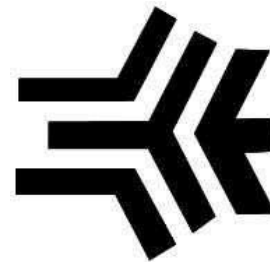




UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS [FACULDADE DE ENGENHARIA]

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E MEIO AMBIENTE (DESMA)



Tópicos Especiais:

Processos de Separação com Membranas no Tratamento de Efluentes e Reúso

Prof.: Ronei de Almeida

ronei.almeida@eng.uerj.br

Aula 2: PSM

Tópicos:

- Conceitos e fundamentos: recuperação, rejeição, fluxo permeado, etc.
- Morfologia das membranas.
- Módulos com membranas.

Introdução (cont.)

PROCESSO DE SEPARAÇÃO COM BASE EM MEMBRANAS



Figura: Representação do processo de separação por membranas com escoamento tangencial.

Elementos do sistema

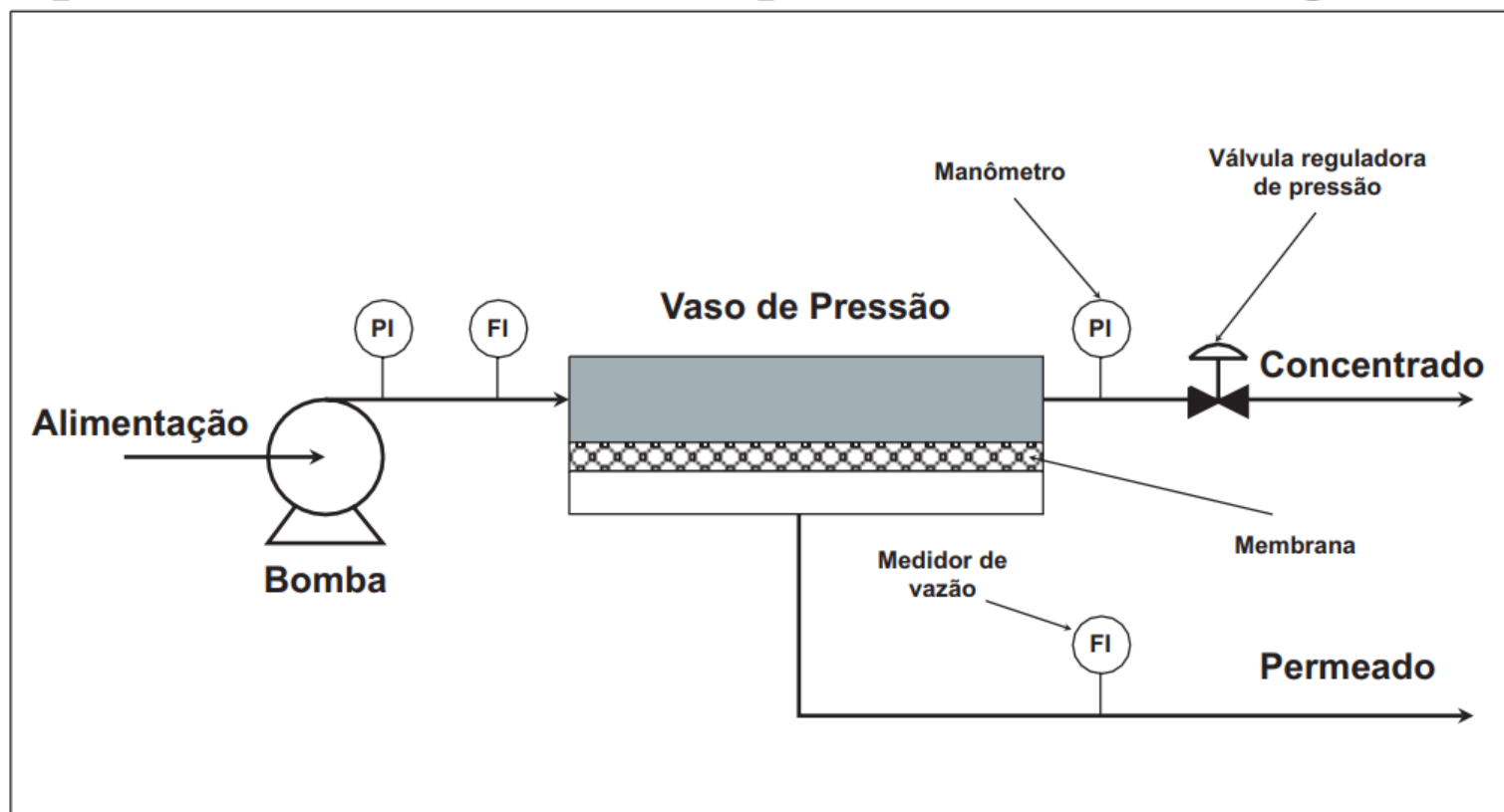
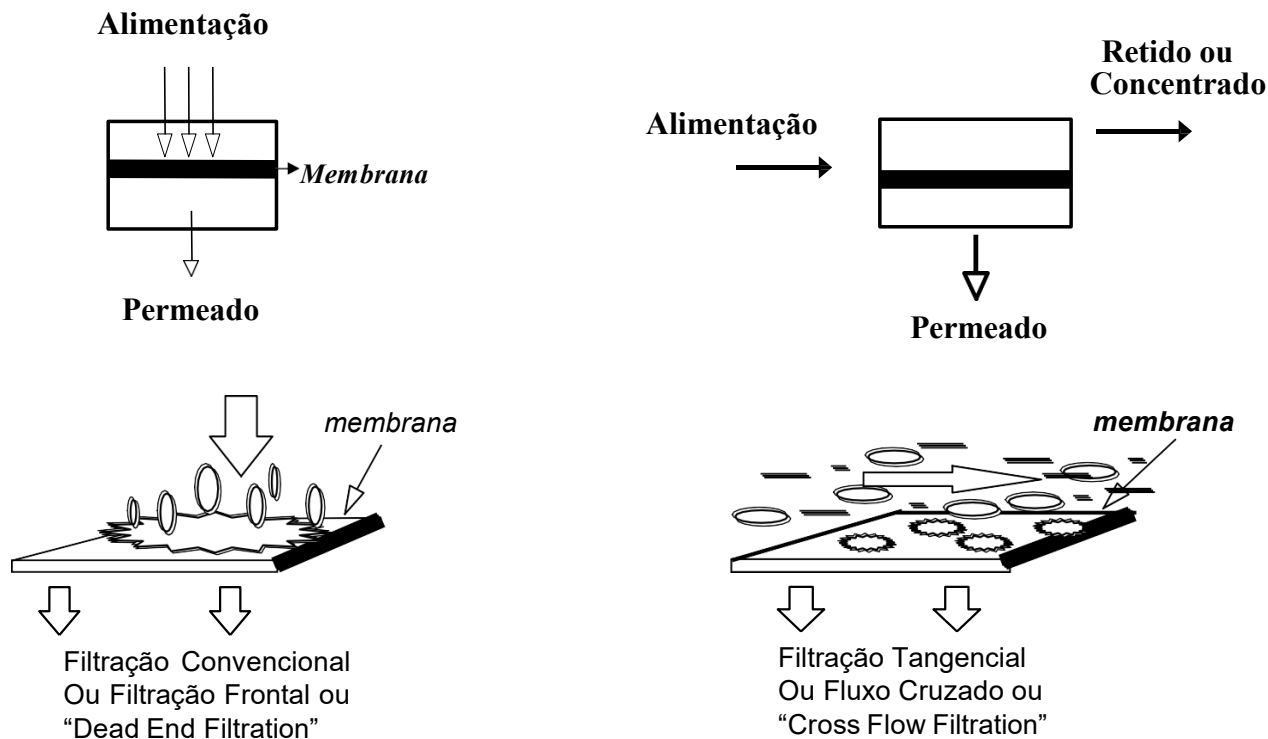


Figura: Representação esquemática do funcionamento dos processos de separação por membranas na prática.

Introdução (cont.)

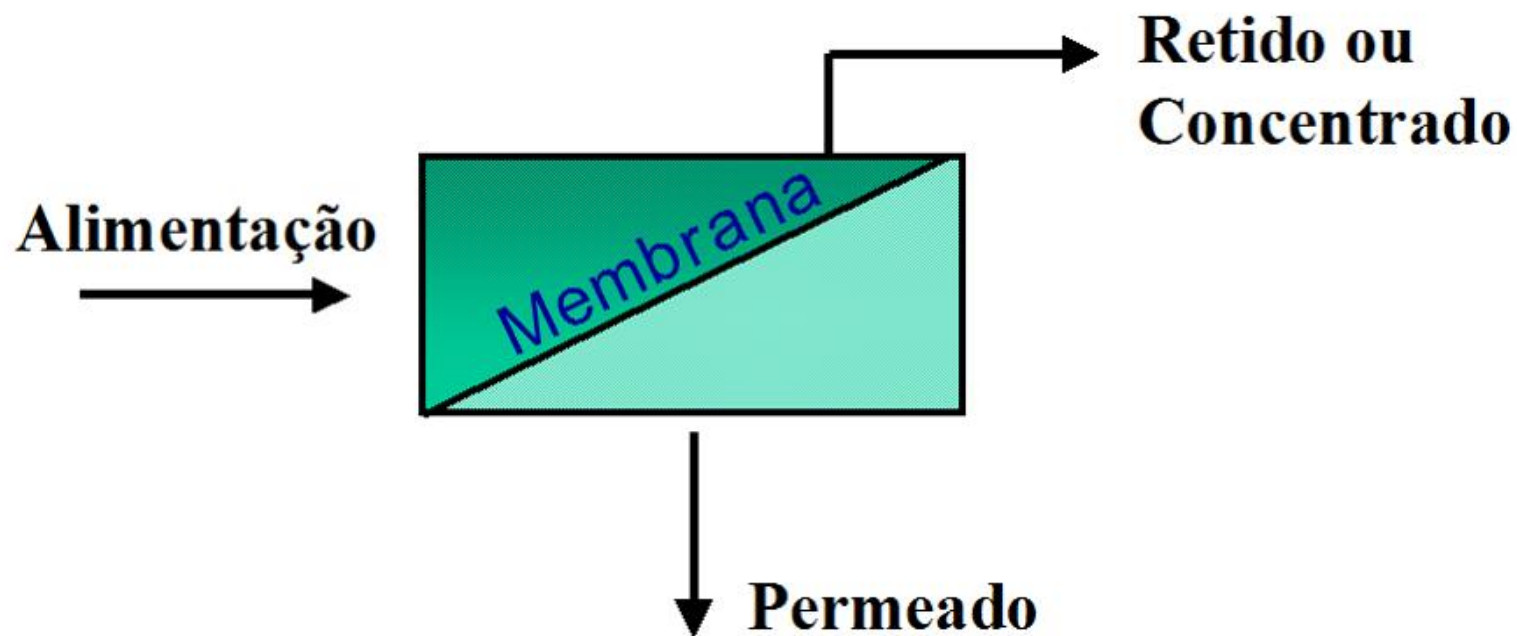
- O escoamento de água pode ser perpendicular (*dead end*), ou tangencial (*cross flow*), à membrana.
- No escoamento tangencial nem todo o fluído que alimenta o sistema atravessa a membrana.
- Em alguns casos são as espécies que se deseja separar que atravessam a membrana.
- São produzidas duas correntes: o concentrado e o permeado.

Tipo de Operação dos PSM:



Introdução (cont.)

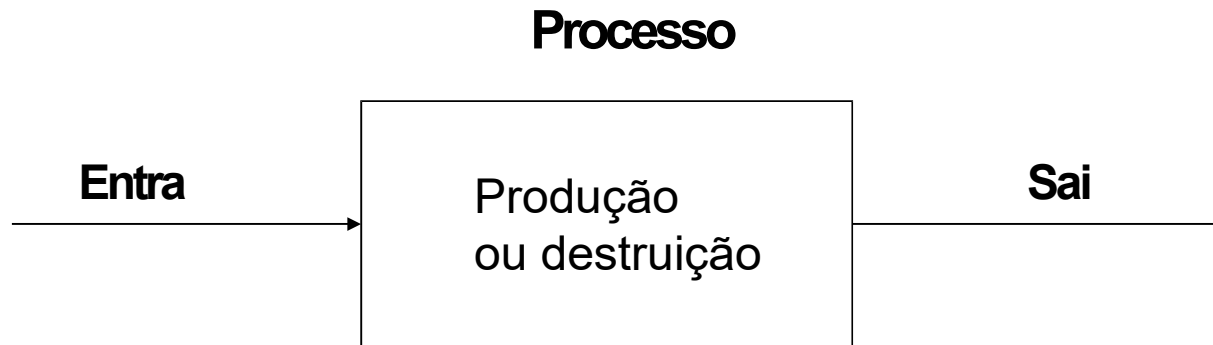
Membrana: Barreira seletiva



Balanço de Massa

- Relaciona os fluxos de alimentação e saída de um sistema com as suas respectivas concentrações.
- Em alguns sistemas, deve-se considerar os fenômenos de produção e desaparecimento dos contaminantes. Por exemplo, sistemas onde ocorrem reações químicas.

