

MODOS OPERACIONAIS EM MEMBRANAS

PSM podem ser conduzidos

```
graph TD; A[PSM podem ser conduzidos] --> B[Sistema Convencional de filtração (dead-end)]; A --> C[Filtração Tangencial ou Fluxo Cruzado];
```

Sistema Convencional de filtração (dead-end)

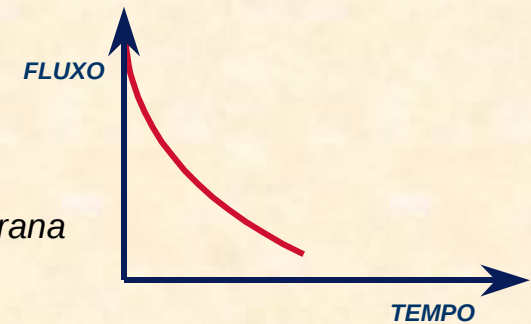
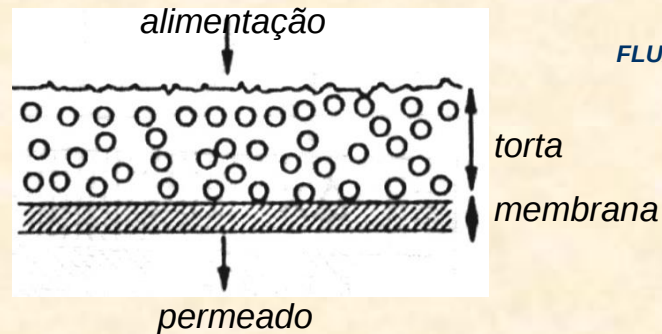
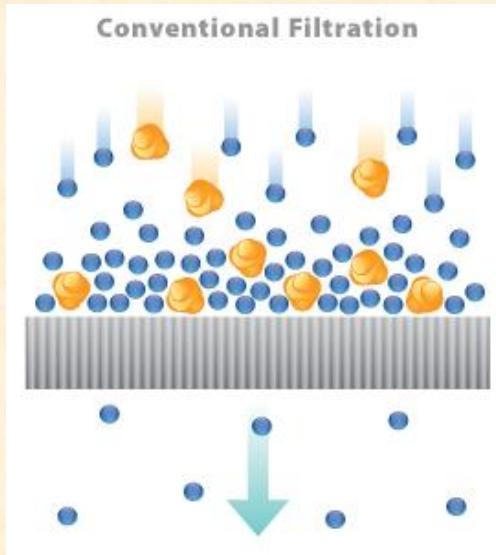
- Toda a solução a ser filtrada é simplesmente forçada sobre a membrana,*
- Formação de “Torta”,*
- Modo operacional transiente.*

Filtração Tangencial ou Fluxo Cruzado

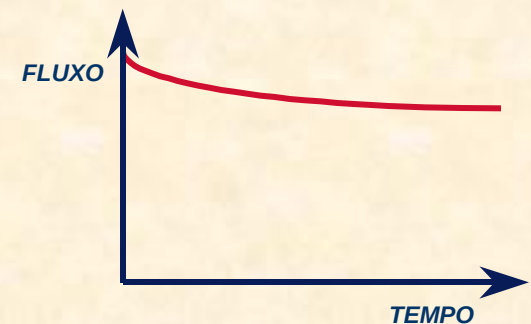
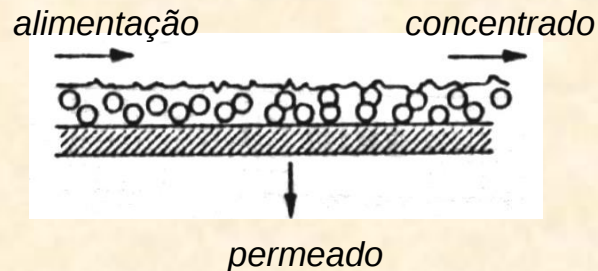
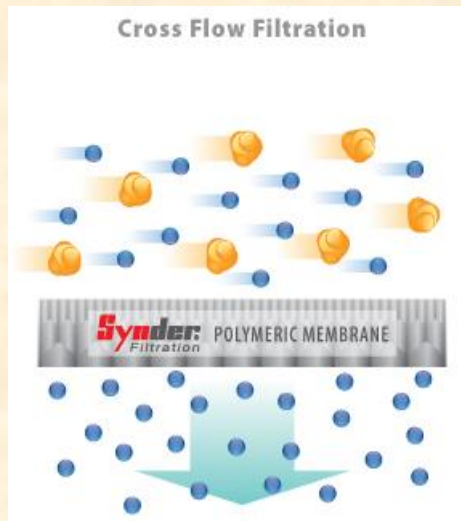
- Fluido a ser filtrado é bombeado paralelamente a superfície da membrana,*
- Reduzida formação de “Torta”*
- Possível operação permanente.*

Para aplicações industriais a operação em fluxo cruzado é preferida em função da menor tendência de formação da Polarização de Concentração.

FILTRAÇÃO CONVENCIONAL “Dead-end”



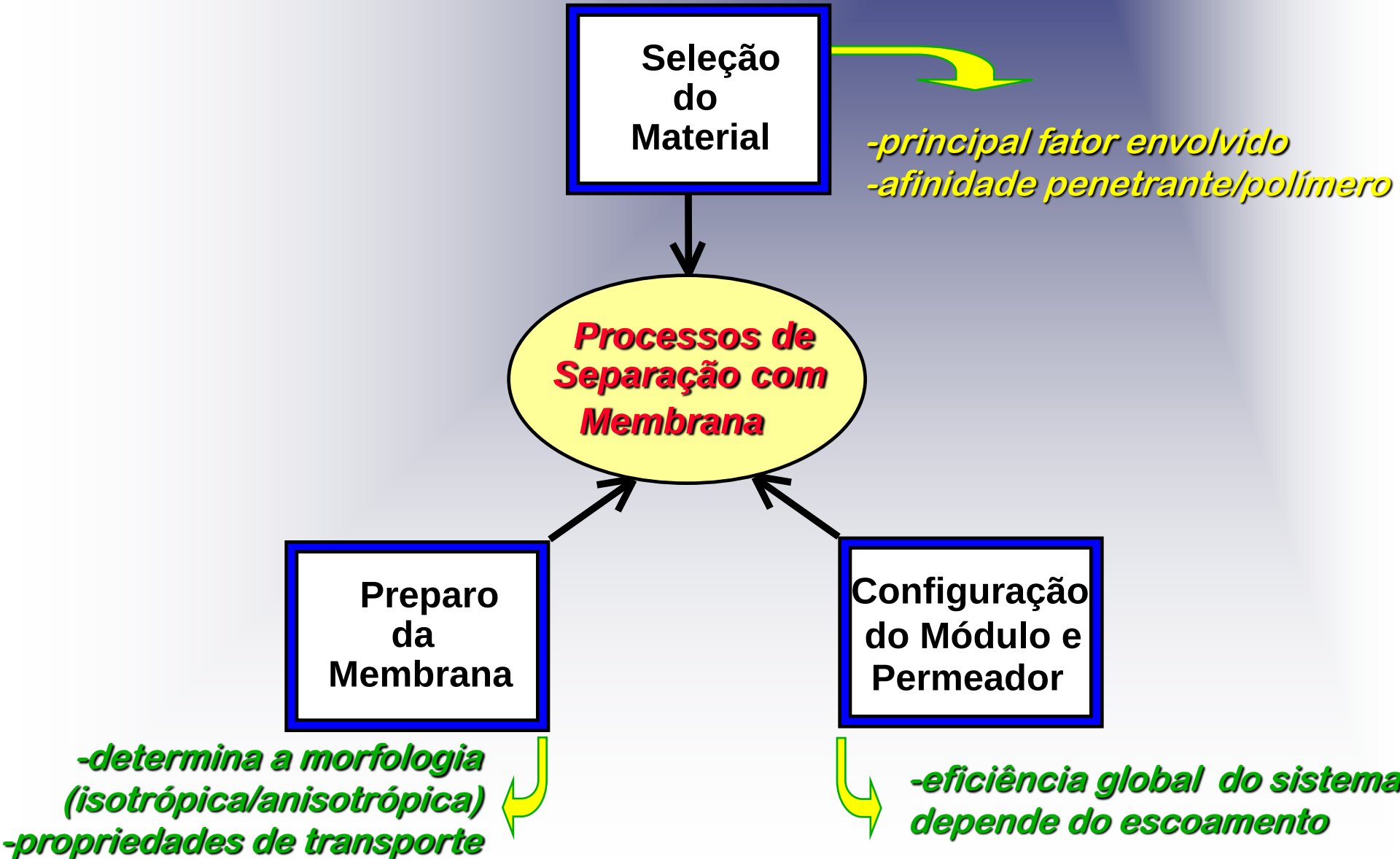
FILTRAÇÃO COM ESCOAMENTO TANGENCIAL “Cross-flow”

