = K \ln \left(\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} \right)$$

onde J_p é o fluxo de permeado, K é o coeficiente de trans. ferência de massa na camada fluida adjacente à membrana e C_m , C_p e C_b são as concentrações do permeante na membrana, no permeado e no seio da solução de alimentação, respectivamente.

10.