Balanço de Massa (cont.)



Lei da Conservação de Massa

Equação Básica de Balanço:

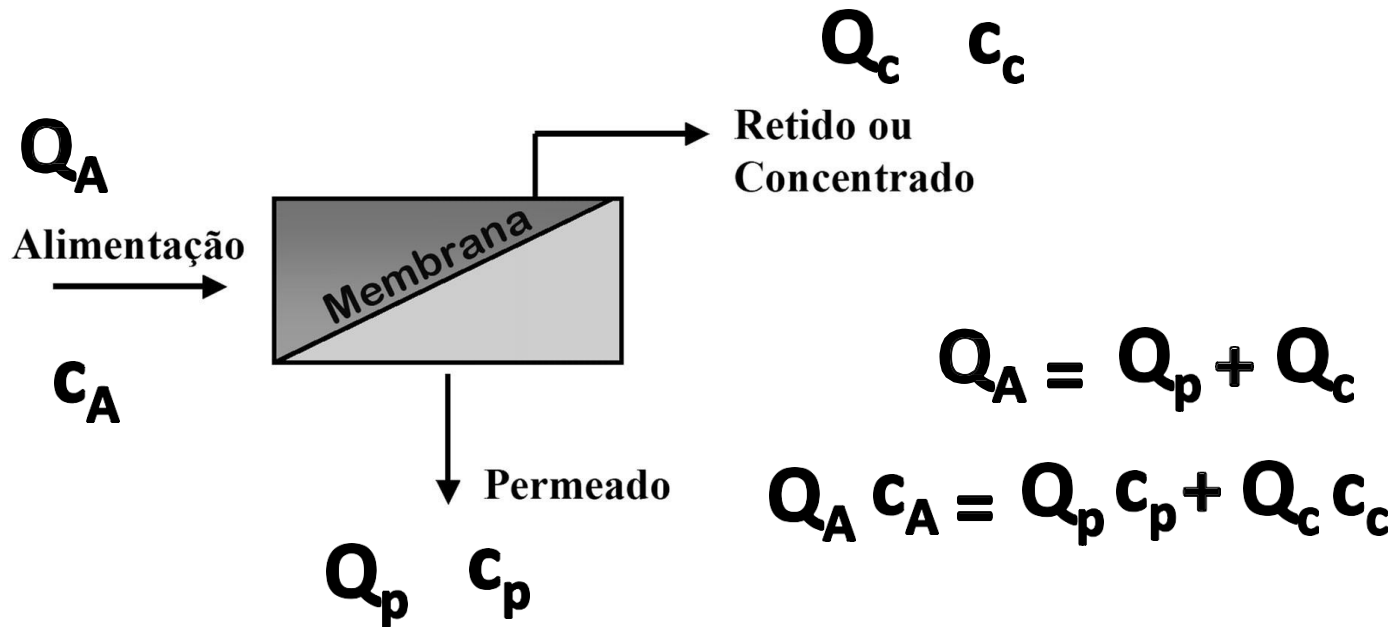
$$\text{ENTRA} - \text{SAI} + \text{PRODUÇÃO} - \text{DESTRUIÇÃO} = \text{ACÚMULO}$$

Balanço de Massa (cont.)

- Para sistemas de separação por membranas, não há produção ou destruição de contaminantes.
- Em regime estacionário, também não há acúmulo de matéria no sistema.

ENTRA NO SISTEMA = SAI DO SISTEMA

Balanço de Massa (cont.)



Processos de Separação com Membranas (PSM)

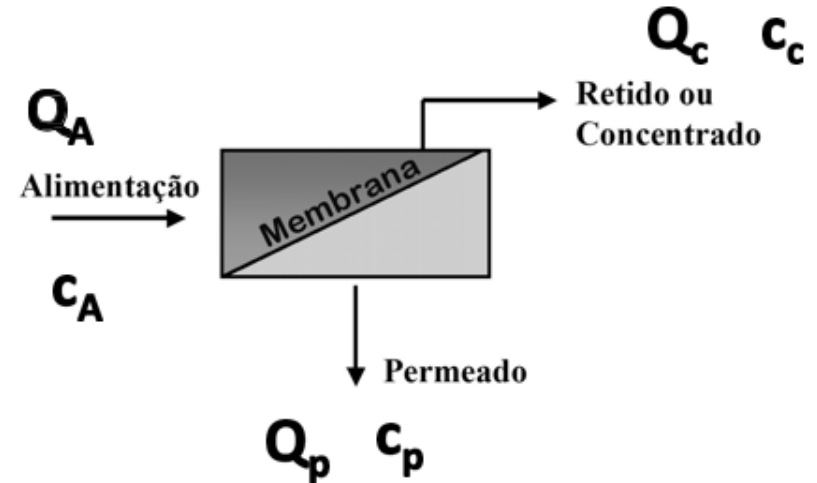
Equações de Projeto:

$$\text{Recuperação (\%)} = \frac{Q_p}{Q_A} \times 100$$

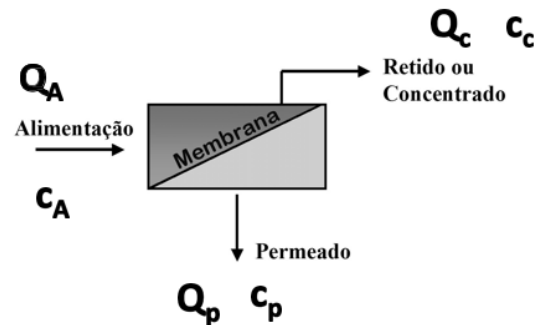
$$\text{Rejeição (\%)} = \frac{(c_A - c_p)}{c_A} \times 100$$

$$\text{Fluxo de Permeado [L/(m}^2\text{.h)]} = J = \frac{Q_p}{A}$$

$$\text{Fator de concentração [ad.]} = F_c = \frac{c_c}{c_A}$$



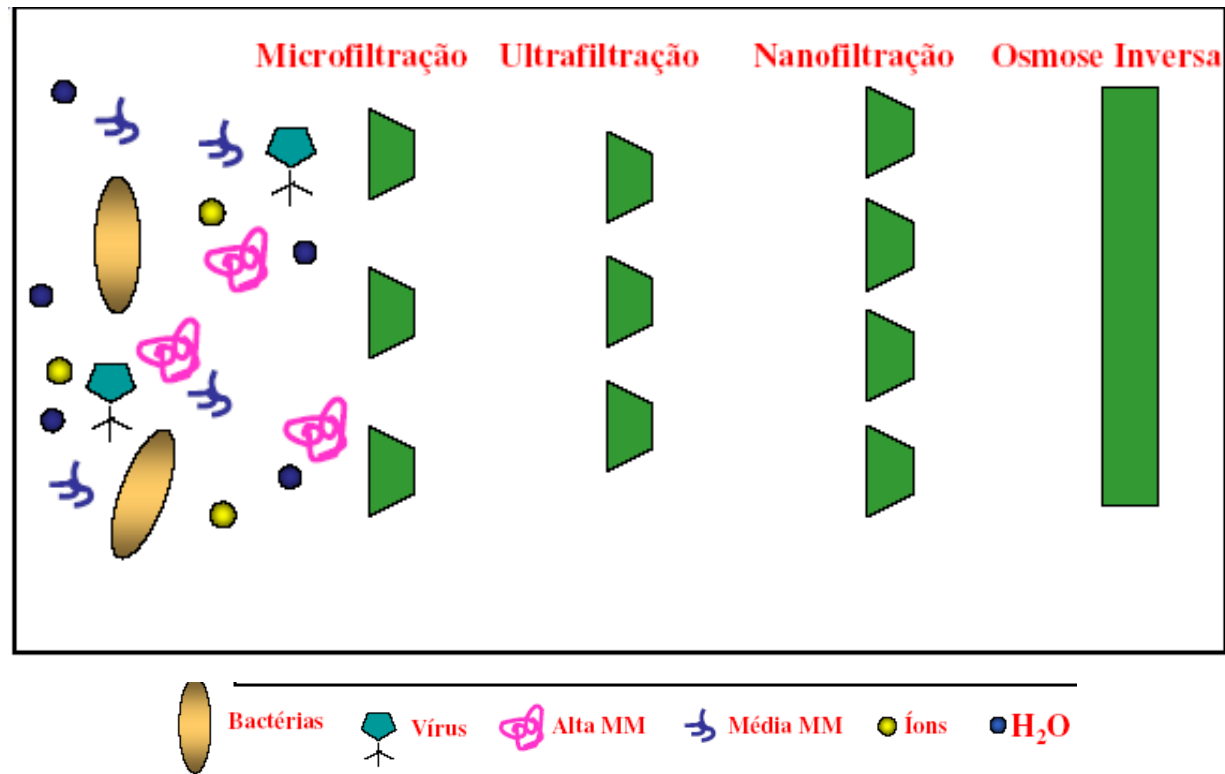
Exercício: Estime as vazões de concentrado e de efluente líquido que deve ser processado em um sistema de osmose inversa que produz 4000 m³/d de água para ser utilizada em operações de resfriamento. Admita que a recuperação do sistema de OI e a rejeição a sais é 90%. A concentração de SDT na alimentação é de 400 mg/L, estime a concentração de SDT na corrente de concentrado.



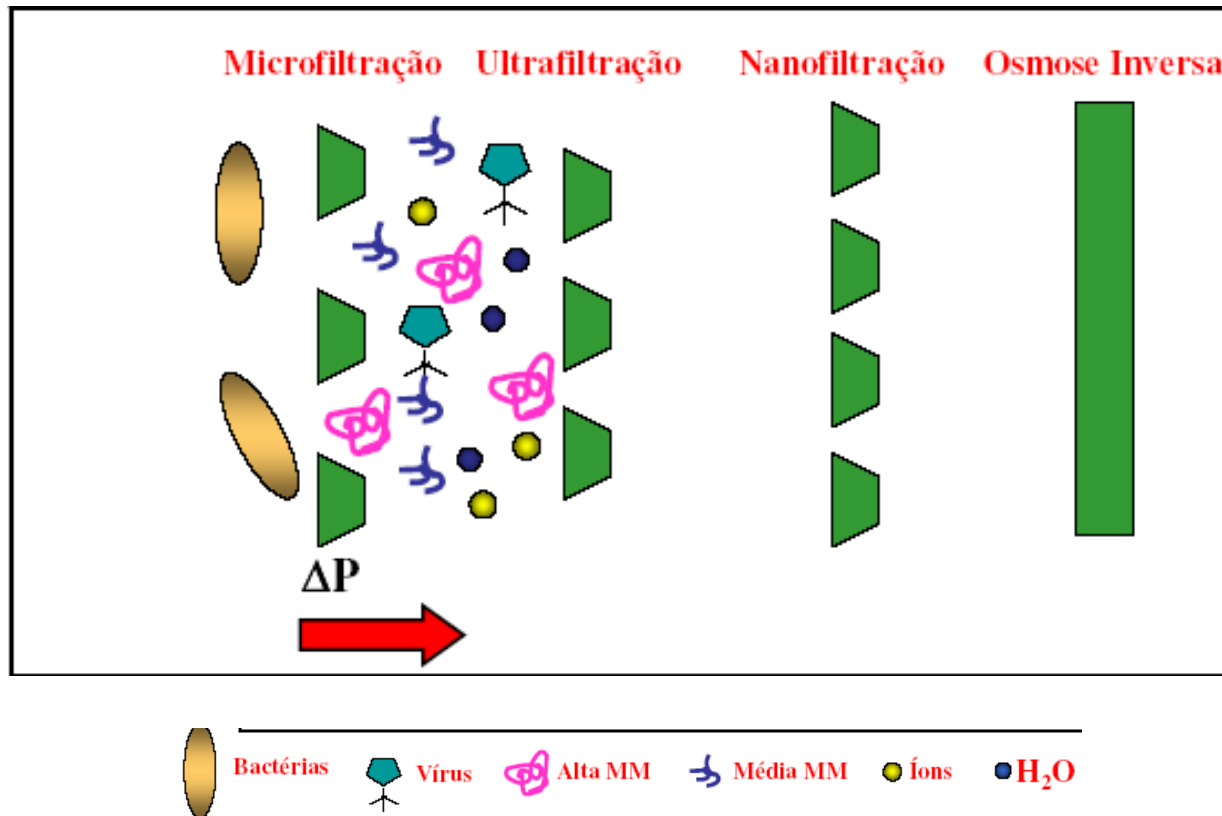
Principais PSM

- Microfiltração (MF);
- Ultrafiltração (UF);
- Nanofiltração (NF);
- Osmose Inversa (OI);
- Eletrodialise e Eletrodialise Reversa (ED/EDR);
- Pervaporação (PV).