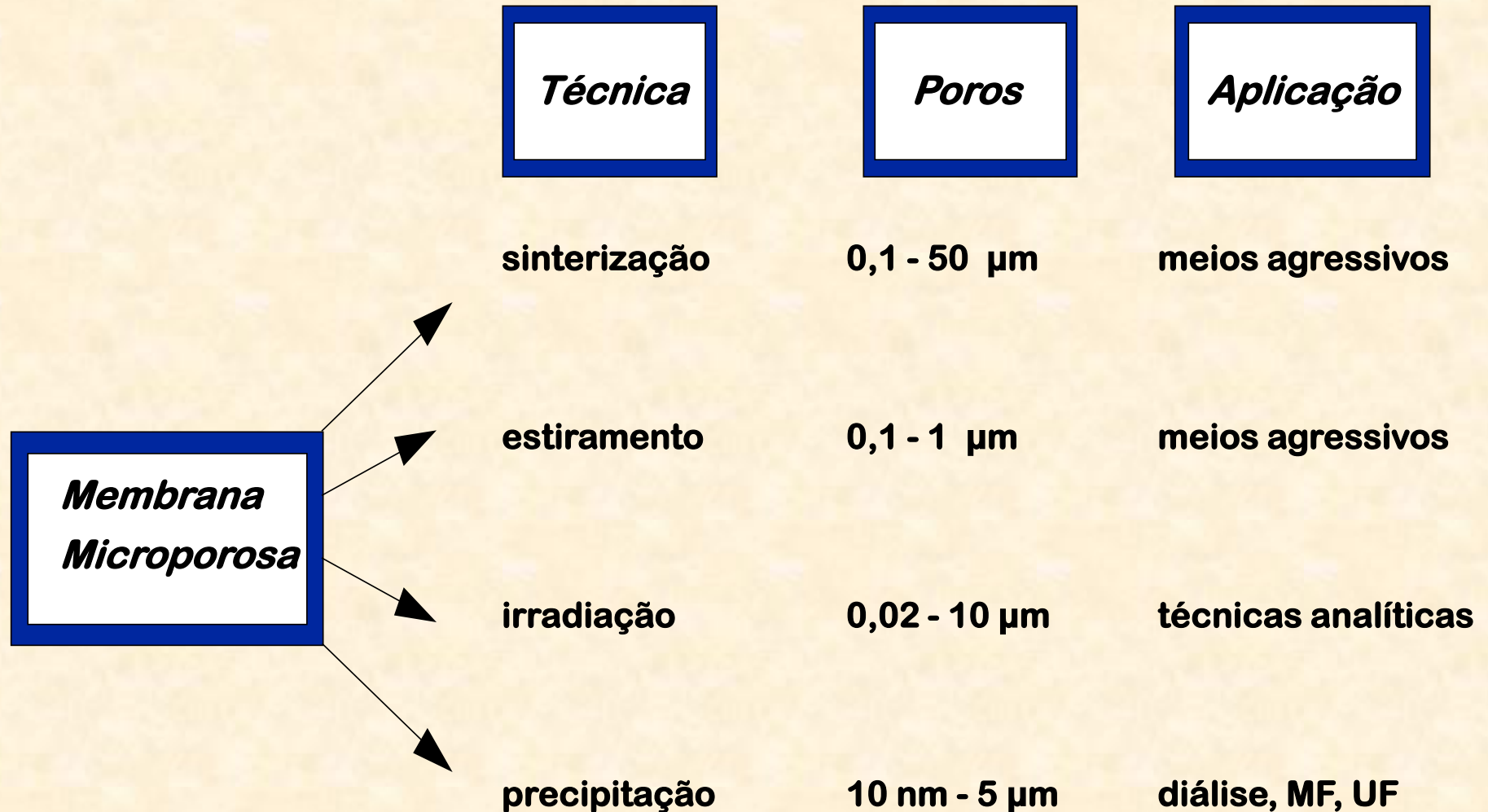


Fabricação de Membranas e Módulos de Permeação

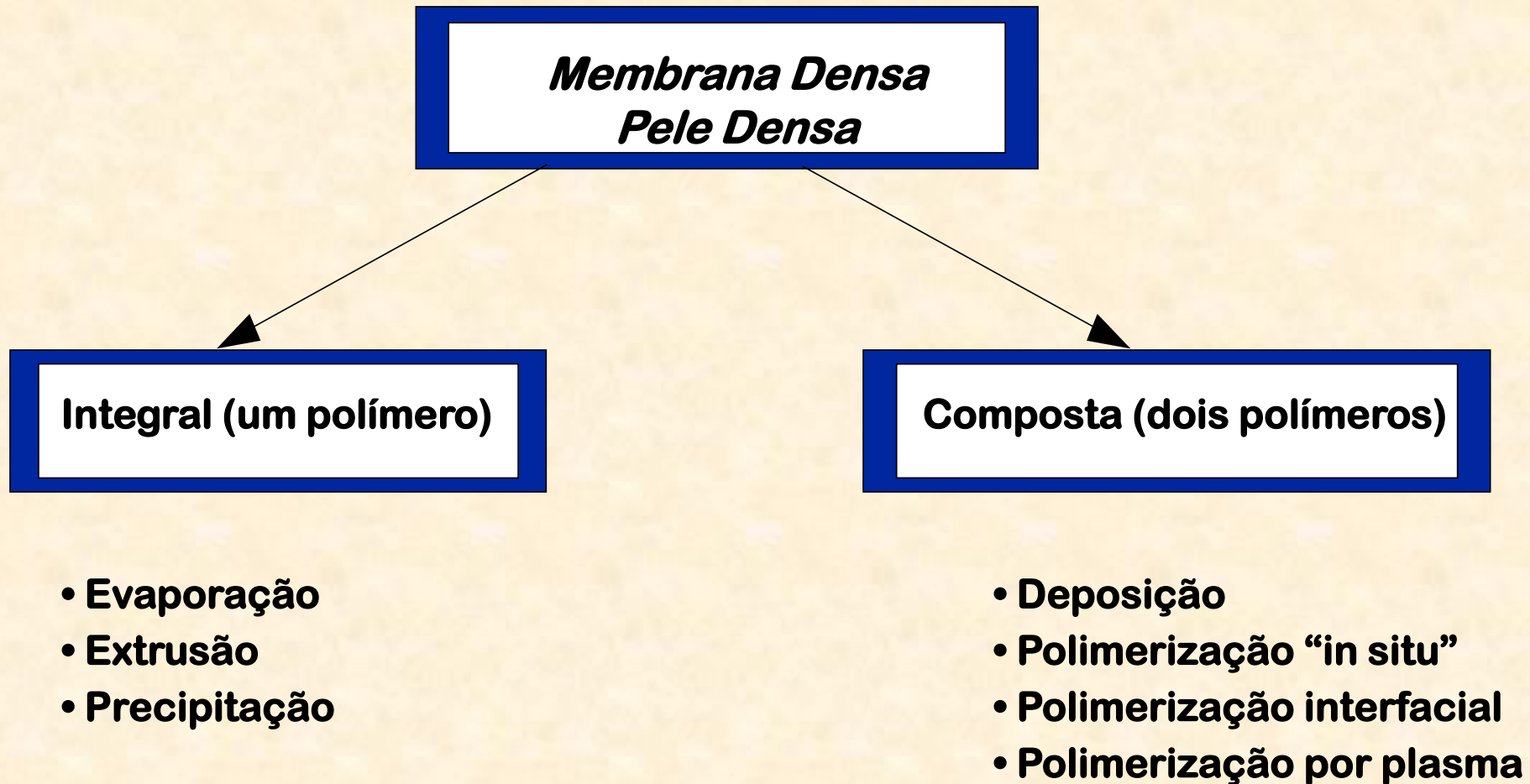
Fabricação de Membranas e Módulos de Permeação

Para o desenvolvimento de Processos com Membranas três aspectos são fundamentais:

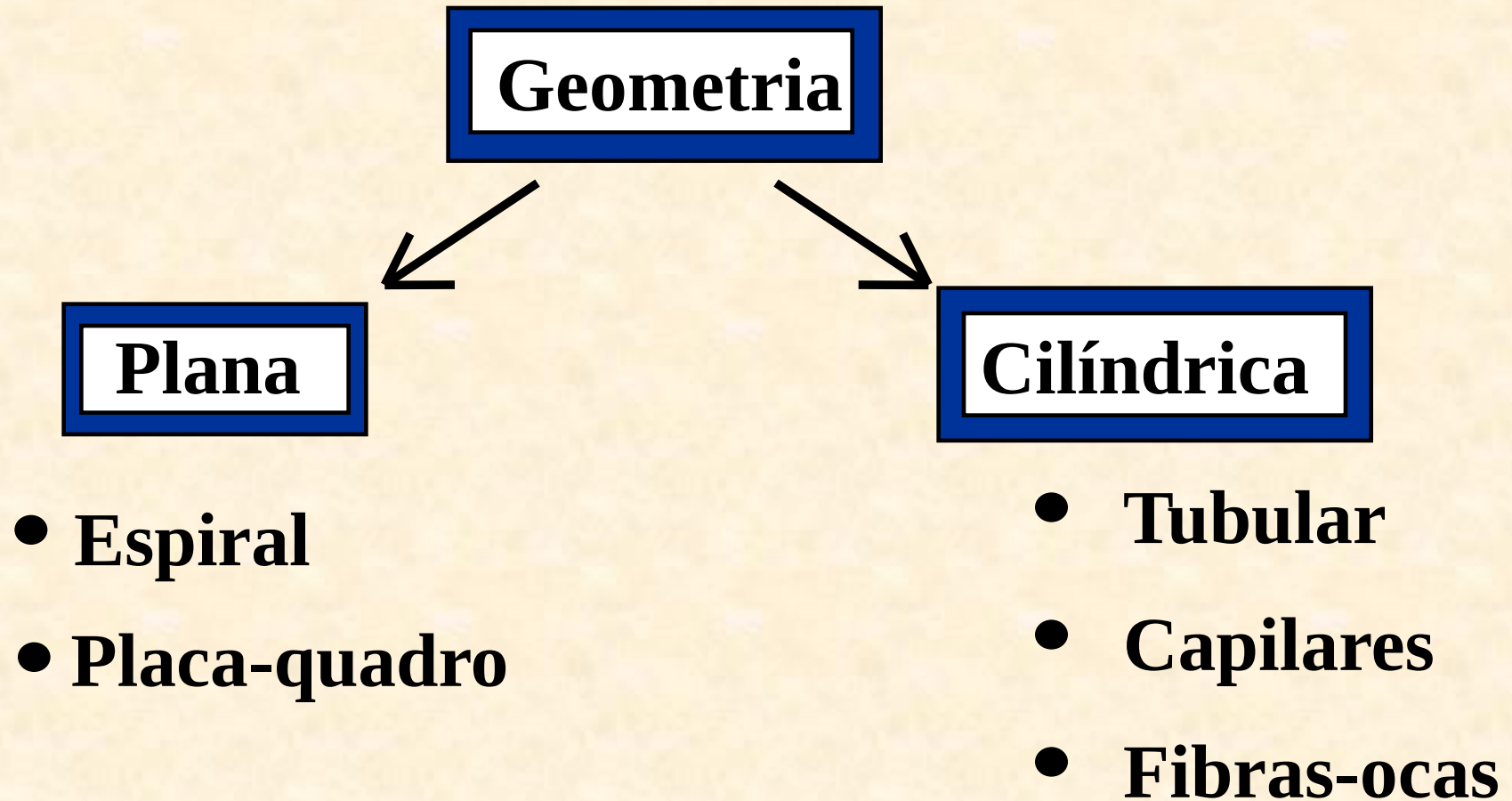


Principais técnicas utilizadas no preparo de membranas porosas:

Principais técnicas utilizadas no preparo de membranas densas:

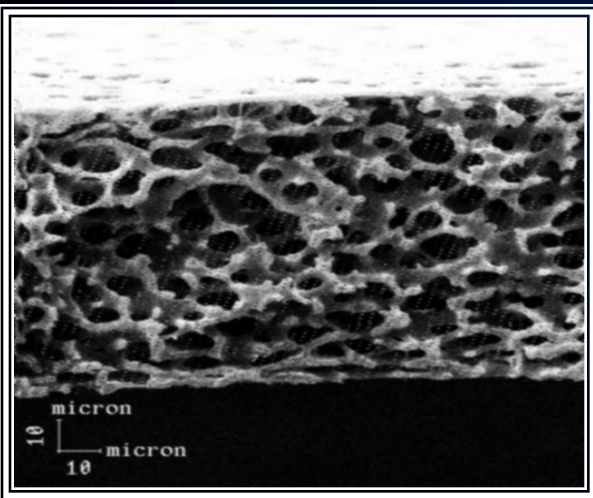


Quanto a geometria as membranas podem ser:



GEOMETRIA PLANA

- ◀ Forma mais utilizada em PSM
- ◀ Processo de fácil fabricação
- ◀ Pode-se distinguir duas concepções:
 - formação de membranas por evaporação controlada e*
 - por imersão em banho de não solvente*



*Membrana Plana
polímero base
acetato de celulose*

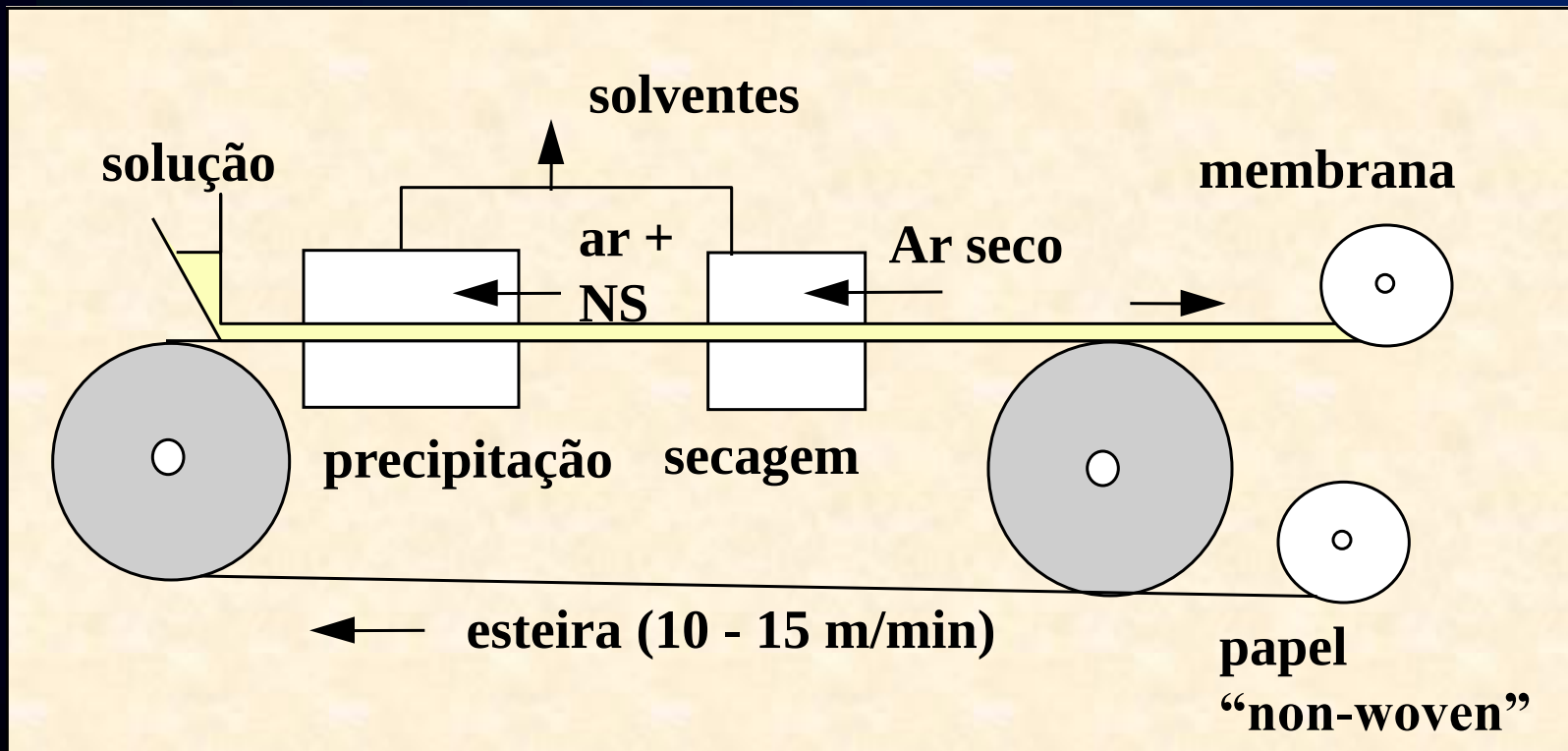
Obs.:

Praticamente todas membranas de geometria plana são depositadas sobre um suporte poroso (> resistência mecânica, facilidade de manuseio e redução da espessura de espalhamento).