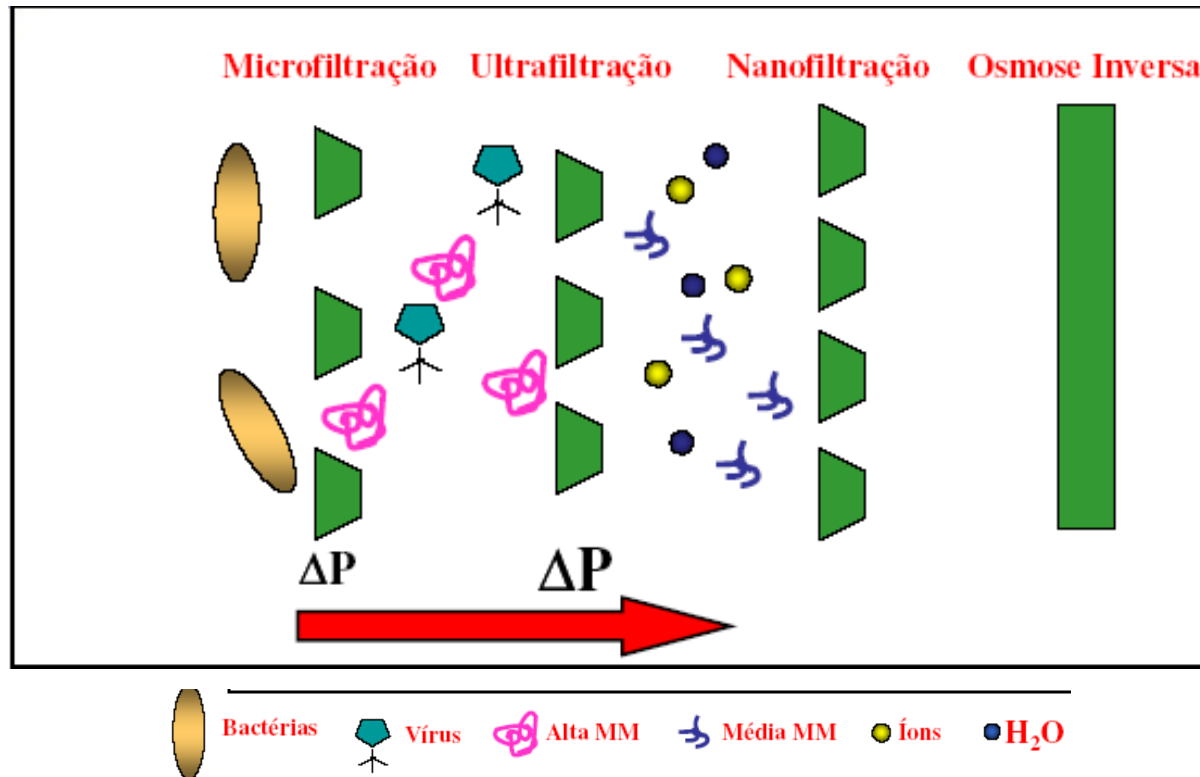
Resumo dos Processos tendo ΔP como força motriz:



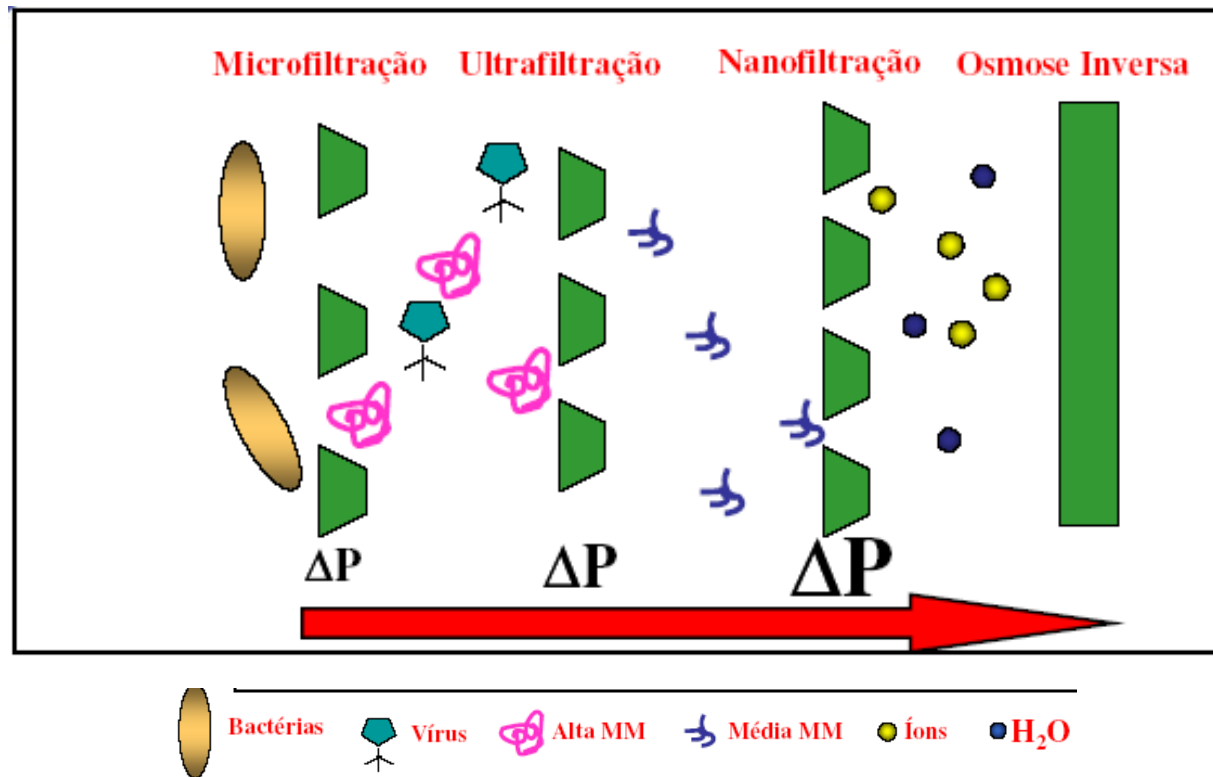
Resumo dos Processos tendo ΔP como força motriz:



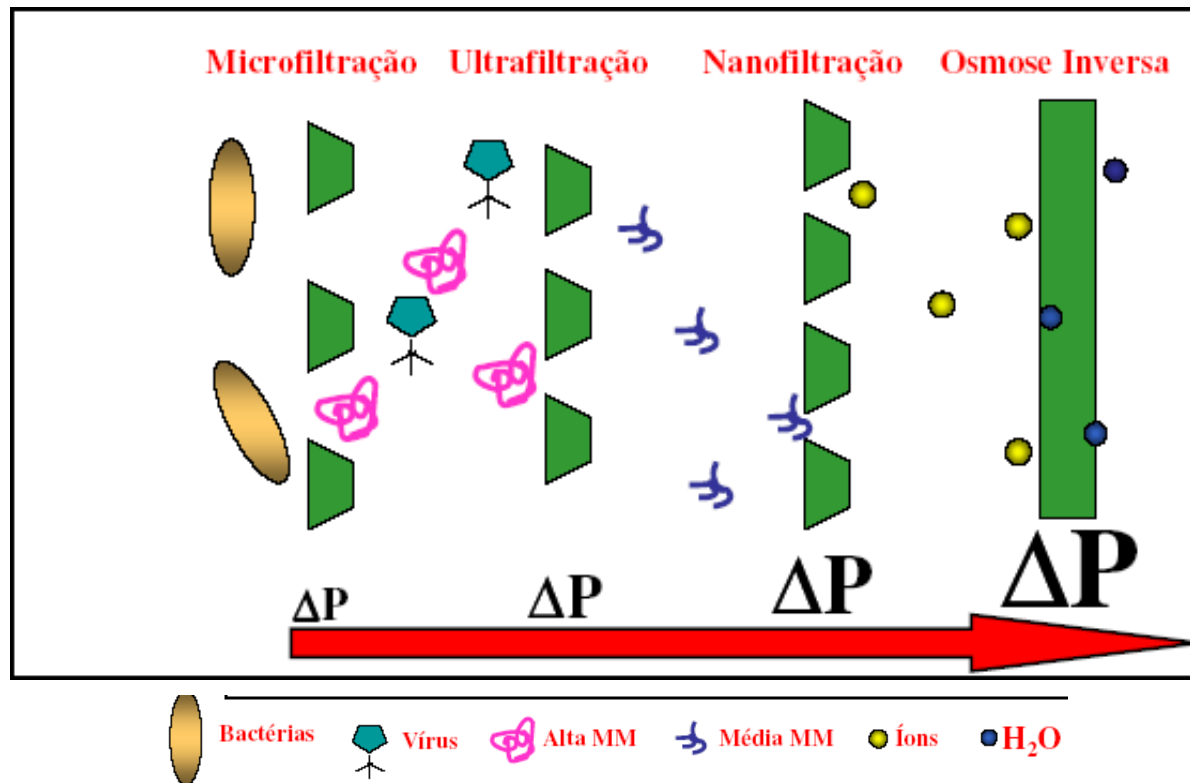
Resumo dos Processos tendo ΔP como força motriz:



Resumo dos Processos tendo ΔP como força motriz:



Resumo dos Processos tendo ΔP como força motriz:



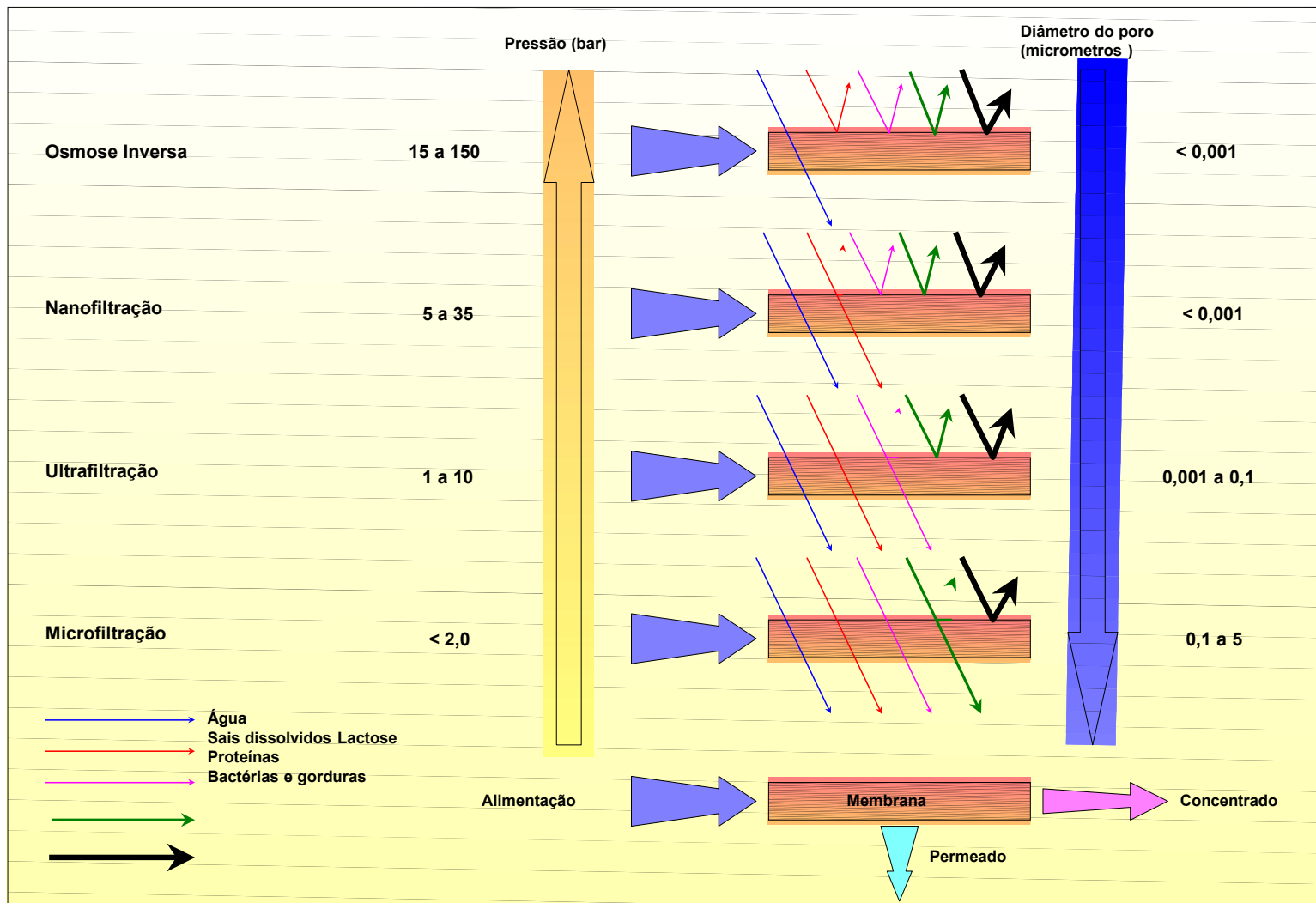


Figura: Capacidade de separação dos principais processos de separação por membranas.