Material suporte mais utilizado: fibras de poliéster sinterizadas e calandradas (non woven).

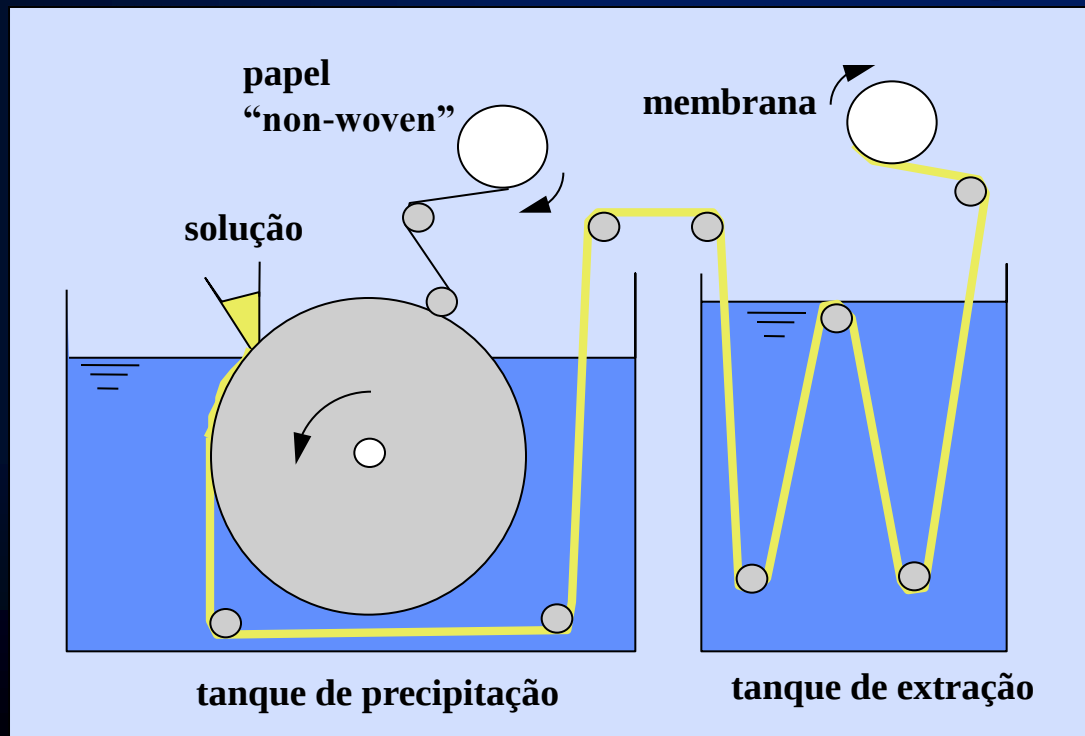
Fabricação da Membrana por Evaporação - Procedimentos

- 1) Espalhamento da solução polimérica sobre o suporte poroso;
- 2) Condução da solução espalhada para câmara com atmosfera e temperatura controlada;
- 3) Na câmara ocorre a evaporação do solvente e a absorção de vapores de não-solvente;
- 4) Após a precipitação, condução da membrana formada para câmara de de evaporação de solvente e não solventes residuais;
- 5) A membrana é acondicionada em rolos ou cortadas em dimensões pré-estabelecidas.



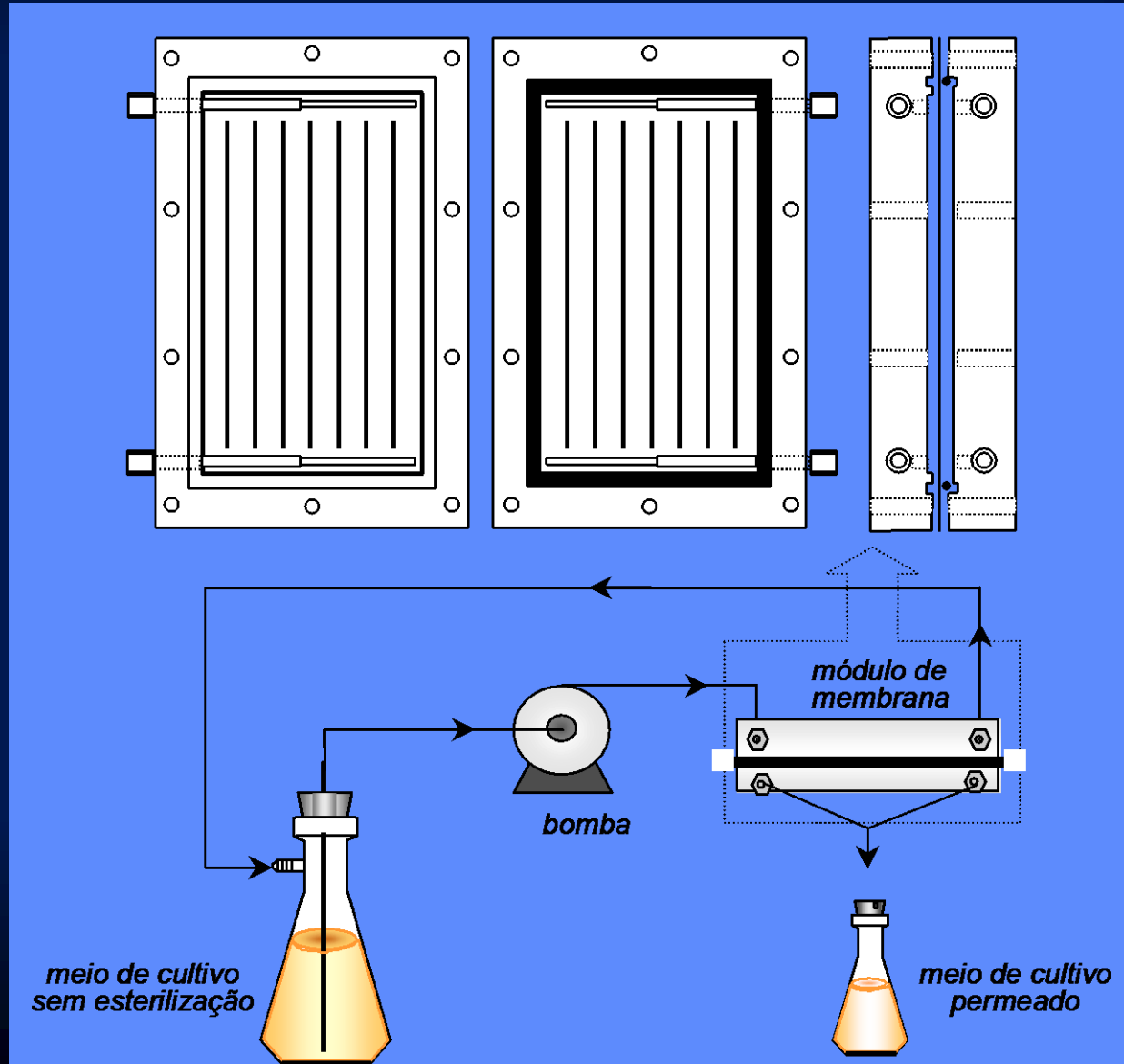
Fabricação da Membrana por Imersão em Banho de não-Solvente - Procedimentos

- 1) Espalhamento da solução polimérica sobre o suporte poroso;
- 2) Condução da solução espalhada para um banho de precipitação (normalmente água);
- 3) Antes da imersão pode ser necessário evaporação parcial do solvente e aditivos presentes na solução (tempo de residência fora do banho de precipitação);
- 4) Após o banho de precipitação utiliza-se outros banhos para extração do solvente residual ou para condicionamento térmico;
- 5) A membrana pode ser armazenada úmida ou submetida a secagem.



Módulo para Membranas Planas

A) Módulo Plano de Laboratório



Módulo para Membranas Planas - Laboratório

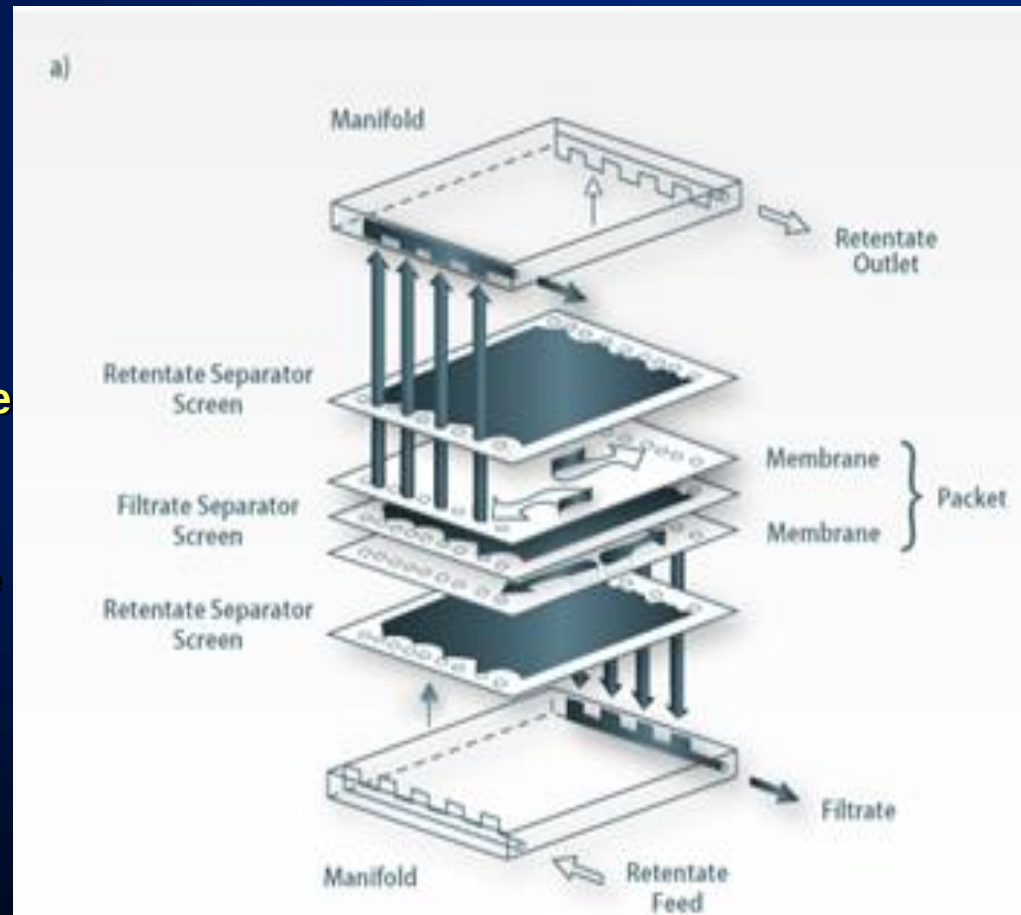


Módulos para Membranas Planas

B) Módulo Quadro-Placa (Escala Piloto)