Dimensões das Partículas e Moléculas (m) ↓		Técnica de Separação	
Micro-Organismos Macromoléculas e Vírus Moléculas de médio PM Moléculas de baixo PM e Íons Átomos	10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8} 10^{-9} 10^{-10}	Filtração Microfiltração 	ΔP Membrana
		Ultrafiltração 	ΔP Membrana
		Nanofiltração 	ΔP Membrana
		Osmose Inversa 	ΔP Membrana

Material das Membranas

POLIMÉRICOS

- ACETATO DE CELULOSE
- POLI(SULFONA)
- POLI(ÉTER SULFONA)
- POLI(ACRILONITRILA)
- POLI(ÉTER IMIDA)
- POLI(CARBONATO)

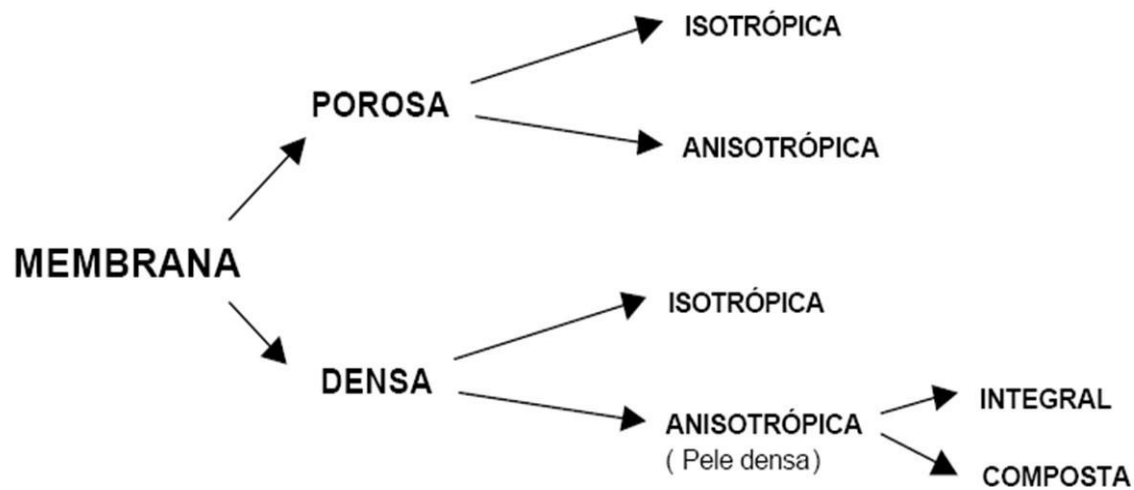
Polímeros para pele densa de membranas compostas

- *POLI(ALCOOL VINÍLICO)*
- *POLI(DIMETIL SILOXANO)*
- *POLI(URETANA)*
- *EPDM*
- *EVA*

NÃO POLIMÉRICOS

- CERÂMICAS
- CARBONO
- ÓXIDOS METÁLICOS
- METAIS

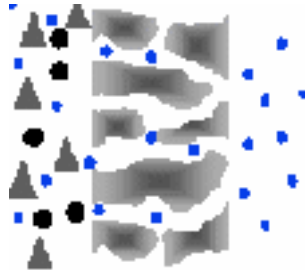
Morfologia das Membranas



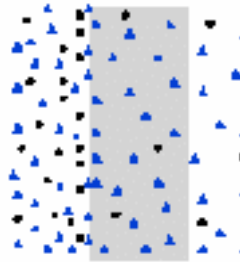
Morfologia das Membranas (cont.)

Em função das aplicações que se destinam:

Porosas



Densas (não porosas)



Capacidade seletiva



Tamanho dos poros
e das espécies

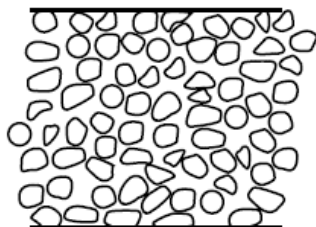


Afinidade das espécies
com o material da
membrana

Morfologia das Membranas (cont.)

Membranas Isotrópicas (Simétricas)

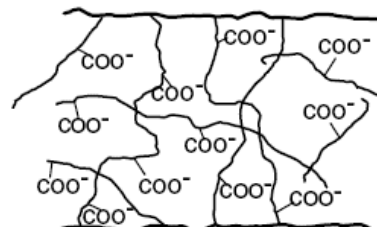
Membranas porosas



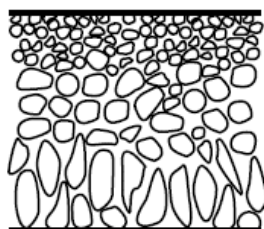
Membranas densas



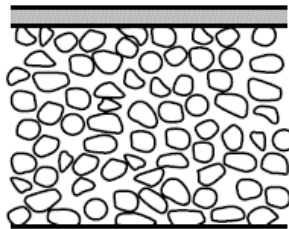
Membranas eletricamente carregadas



Membranas Anisotrópicas (Assimétricas)

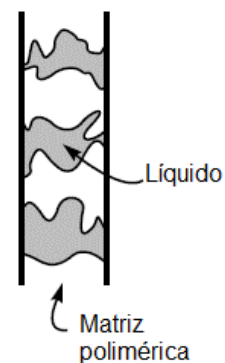


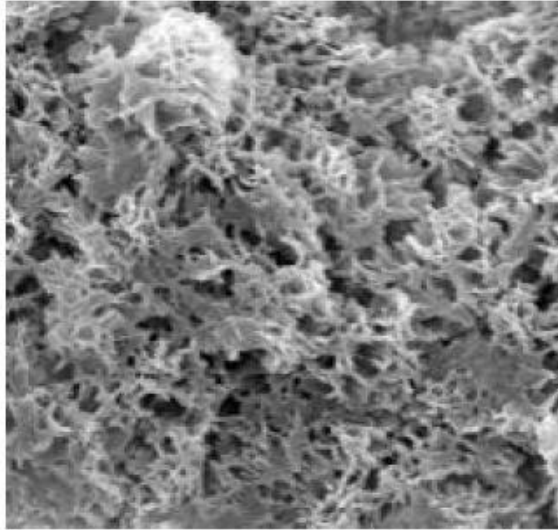
Membrana anisotrópica integral



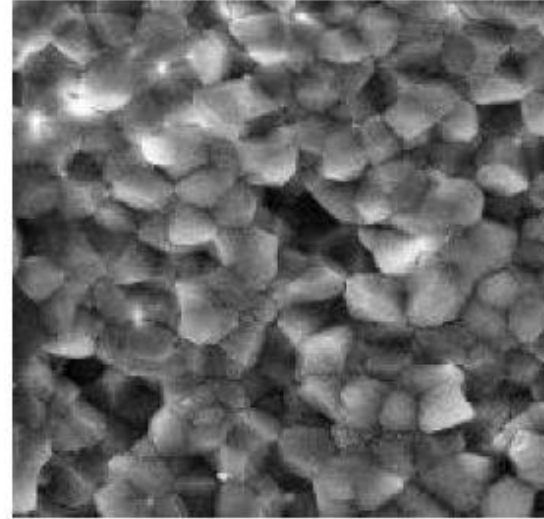
Membrana anisotrópica composta

Membrana líquida suportada

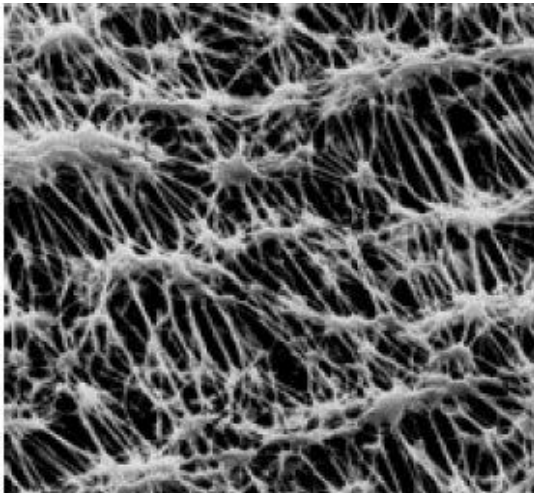




Detalhe da seção transversal de uma membrana isotrópica de polipropileno preparada por inversão térmica.

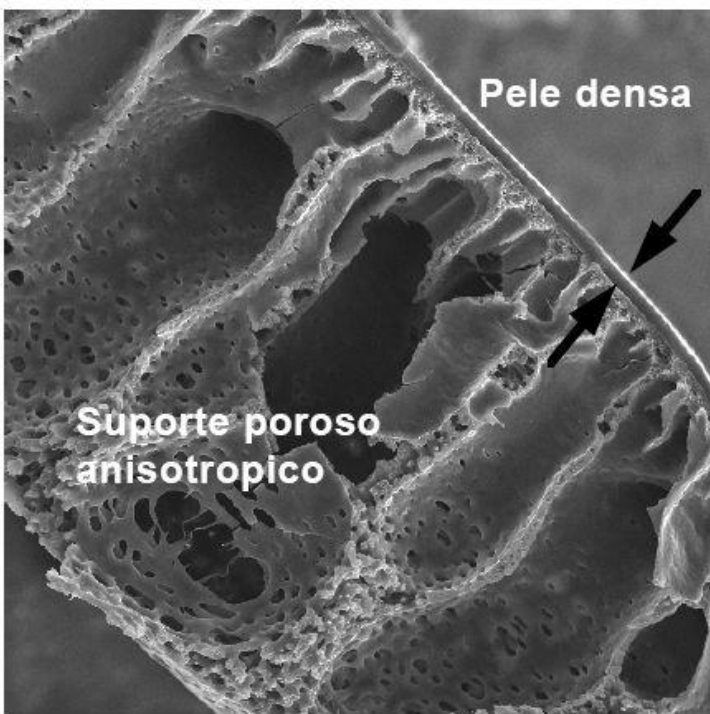


Detalhe da seção transversal de uma membrana isotrópica porosa produzida por sinterização de partículas de poli(etileno).

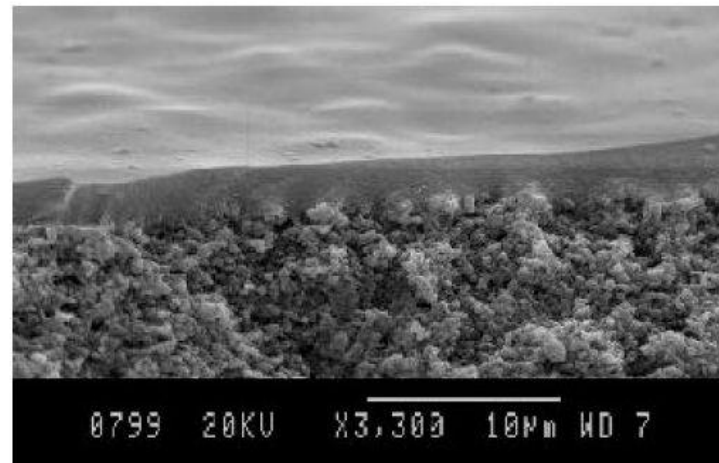


Detalhe da seção transversal de uma membrana isotrópica de PTFE produzida por estiramento mostrando a porosidade gerada.