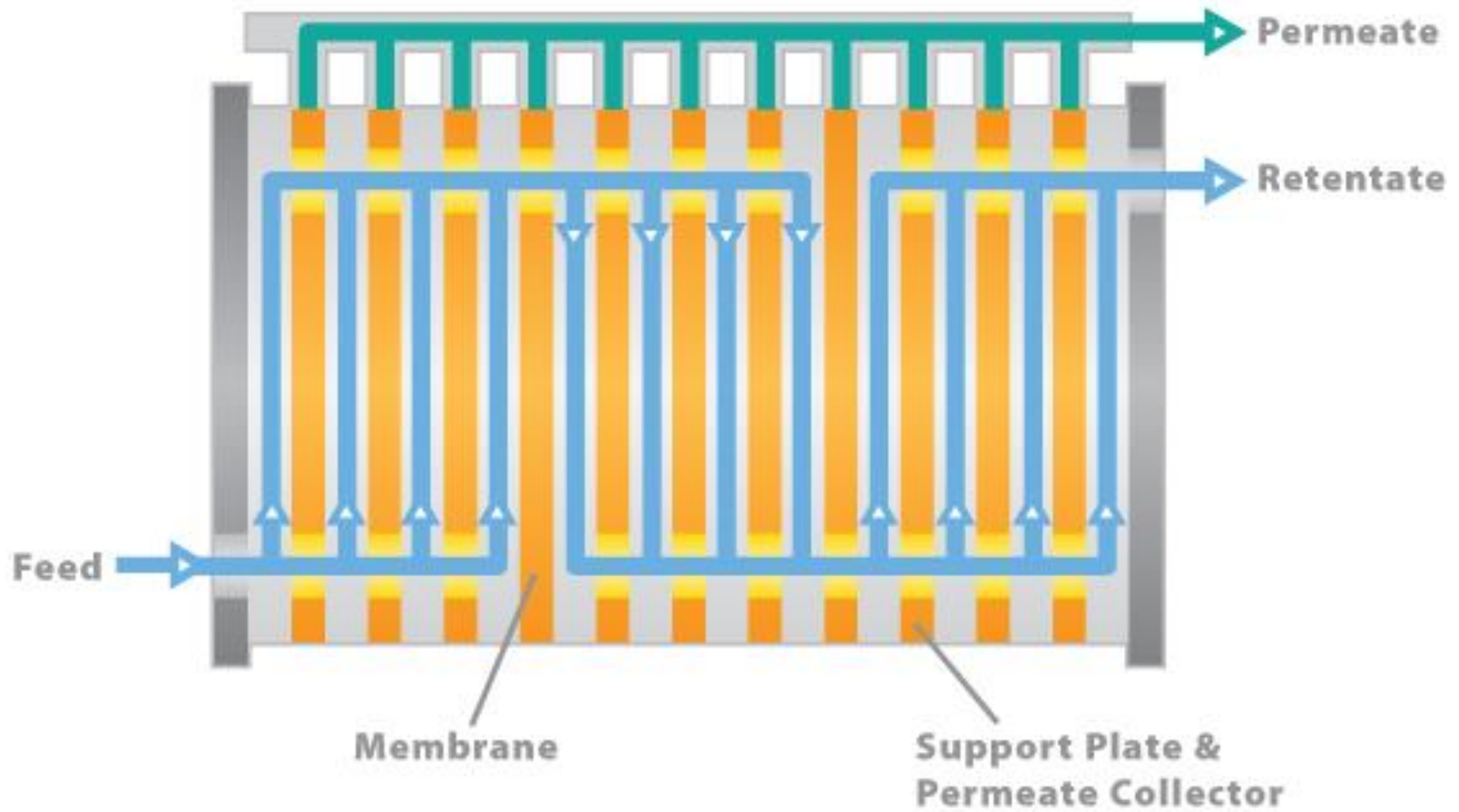
Obs.:

- 1) Modelo similar aos filtros convencionais;
- 2) Membranas dispostas paralelamente intermediada por espaçadores e suportes;
- 3) A alimentação ocorre simultaneamente em todas as membranas;
- 4) Condições de escoamento da alimentação e do permeado facilmente controláveis;
- 5) Custo de fabricação elevado e baixa relação área de permeação/volume de módulo ($400-600 \text{ m}^2/\text{m}^3$);



Módulos para Membranas Planas - Unidade Piloto

MODEL CONFIGURATION - Plate/Frame Model



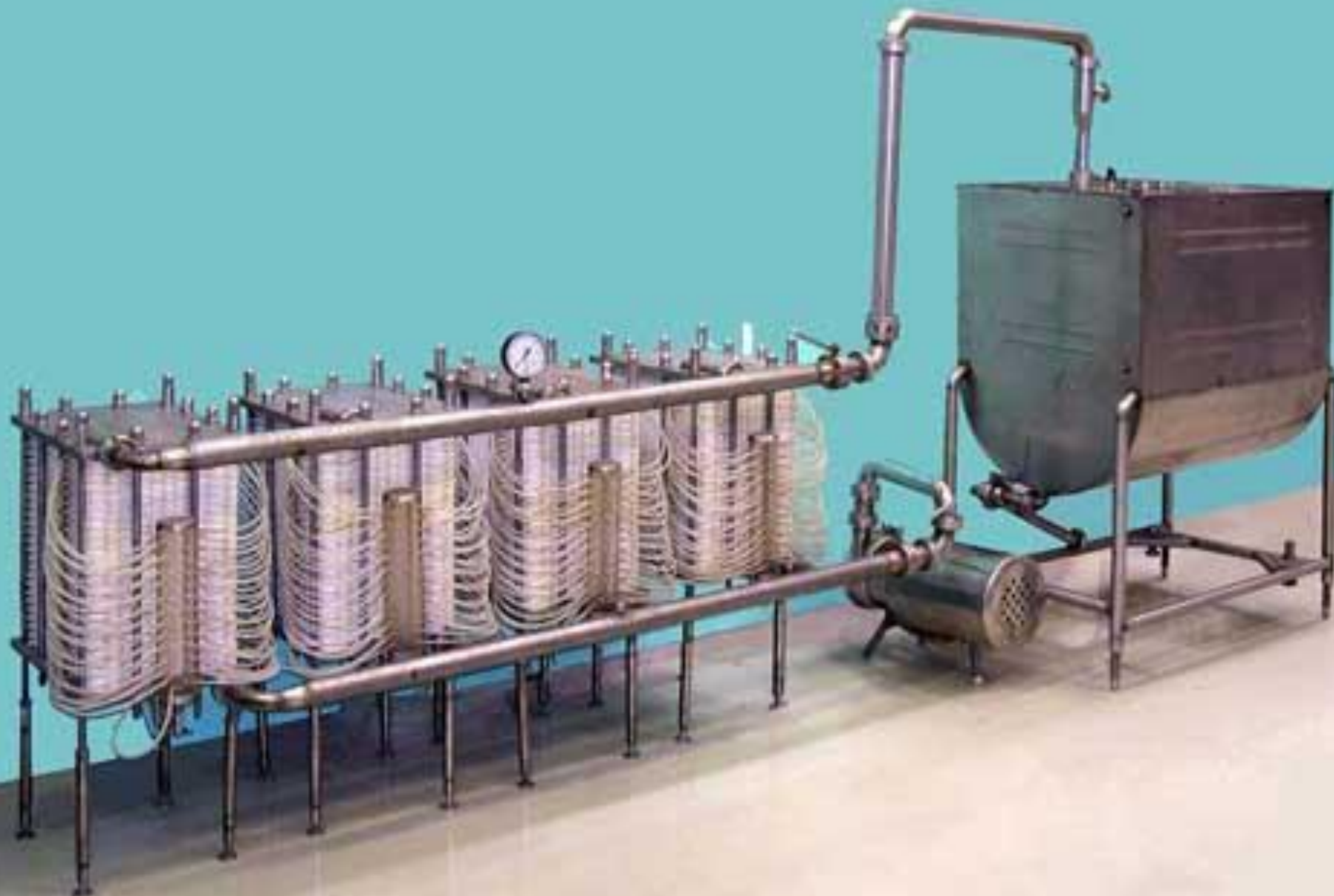
Módulos para Membranas Planas - Unidade Piloto



Sunshine Filter

sunshinefilter@yahoo.cn

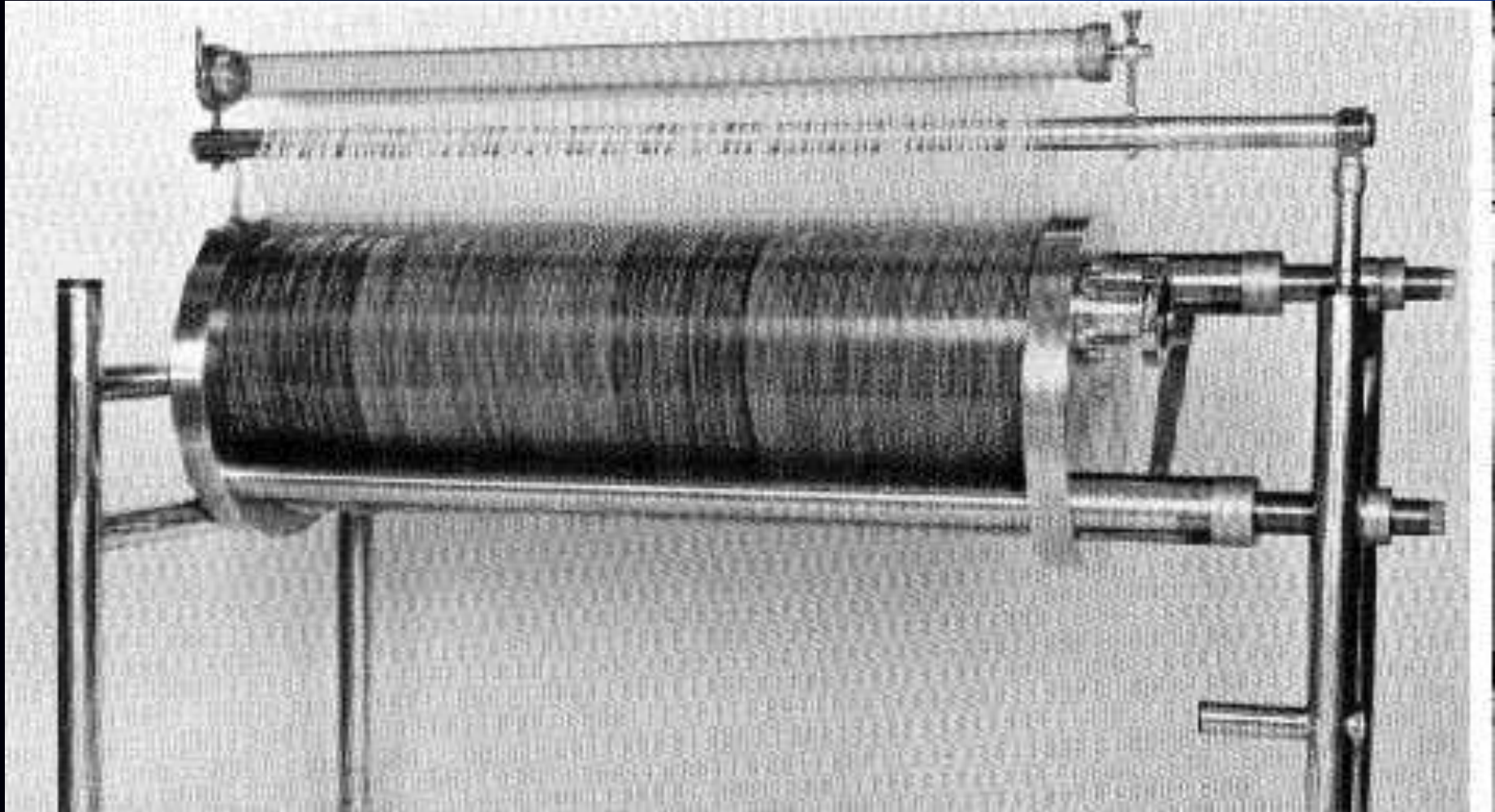
Módulos para Membranas Planas - Unidade Piloto