MEMBRANAS POROSAS



Seção transversal de uma membrana anisotrópica densa composta com suporte de poli(eter sulfona) e pele de EPDM.



Corte da seção transversal próximo a superfície densa (seletiva) de uma membrana inorgânica anisotrópica de óxido de alumínio.

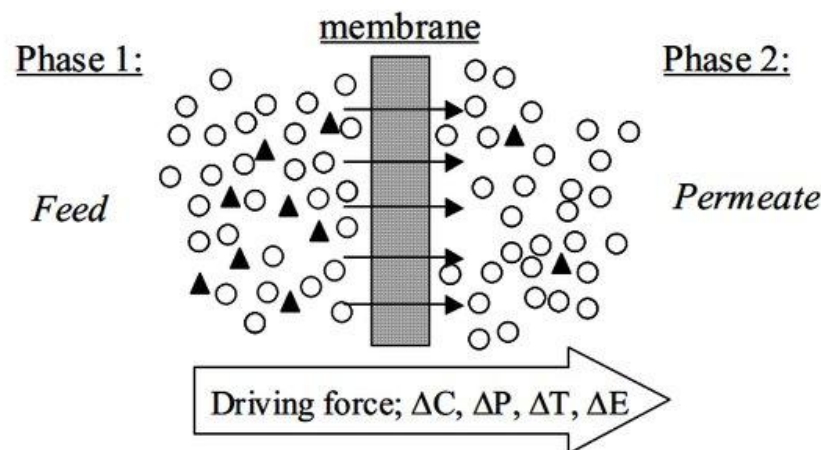
MEMBRANAS DENSAS

Transporte e Força Motriz (*Driving Force*)

Força Motriz: ΔC , ΔP , ΔT , ΔE

Em função da morfologia da membrana e do tipo de força motriz empregada, o transporte das diferentes espécies através da membrana pode ocorrer tanto pelo **mecanismo de convecção**, como pelo **mecanismo de difusão**.

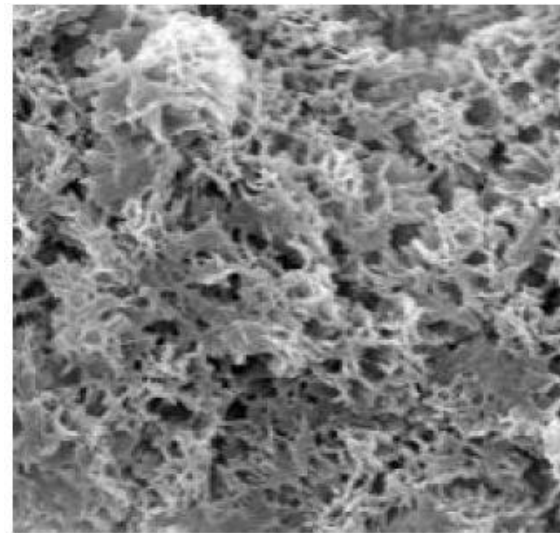
A morfologia da membrana define, também, os princípios em que se baseiam a sua capacidade seletiva.



Transporte e Força Motriz (*Driving Force*) (cont.)

Nas membranas porosas, a capacidade seletiva está diretamente associada à relação entre o tamanho das espécies presentes e o diâmetro dos poros da membrana.

Transporte convectivo: Micro, Ultra e Nanofiltração



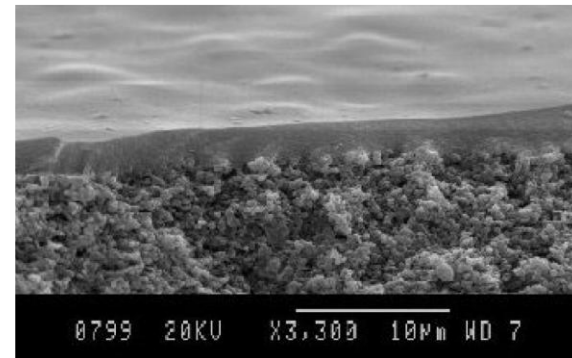
Detalhe da seção transversal de uma membrana isotrópica de polipropileno preparada por inversão térmica.

Transporte e Força Motriz (*Driving Force*) (cont.)

Nas membranas densas, a capacidade seletiva depende da afinidade das diferentes espécies com o material da membrana (etapa de natureza termodinâmica) e da difusão das mesmas através do filme polimérico (etapa de natureza cinética)

A difusão das espécies ocorre no espaço livre entre as cadeias poliméricas.

Transporte difusivo: Osmose inversa, permeação de gases, pervaporação.

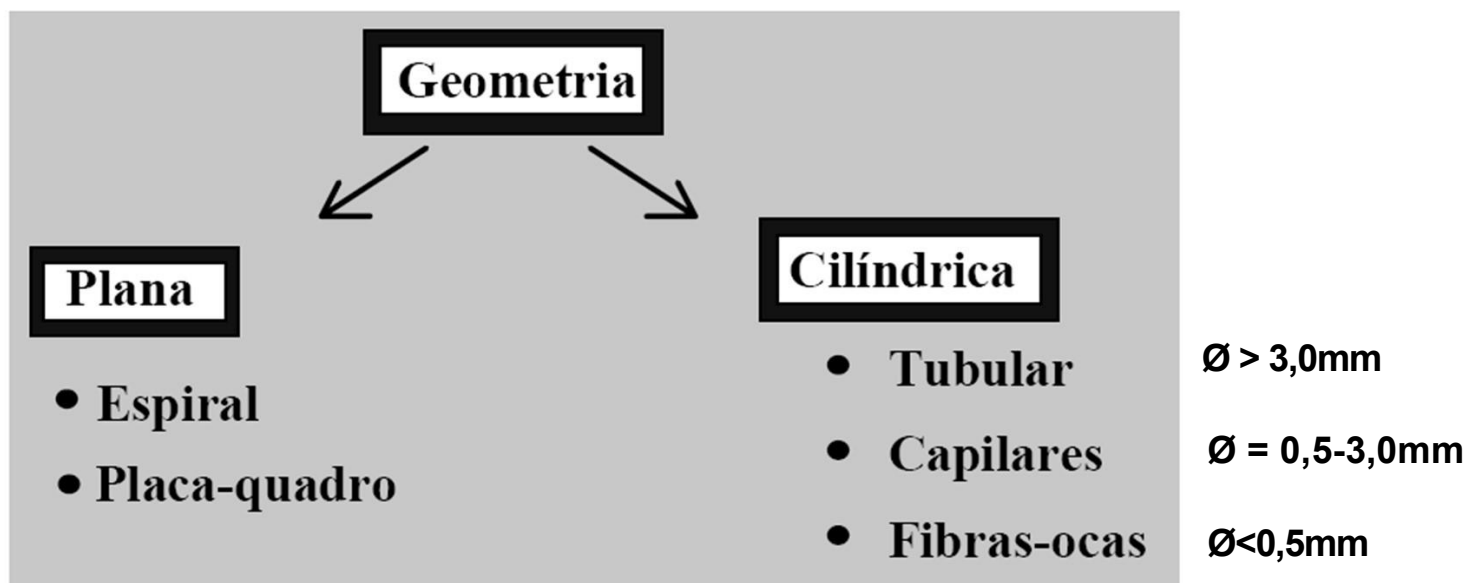


Corte da seção transversal próximo a superfície densa (seletiva) de uma membrana inorgânica anisotrópica de óxido de alumínio.

Força motriz, Morfologia e Seletividade



Geometria das Membranas



Módulos de membranas

A unidade operacional na qual as membranas são mantidas para uso é denominada módulo.

Esta unidade é constituída pela membrana, estrutura para suportar a pressão e dispositivos de entrada e saída.

Módulos de membranas (cont.)

Os módulos são projetados para atender a três objetivos:

- Limitar o fenômeno de polarização por concentração.
- Ser uma estrutura compacta, fornecendo a máxima superfície por unidade de volume.
- Evitar vazamento entre os compartimentos de alimentação e permeado.

Módulos de membranas (cont.)

Os módulos também devem atender aos seguintes requisitos:

- Facilidade de limpeza.
- Facilidade de montagem e desmontagem.
- Manter o menor volume de fluído acumulado no seu interior.

Módulos de membranas (cont.)

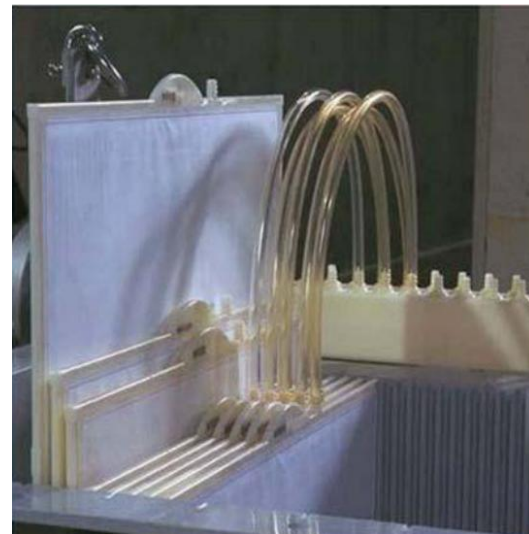
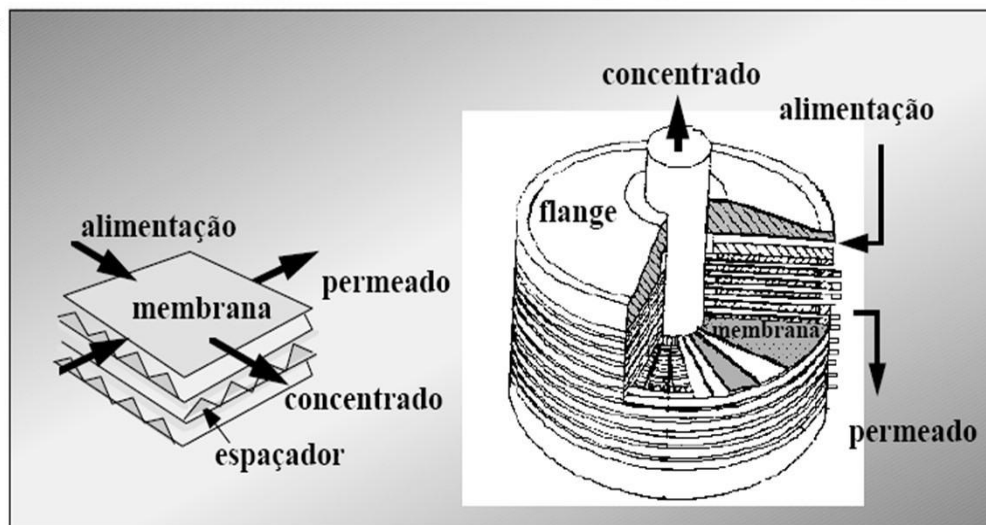
Os principais tipos de módulos existentes são:

- Placas planas;
- Tubulares;
- Fibra oca;
- Enrolados em espiral.

Módulos de membranas (cont.)

a) Placa-quadro

- O projeto é similar ao de filtros convencionais, estando as membranas dispostas paralelamente, intermediadas por espaçadores e suportes. O suporte fornece resistência mecânica à membrana, quando submetida a diferenças de pressão elevadas.
- A alimentação ocorre simultaneamente a todas as membranas, sendo o concentrado retirado por um duto central.
- São utilizados em quase todos os PSM para aplicações em escalas pequena e média.