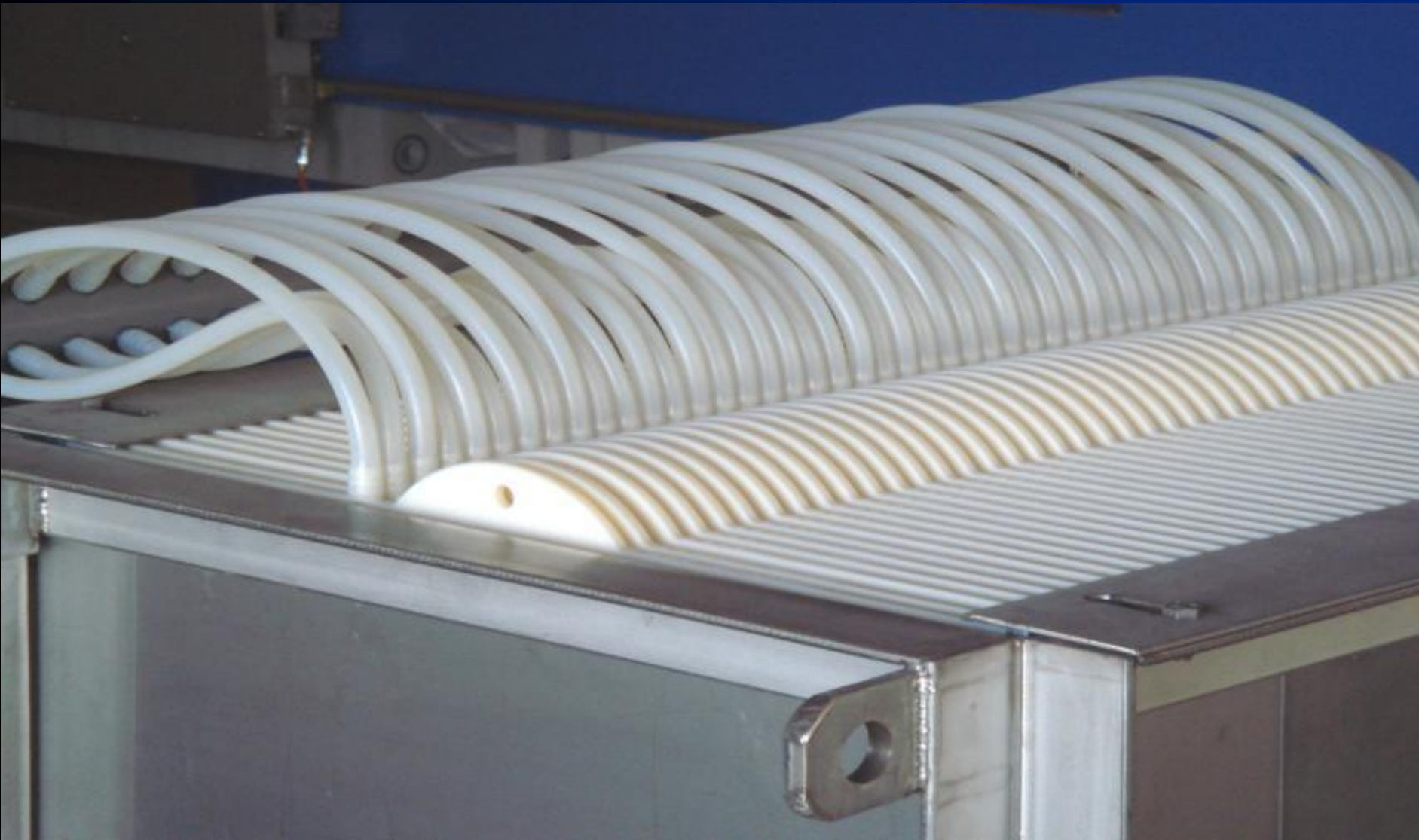
Módulos para Membranas Planas - Unidade Piloto



Módulos de Membranas Planas Tipo Quadro-Placa

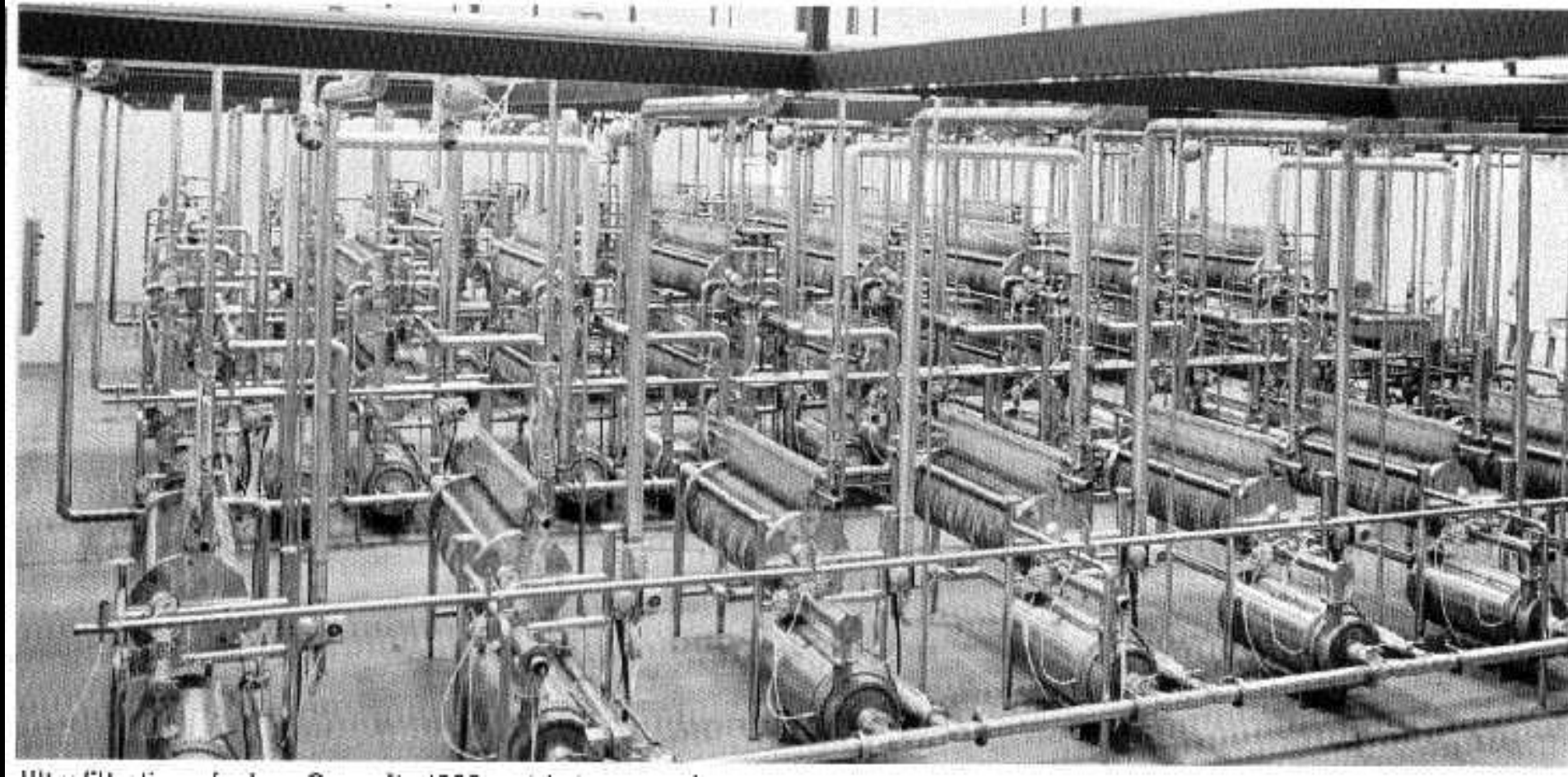


Módulos de Membranas Planas Tipo Quadro-Placa





Módulos para Membranas Planas - Unidade Industrial



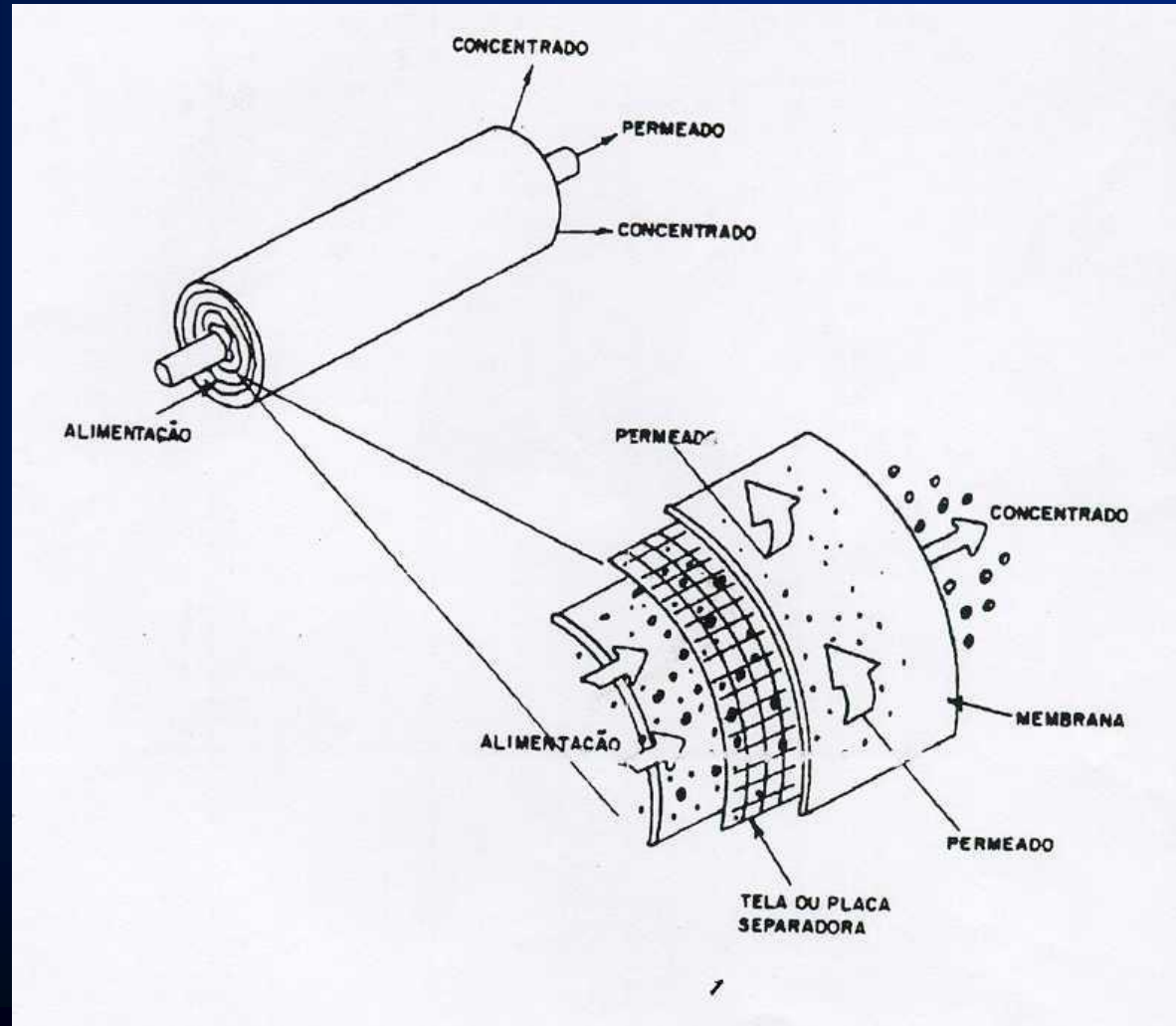
Ultrafiltração do Soro de Queijo - 100 toneladas/dia