[https://www.youtube.com/watch?v=P8feM_Bt](https://www.youtube.com/watch?v=P8feM_Bty-o)
[y-o](https://www.youtube.com/watch?v=P8feM_Bty-o)

Módulos de membranas (cont.)

b) Tubular

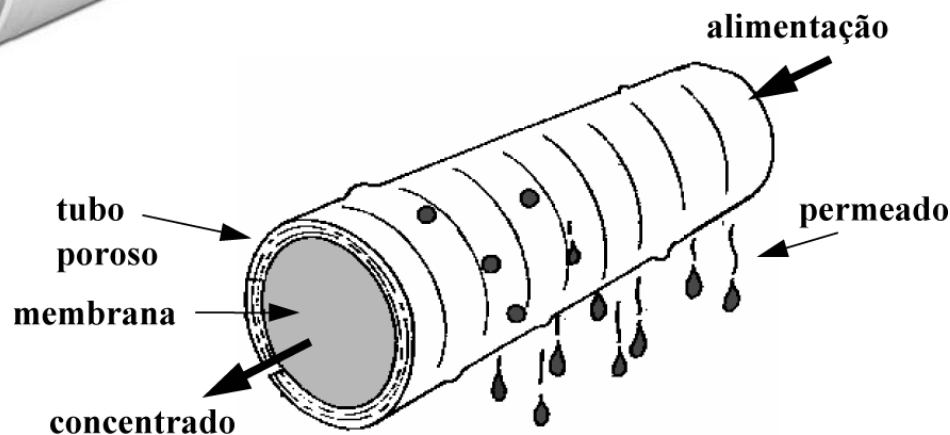
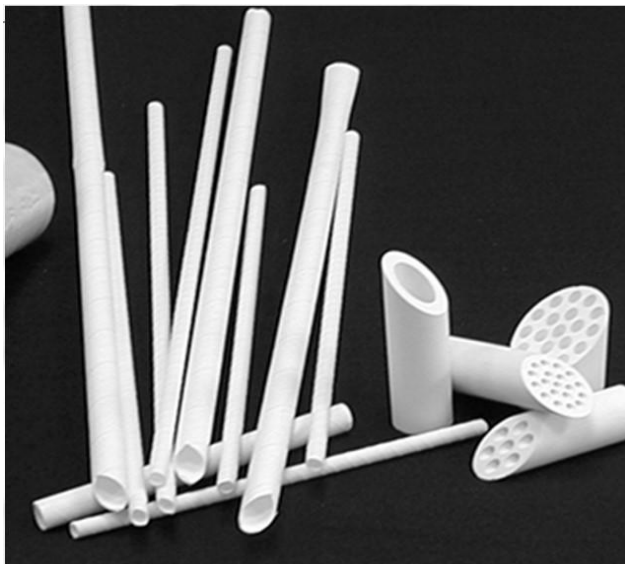


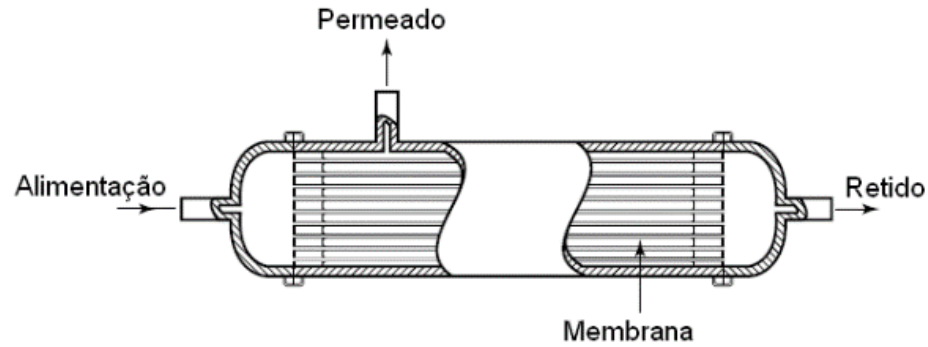
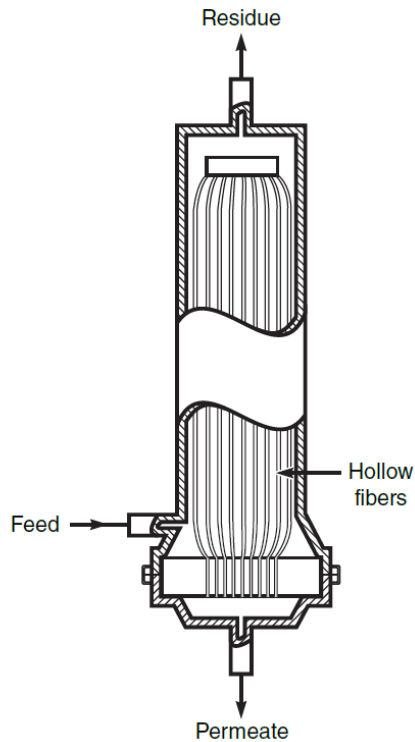
Figura: Esquema de escoamento e permeação durante a permeação utilizando membranas tubulares.

A membrana é moldada no interior de um tubo poroso utilizado como suporte.

O custo de fabricação é bem mais elevado. Sua utilização só se justifica quando há necessidade de condições de escoamento muito bem controladas ou a alimentação contém material suspenso que poderia danificar outros tipos de módulos.

Aplicações em escala pequena e média, nos processos de microfiltração, ultrafiltração e osmose inversa.

Módulos de membranas (cont.)



c) Fibra-oca

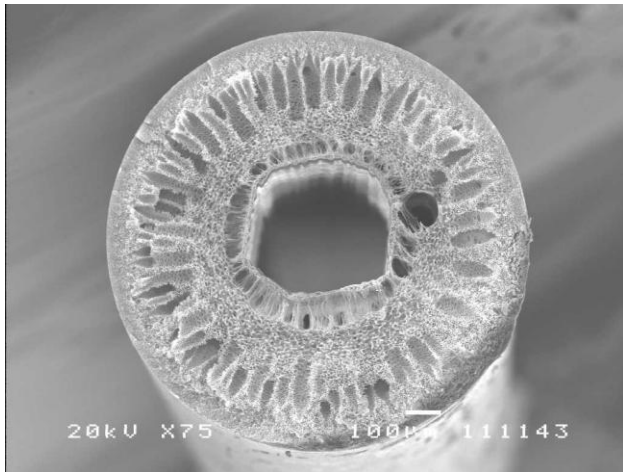


<http://www.elessia.com/pt/explication-du-procede-dultrafiltration.html>



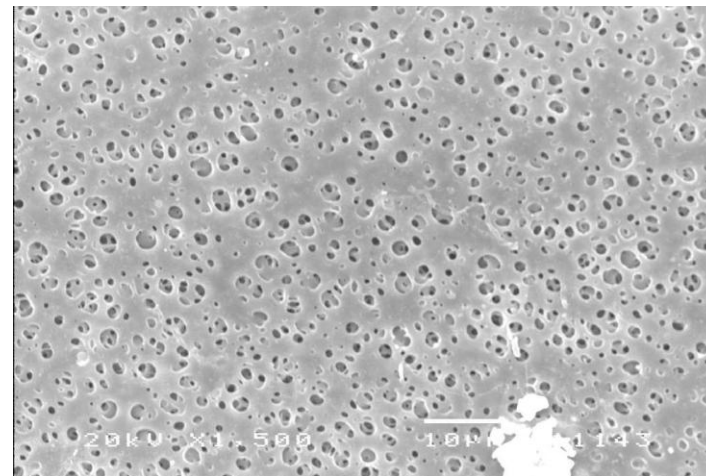
<http://www.tssctambores.com.br/loja/images/LOTE301a.JPG>

Módulos de membranas (cont.)



Membrana fibra oca (aumento 75x) MF: poro=0,67 μm

$\varnothing_e < 0.5 \text{ mm}$



Superfície externa da membrana, com aumento de 1.500 x.

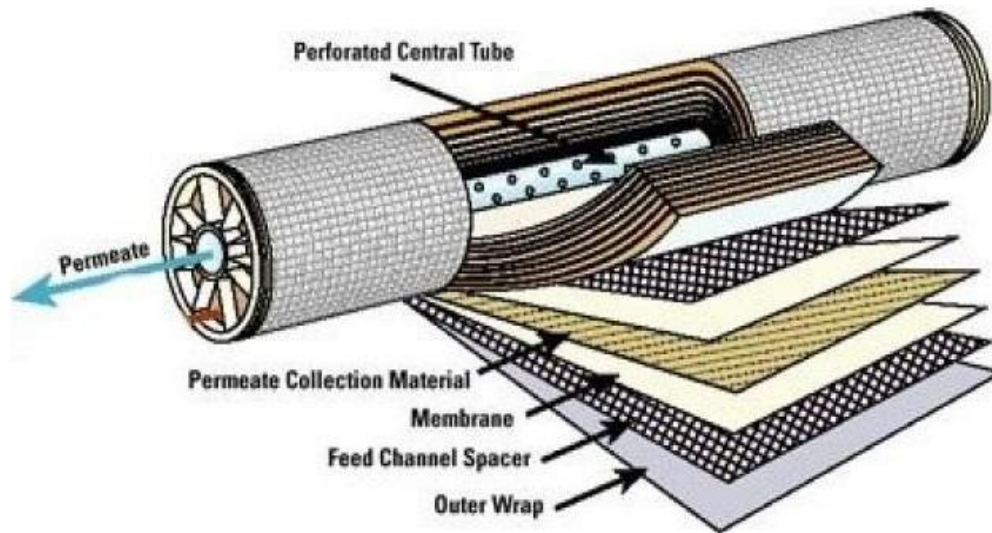


Membranas capilares

$\varnothing_e = 0.5 - 3.0 \text{ mm}$

Módulos de membranas (cont.)

d) Espiral



Utiliza-se membrana entre dois espaçadores. Um destes serve como um canal coletor para o permeado, enquanto o outro fornece espaço para escoar a solução de alimentação.

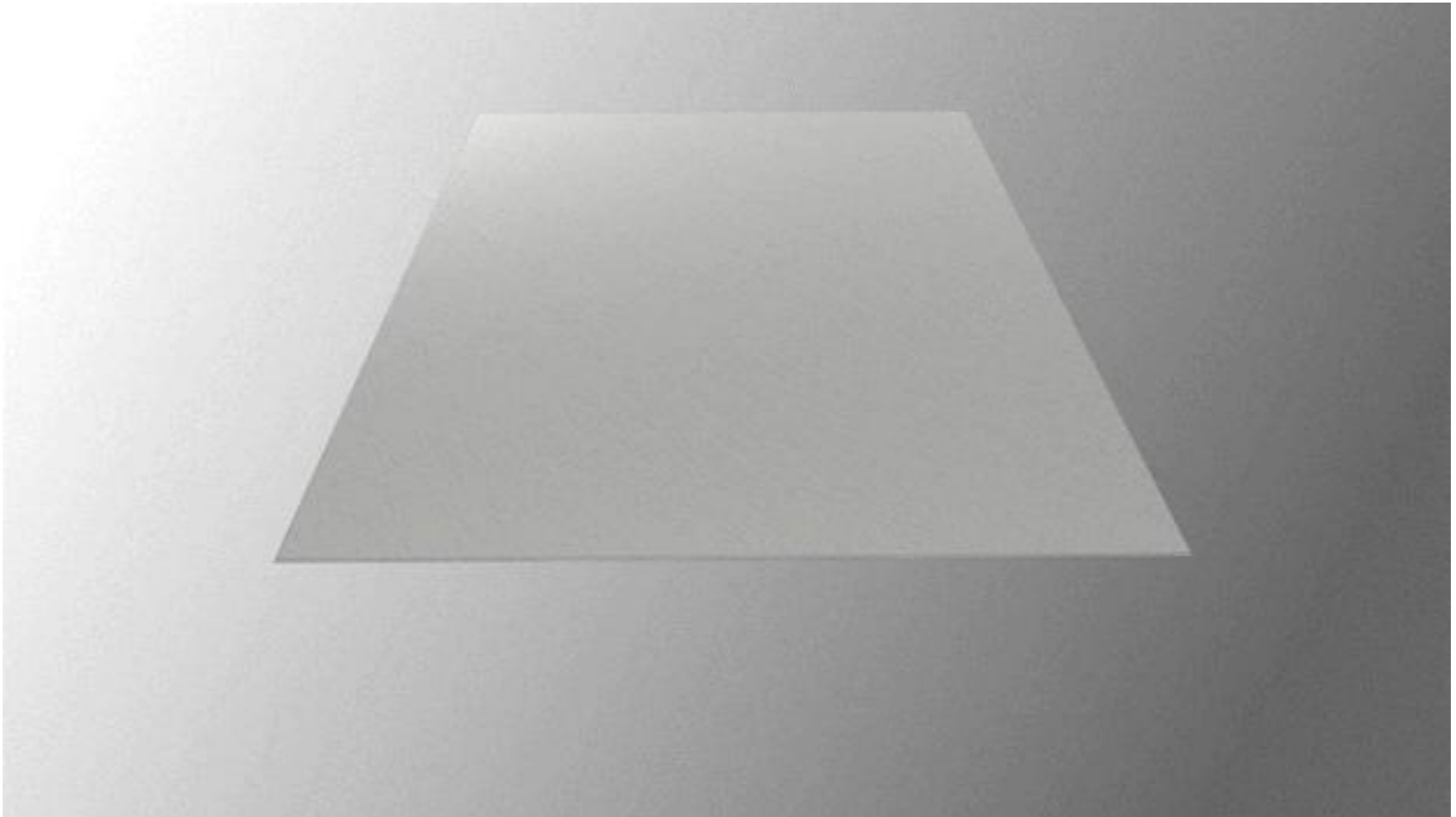
As membranas conjuntamente com os espaçadores são enroladas em torno de um duto perfurado, para o qual o permeado escoar. O conjunto é selado externamente com resina epóxi.