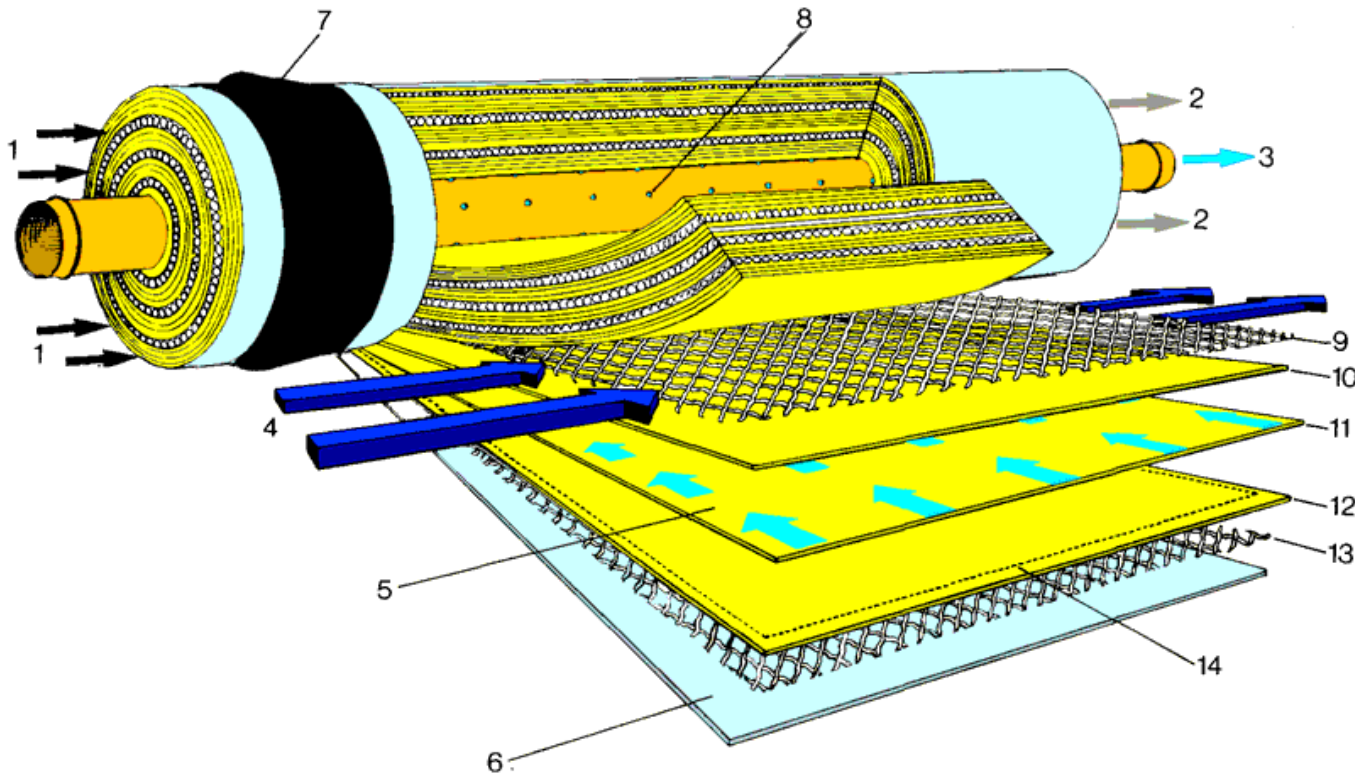
Módulos para Membranas Planas

C) Módulo Espiral

Obs.:

- 1) A membrana é posicionada entre dois espaçadores;
- 2) As membranas juntamente com os espaçadores são enrolados em torno de um duto perfurado (coleta do permeado);
- 3) Custo de fabricação baixo e relação área de permeação/volume de módulo mais elevada ($800-1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$);
- 4) Condições de escoamento da alimentação é fortemente dependente do espaçador utilizado;
- 5) Frequentemente utilizado em Osmose Inversa, Permeação de gases e Pervaporação.

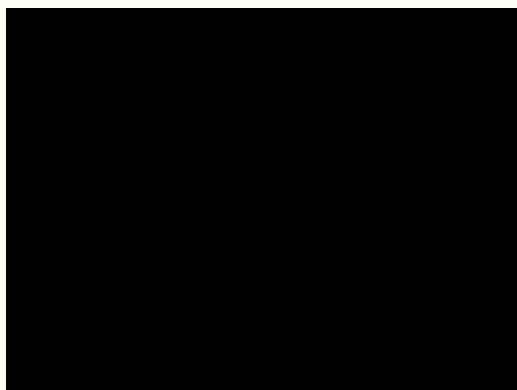




- 1.Raw water.
- 2.Reject.
- 3.Permeate outlet.
- 4.Direction of flow of raw water.
- 5.Direction of flow of permeate.
- 6.Protective coating.
- 7.Seal between module and casing.
- 8.Perforated tube for collecting permeate.
- 9.Spacer.
- 10.Membrane.
- 11.Permeate collector.
- 12.Membrane.
- 13.Spacer.
- 14.Line of seam connecting the two membranes.

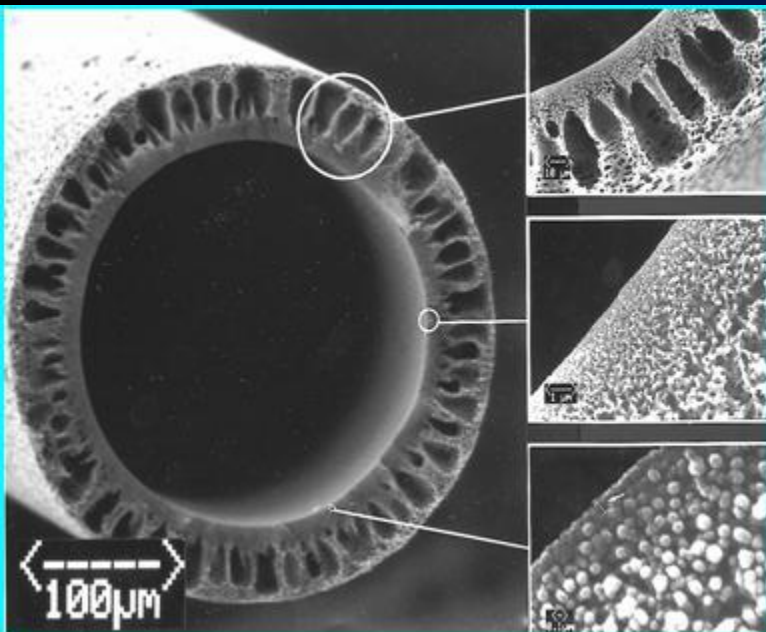


- **VÍDEO SOBRE MEMBANA ESPIRAL**



GEOMETRIA CILÍNDRICA

- Auto-suportadas;
- Maior relação entre a área de permeação e o volume de permeado;
- Economia no custo do módulo de membranas e dos equipamentos;