O custo de fabricação do módulo é baixo e apresenta uma relação entre a área de permeação e o volume do módulo mais elevada ($800\text{--}1000\text{ m}^2/\text{m}^3$).

Esta concepção de módulo tem sido frequentemente utilizada em processos como NF e OI.

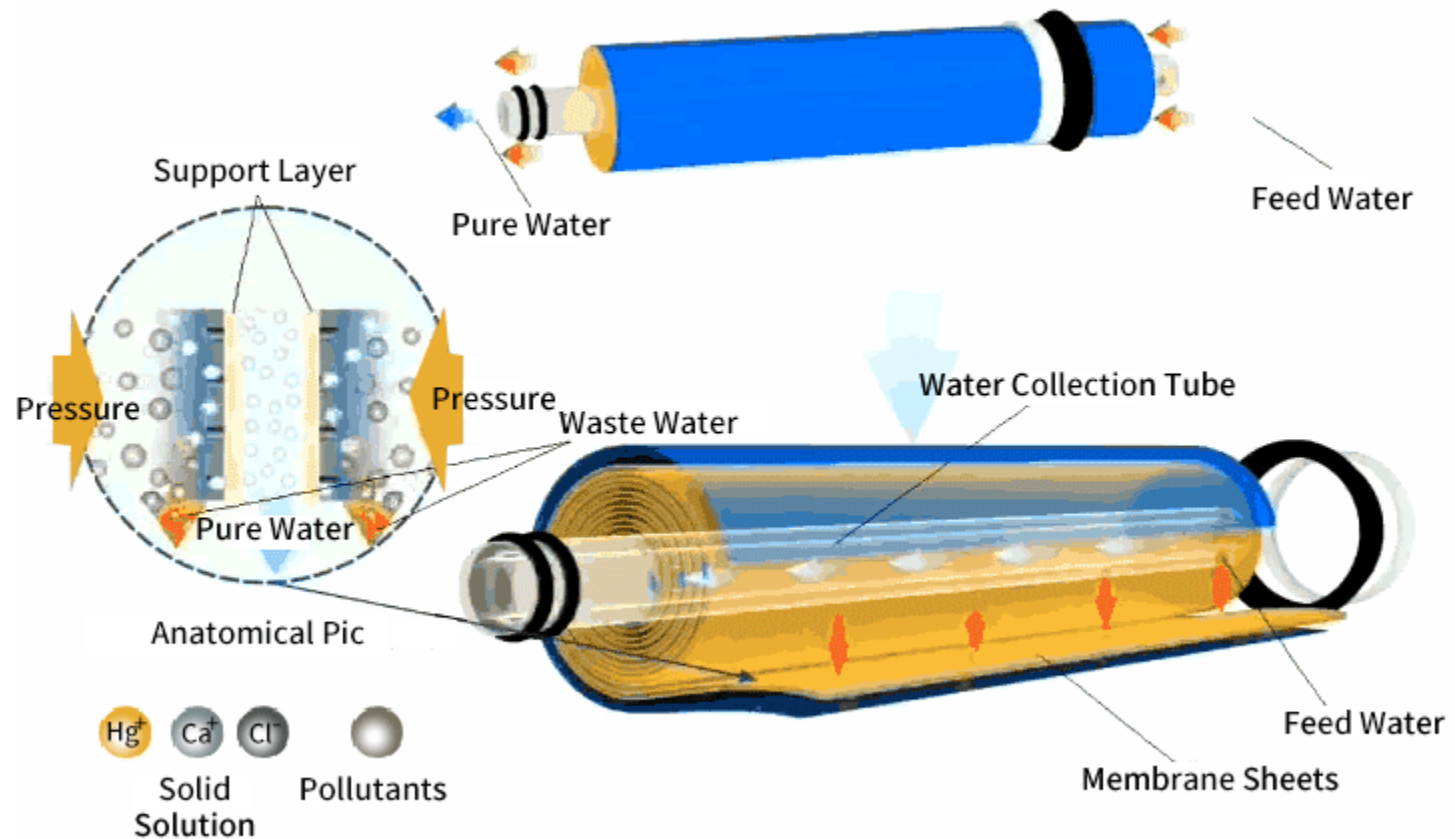
Módulos de membranas (cont.)

d) Espiral

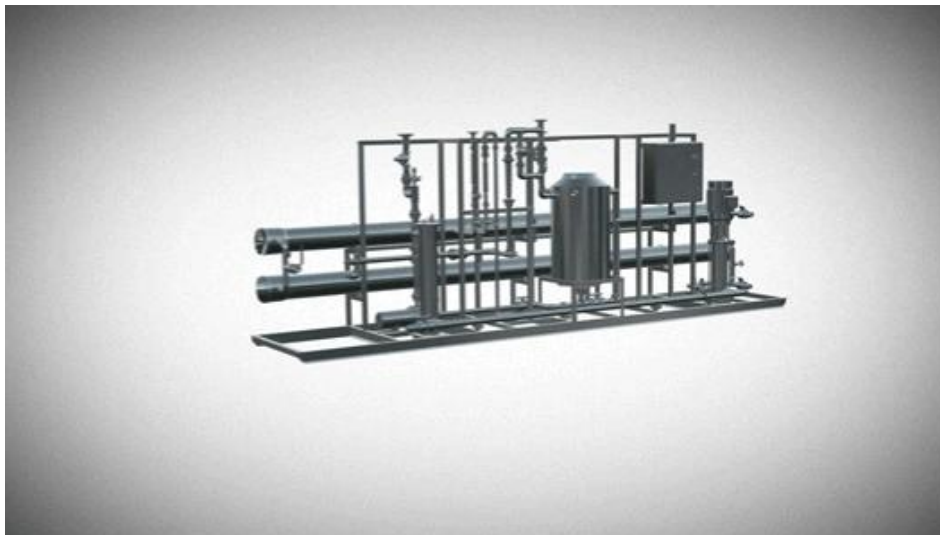


Módulos de membranas (cont.)

d) Espiral



Módulos de membranas (cont.)



Módulos de membranas (cont.)

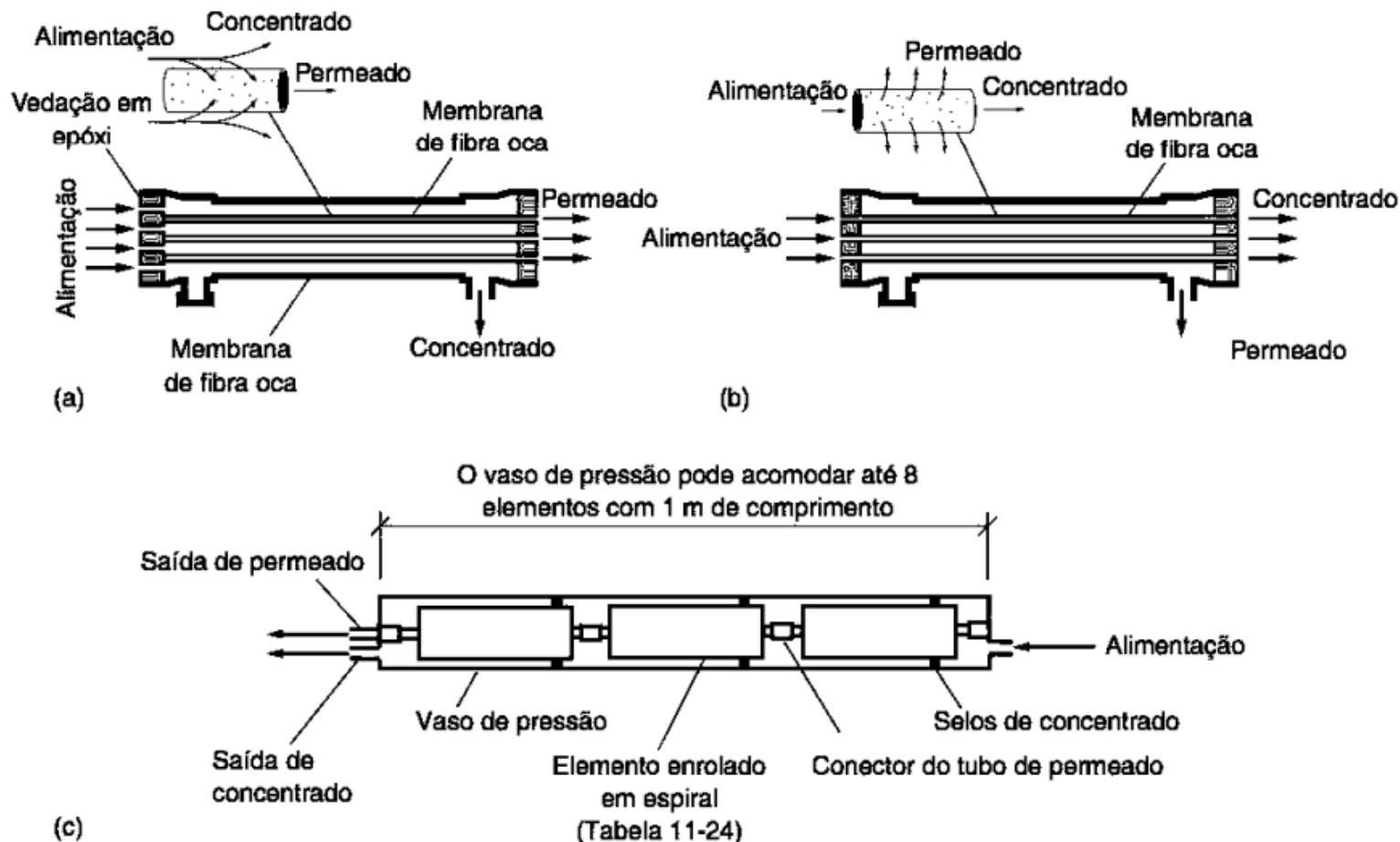
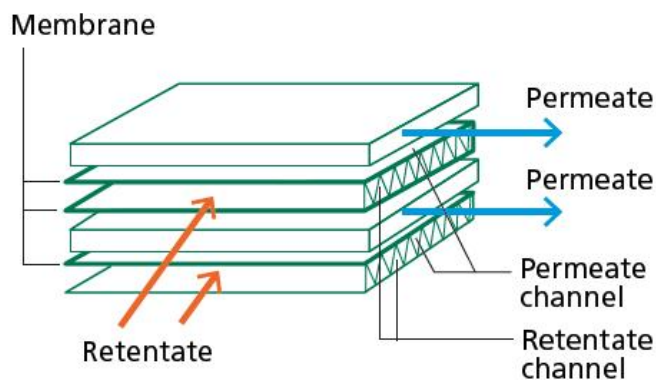
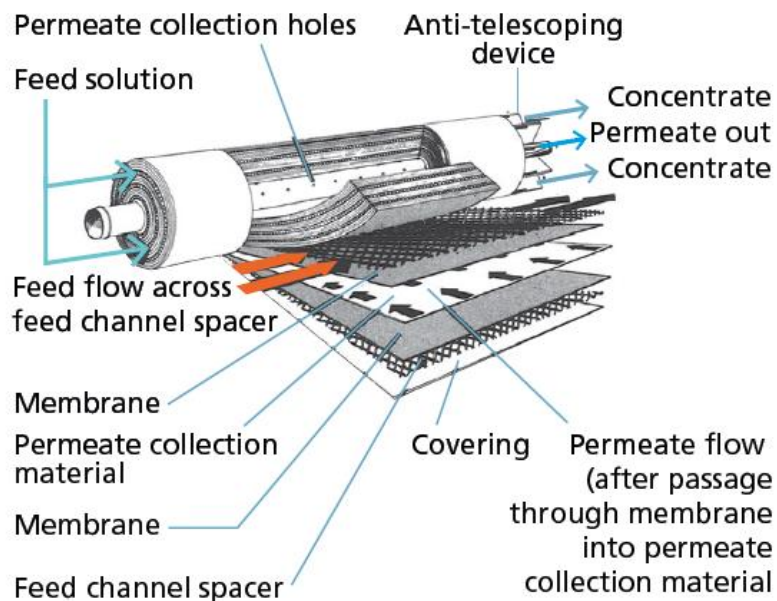


FIGURA 11-28 Representação esquemática dos principais processos de separação por membranas: (a) módulo de membranas de fibra oca com escoamento de fora para dentro, (b) módulo de fibra oca com escoamento de dentro para fora e (c) módulo com membranas enroladas em espiral.