*Membrana do tipo
fibra-oca
polímero base
polissulfona*

*Membrana tubular
material base
cerâmicas*

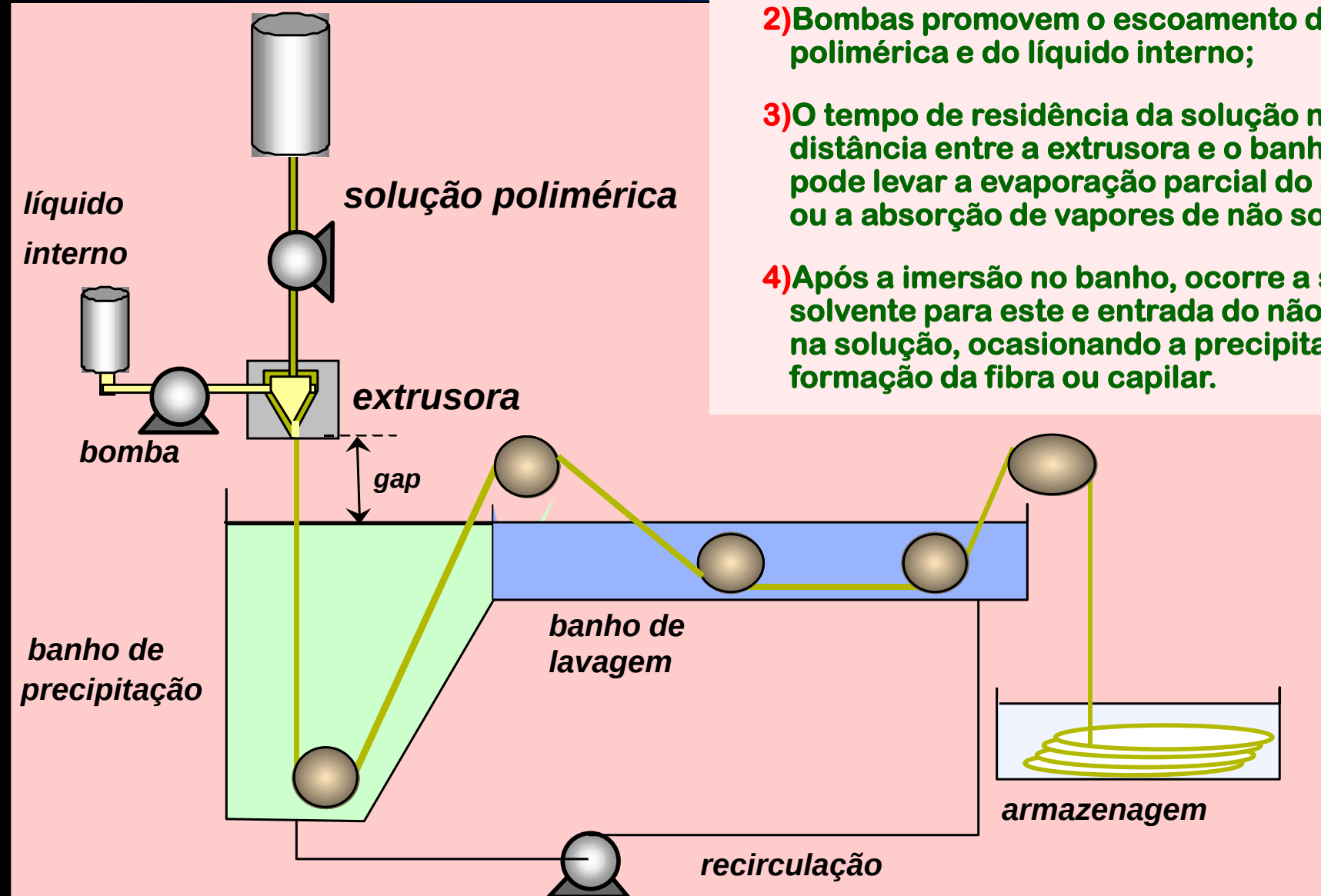


Equipamento para fabricação de fibras ocas e capilares



Equipamento para fabricação de fibras ocas e capilares

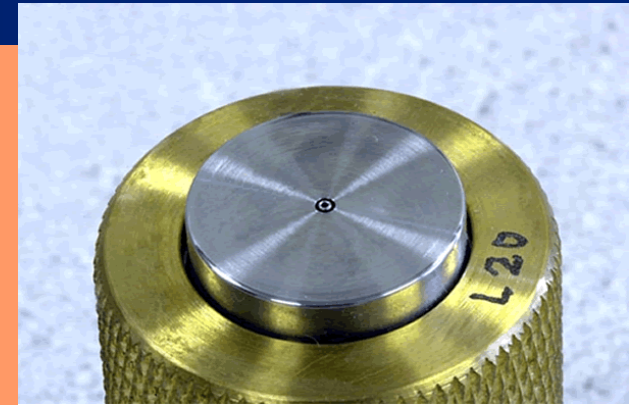
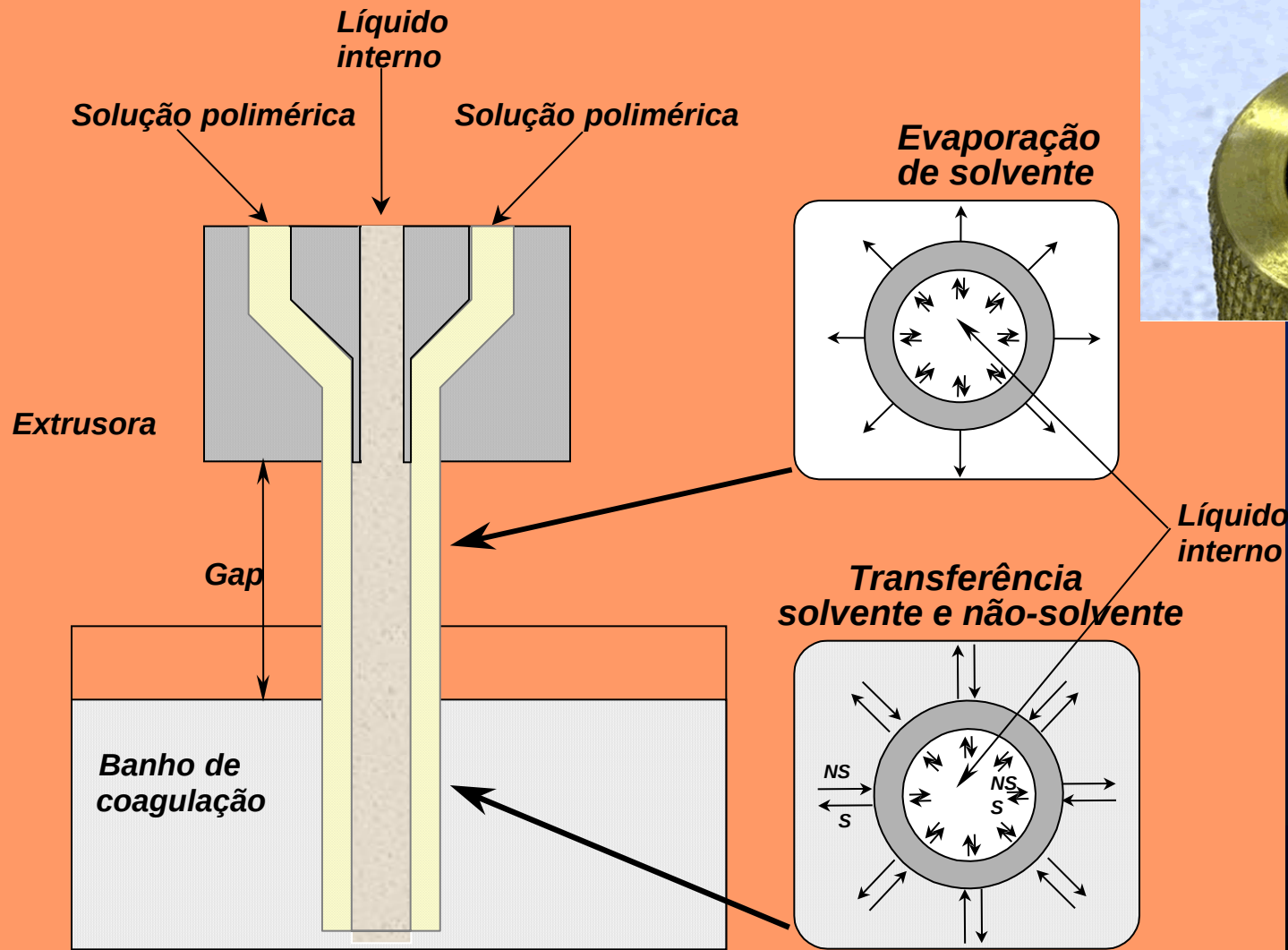
- 1) A extrusora é posicionada acima do banho de precipitação;
- 2) Bombas promovem o escoamento da solução polimérica e do líquido interno;
- 3) O tempo de residência da solução na distância entre a extrusora e o banho (gap) pode levar a evaporação parcial do solvente, ou a absorção de vapores de não solvente;
- 4) Após a imersão no banho, ocorre a saída do solvente para este e entrada do não-solvente na solução, ocasionando a precipitação e a formação da fibra ou capilar.



Fabricação de Membranas na Forma de Fibra-Oca e Capilar

- 1) A técnica de extrusão a frio com precipitação por imersão, é a que possibilita a maior flexibilidade em termos de morfologia da membrana;
- 2) Nesta técnica uma solução polimérica é extrusada em direção ao banho (não solvente);

3) No banho de não-solvente ocorre a precipitação;



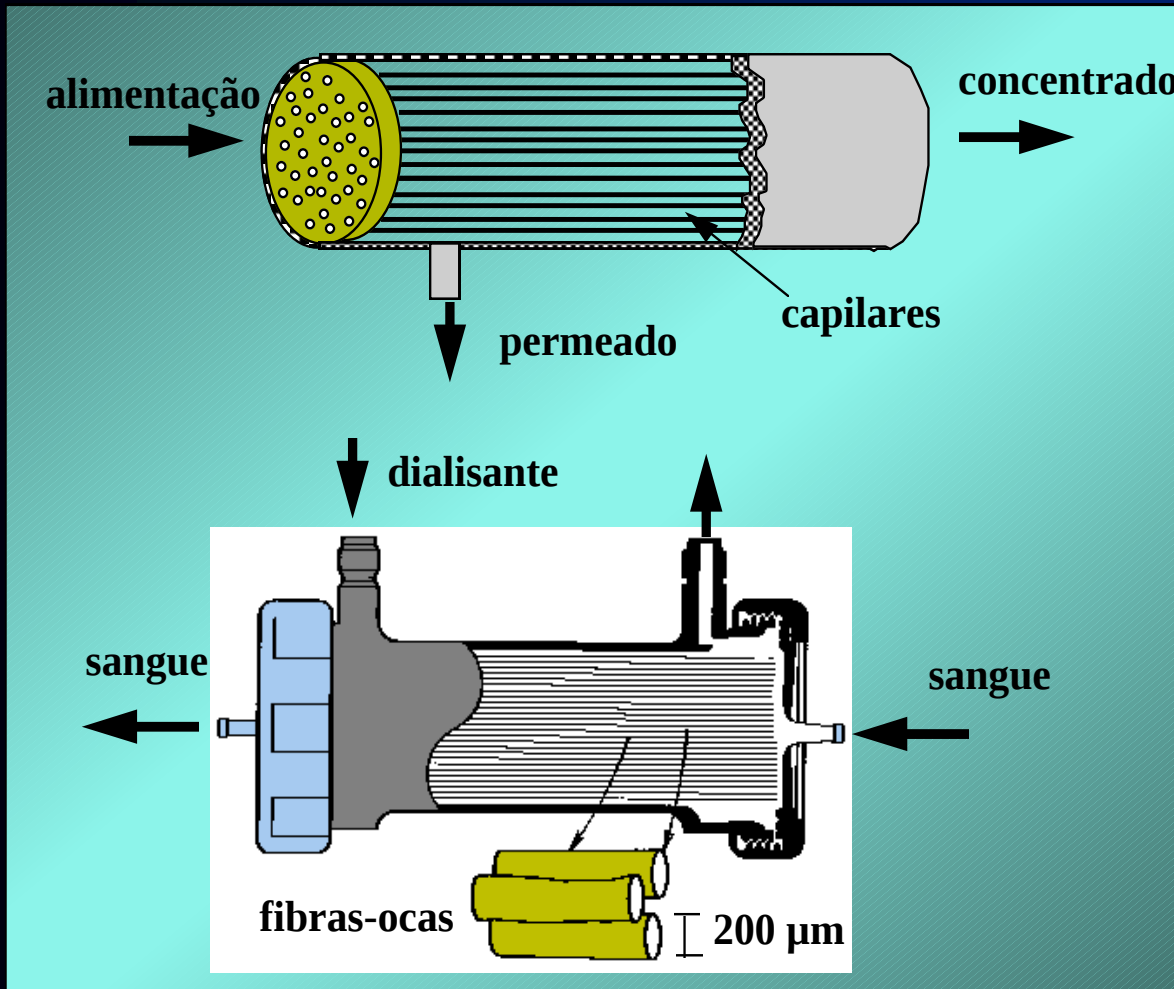
Variáveis de Processo Fibras-Ocas e Capilares

- ◀ Variáveis termodinâmicas e cinéticas;
 - ◀ precipitação polimérica.
- ◀ Variáveis mecânicas;
 - ◀ tensão de cisalhamento (passagem pela extrusora)
 - ◀ tensão axial de estiramento
 - ◀ presença de duas frentes de precipitação
 - ◀ expansão viscoelástica na saída da extrusora (die-swell)

Considera-se fibras-ocas as membranas com diâmetro externo inferior a 1 mm e capilares as membranas com diâmetro externo entre 1 e 3 milímetros

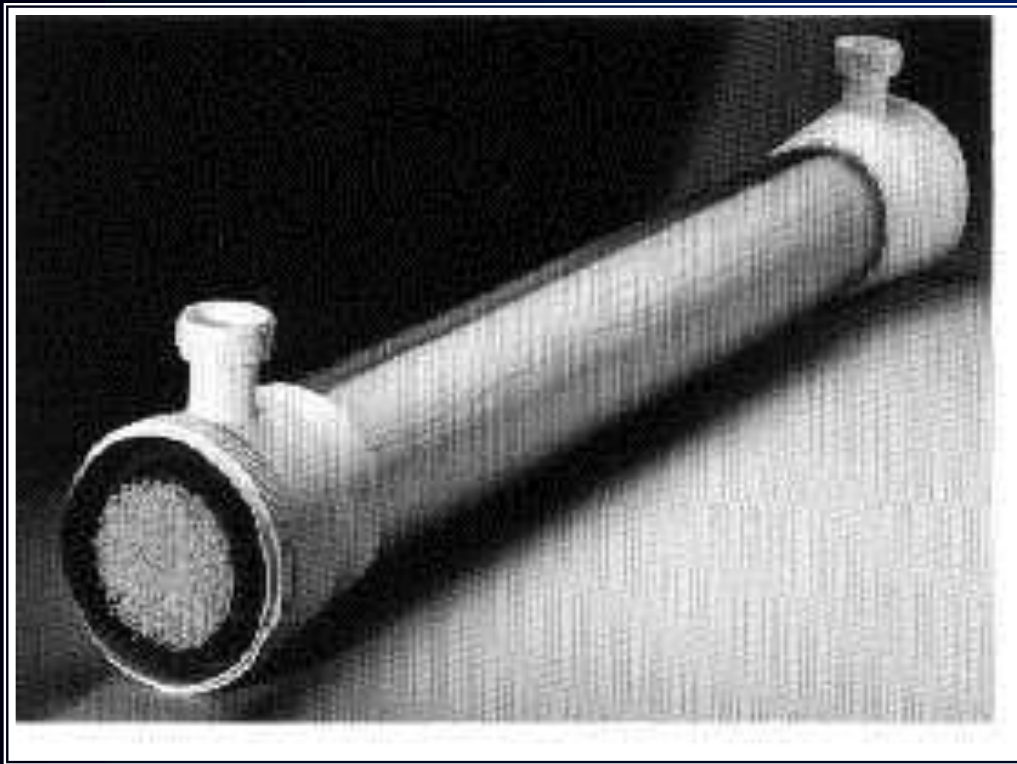
Módulos para Membranas Capilares e Fibras-Ocas

Obs.:

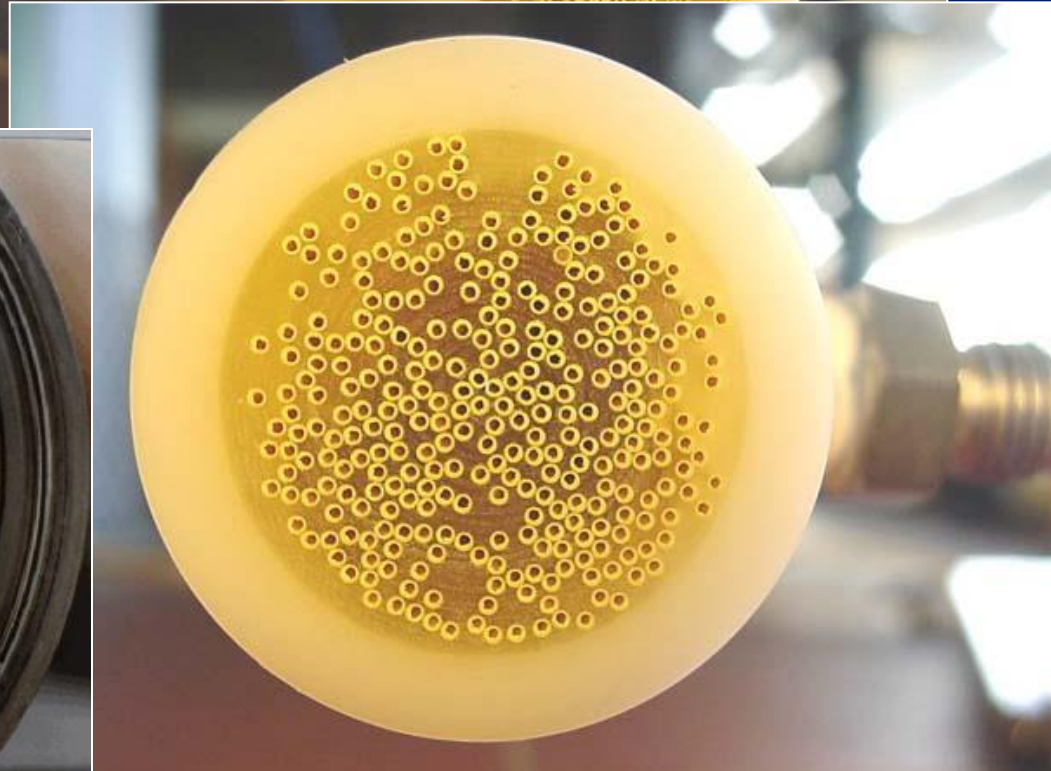


- 1) Membranas auto-suportadas;
- 2) Reduzido Custo de fabricação e elevada relação área de permeação/ volume de módulo. Pode chegar a $10.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$;
- 3) Membranas Capilares normalmente usadas em Microfiltração, Ultrafiltração e Pervaporação utilizado em Osmose Inversa, Permeação de gases e Pervaporação.
- 4) Membranas Fibras-Ocas são mais empregadas nos processos de Diálise, Osmose Inversa e Permeação de Gases.