1)

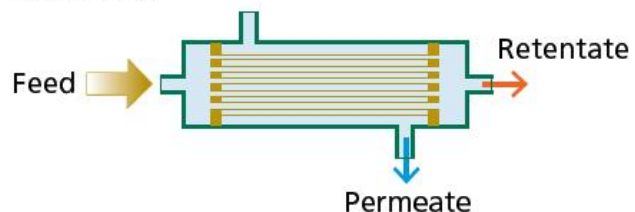


2)

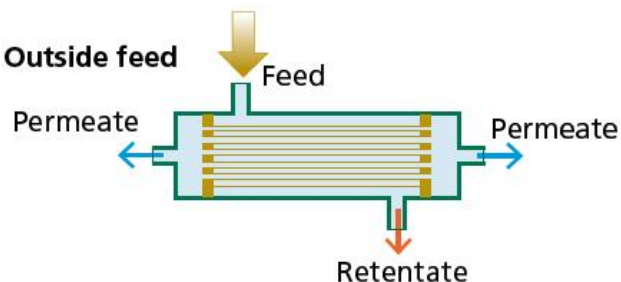


3)

Inside feed



Outside feed



4)

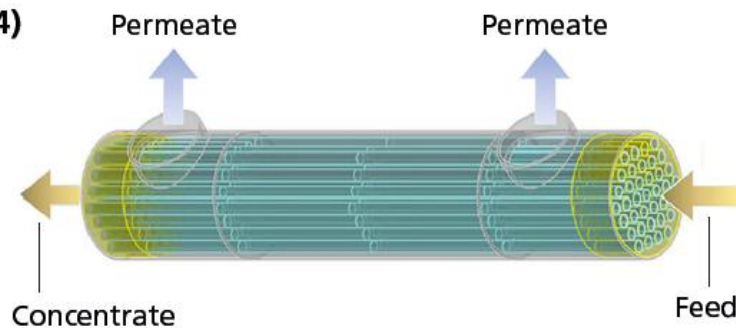
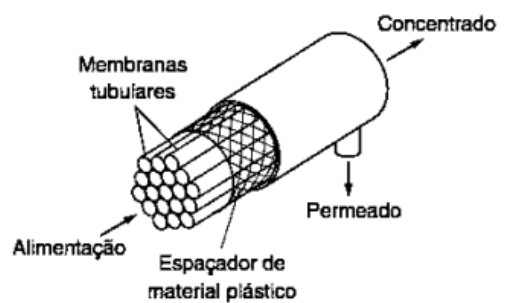
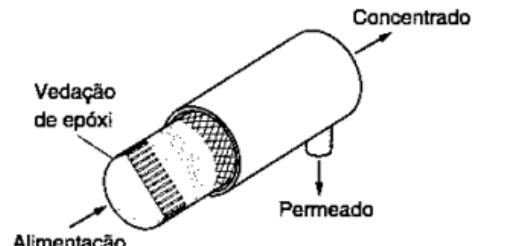


Figura: Representação esquemática de módulos do tipo 1) placa-quadro, 2) espiral, 3) fibra-oca e 4) tubular.

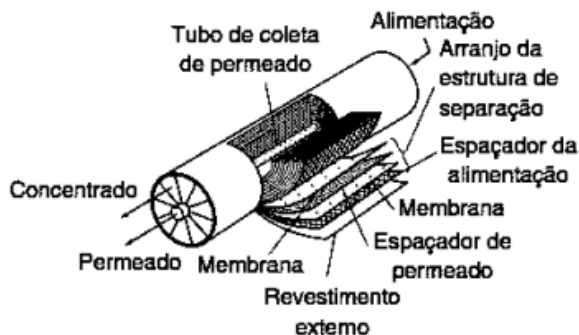
Comparação da densidade de empacotamento dos diferentes tipos de módulos:

Tipo de Módulo	Densidade de empacotamento (m^2/m^3)
Tubular	30
Placa/ quadro	500
Espiral	900
Capilar	1000
Fibra-oca	10.000

TABELA 11-24 Descrição dos tipos de membranas mais utilizadas

Tipo	Descrição
(a) Tubular 	Na configuração tubular, a membrana é moldada na parte interna de um tubo poroso, utilizado como suporte. Vários tubos com a membrana são instalados no interior de um vaso de pressão de forma apropriada. A água de alimentação é bombeada através do tubo de alimentação, e a água produzida, permeado, é coletada no interior do vaso de pressão. O concentrado continua escoando pelos tubos até sair do vaso de pressão. Esse tipo de módulo é, geralmente, utilizado para o tratamento de efluentes com elevada concentração de sólidos em suspensão. Esses módulos são os mais fáceis de limpar, o que pode ser feito pela circulação de produtos químicos e com a utilização de bolas de espuma para a limpeza mecânica das membranas. Os sistemas tubulares apresentam uma baixa relação entre área de membrana e volume do módulo e uma baixa densidade de empacotamento, o que resulta em maior custo. O diâmetro interno dos tubos varia de 6 a 40 mm, com comprimento de até 3,66 m (12 ft).
(b) Fibra oca 	Os módulos de fibra oca consistem de um feixe de centenas a milhares de fibras ocas. Esse feixe de membranas é inserido em um vaso de pressão. A alimentação pode ser aplicada do lado interno da membrana (escoamento de dentro para fora) ou do lado externo (escoamento de fora para dentro). Os módulos de membrana de fibra oca são comumente utilizados em reatores de membranas submersas (MBRs), como descrito no Capítulo 7. Os diâmetros típicos das membranas de fibra oca, interno e externo, variam entre 350 e 450 μm e 900 e 1.000 μm, respectivamente. O comprimento típico dos módulos de fibra oca é de 1,2 m (4 ft). Um módulo com 100 mm (4 in.) de diâmetro pode conter até 650.000 fibras individuais, embora muitos módulos contenham um número menor de fibras por feixe. Os feixes de fibras podem variar de 100 a 200 mm (4 a 8 in.) de diâmetro. Dependendo do diâmetro, até sete feixes podem ser colocados em um único vaso de pressão (Fig. 11-28b).

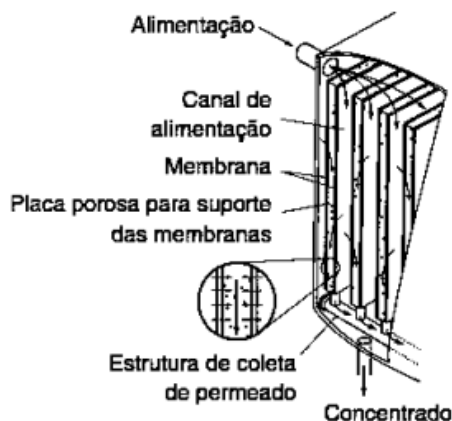
(c) Enrolada em espiral



Na membrana enrolada em espiral, um espaçador de permeado de material flexível é colocado em duas folhas de membranas planas. Três lados das membranas são seladas, e o lado aberto é fixado em um tubo perfurado. Um outro espaçador de material flexível é colocado na superfície das membranas seladas e o conjunto é enrolado ao redor do tubo de permeado. Membranas de filme fino composto são mais comumente utilizadas na produção de módulos enrolados em espiral. O termo espiral resulta do fato de que o fluxo de permeado descreve um movimento em espiral.

O diâmetro das membranas enroladas em espiral varia de 100 a 200 mm (4 a 8 in.), embora elementos com até 300 mm (12 in.) de diâmetro também tenham sido utilizados. O comprimento ativo dos elementos é de, aproximadamente, 0,9 m (3 ft) entre as linhas de cola, embora os comprimentos de elementos comerciais possam variar de 150 mm (6 in.) até 1,5 m. Operacionalmente, de 2 a 6 elementos de membrana são colocados em um único vaso de pressão (Fig. 11-28c). A área da membrana de um elemento com 100 mm de diâmetro e 0,9 m de comprimento é de, aproximadamente, 8,33 m² (90 ft²).

(d) Placas planas



Os módulos de placa plana são constituídos de uma série de membranas planas e placas de suporte. A água a ser tratada passa entre as membranas de duas placas adjacentes. As placas suportam as membranas e apresentam canais internos para permitir o escoamento do permeado para fora da unidade. Geralmente, as dimensões de uma placa individual são de 20 mm por 40 mm (7,5 × 15 in.). A densidade de empacotamento dos módulos de placa plana variam entre 100 e 400 m²/m³.

Módulos de membranas (cont.)

e) Discos rotatórios/ vibratório

- Membranas são fixadas em placas planas redondas, montadas sobre um eixo rotatório
- O movimento rotatório minimiza o depósito de material sobre a superfície das membranas.

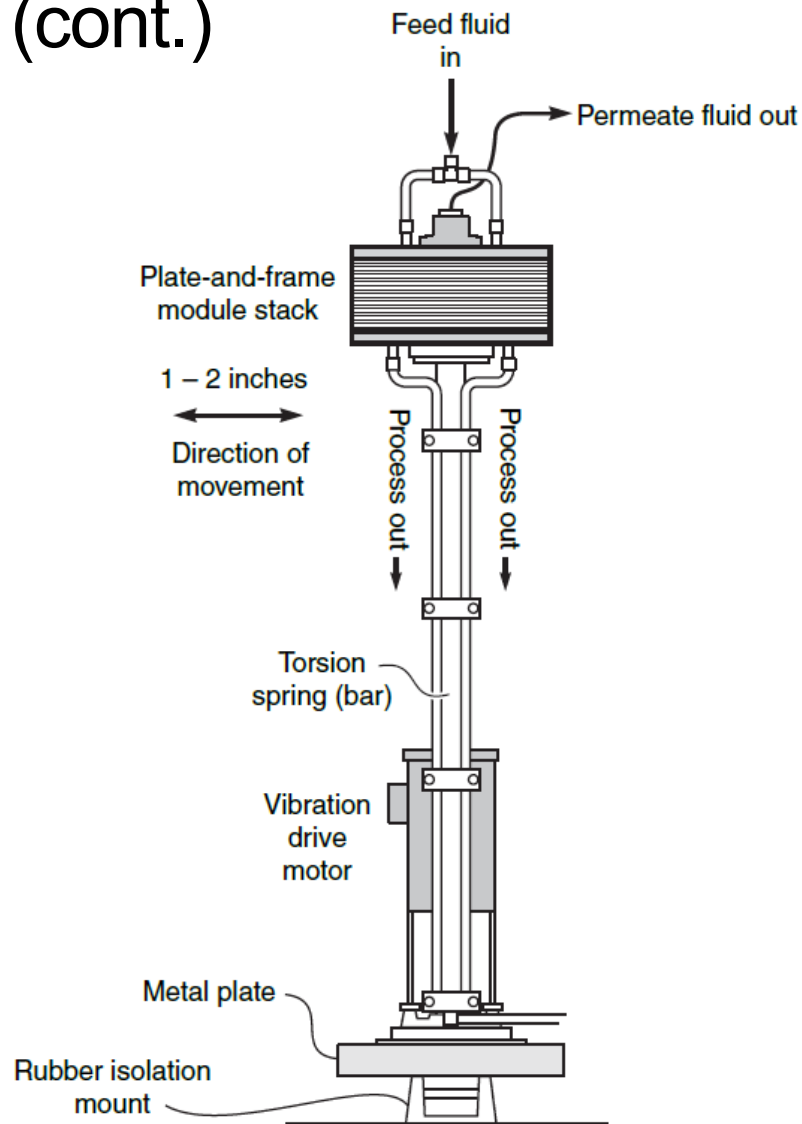


Figura: Módulos com discos vibratórios.