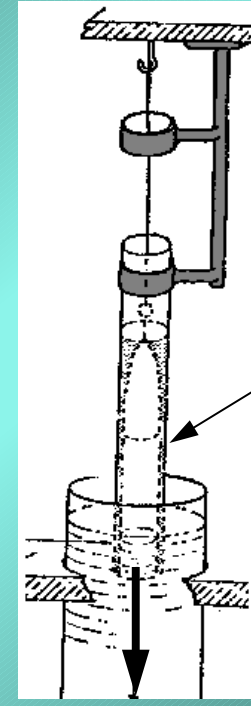
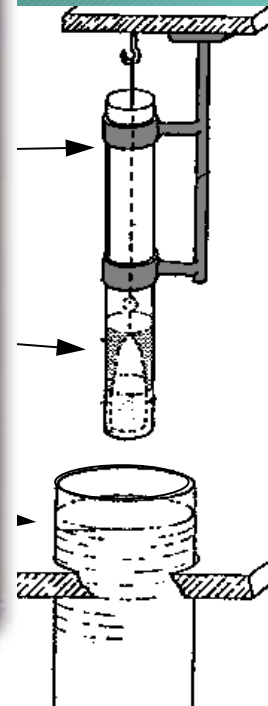
MÓDULOS DE FIBRA OCA



MÓDULOS DE FIBRA Óptica



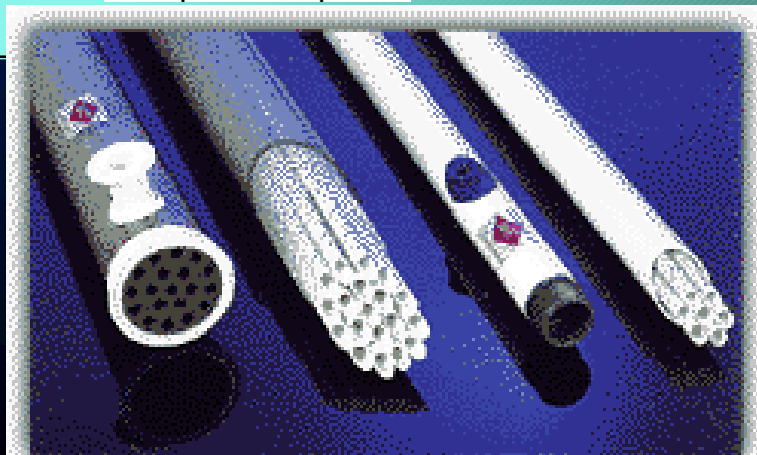
Membranas Tubulares



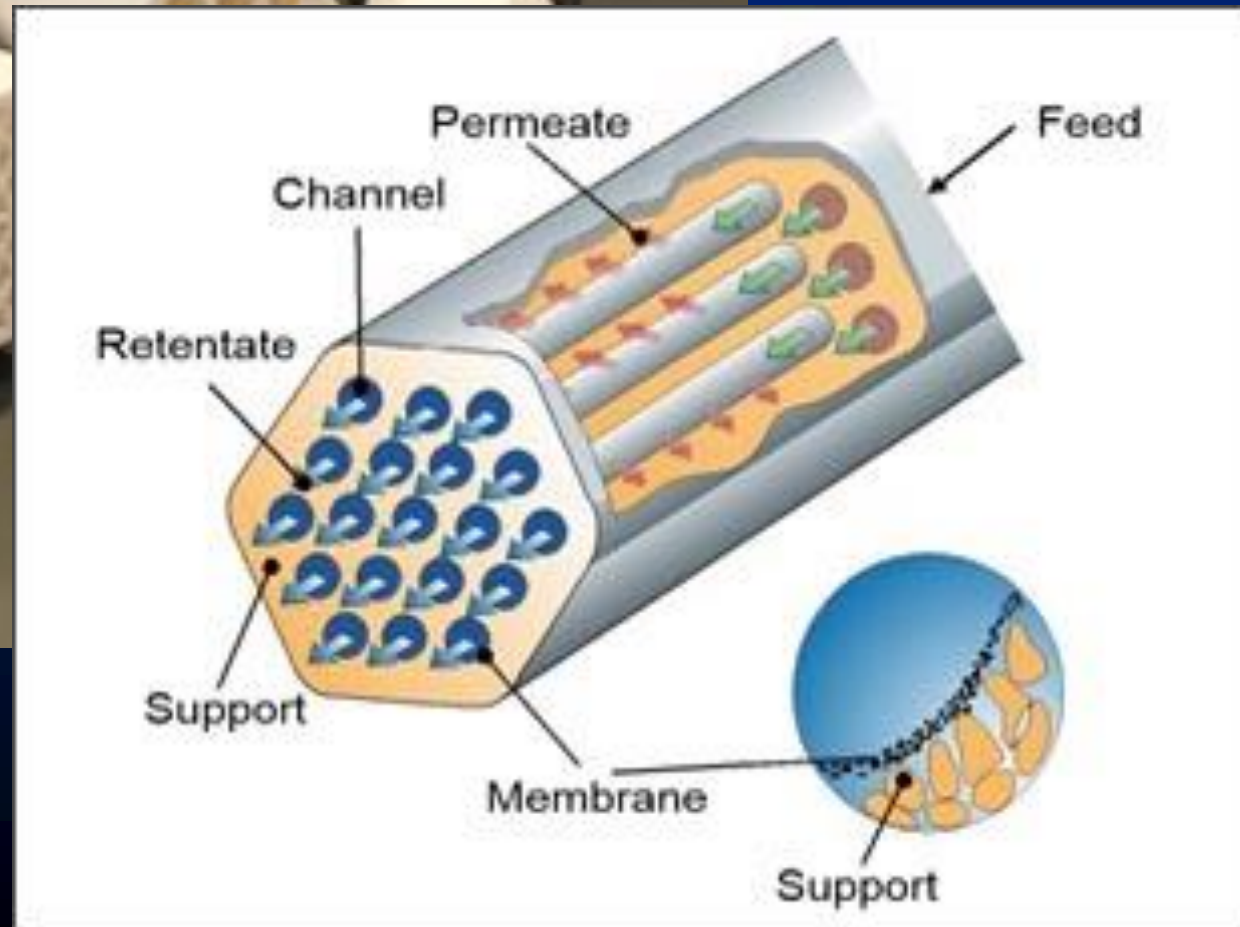
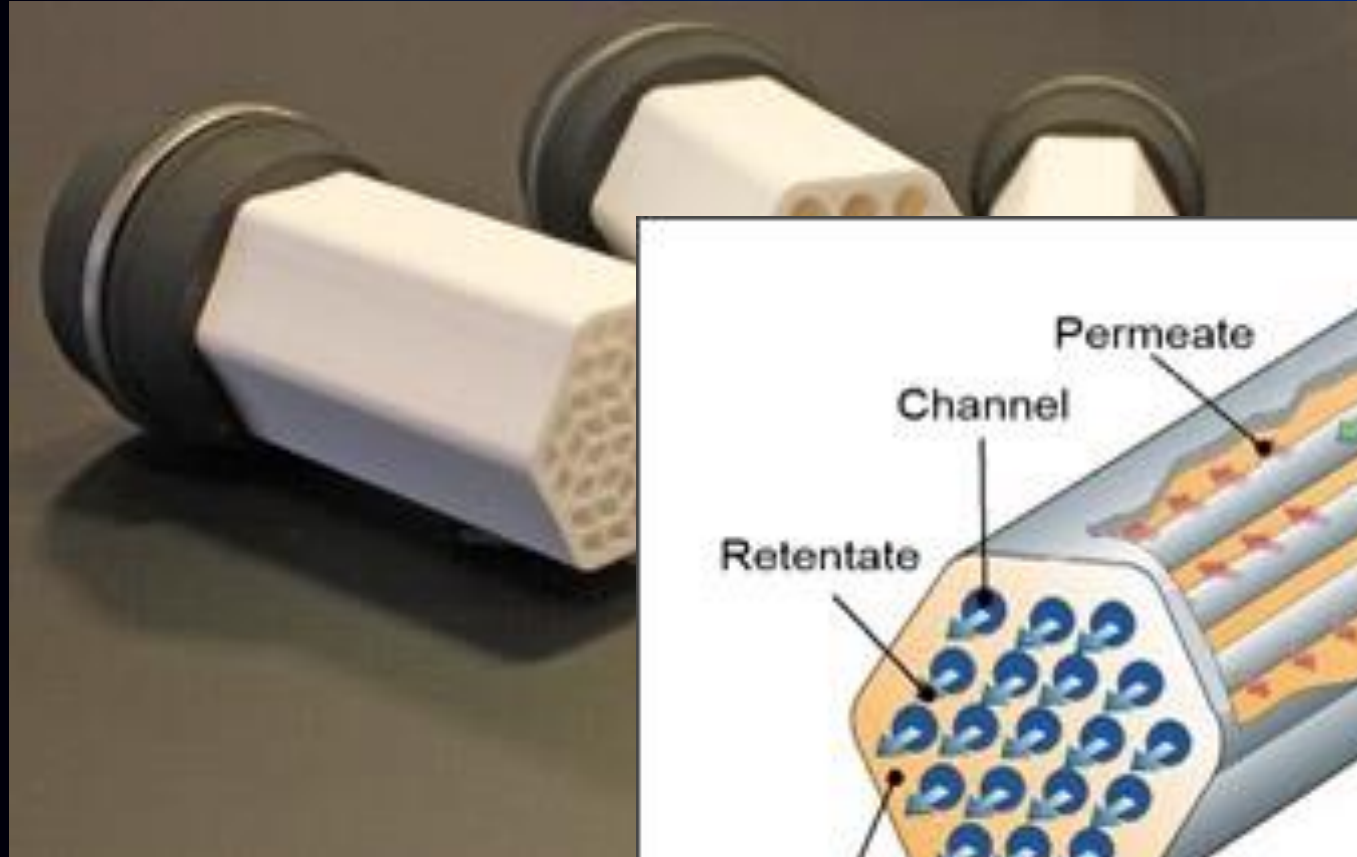
espalhamento
da solução

a mesma é encaminhada para as etapas de secagem.

4) Membranas com alta resistência mecânica e reduzida relação área de permeação/ volume de módulo (20 a 30 m²/m³;



Módulos de Membranas Cerâmicas



Comparativo entre os Diferentes Tipos de Módulos

Requisitos básicos para um bom módulo de Membranas:

- 1) Possibilidade de controle de escoamento;
- 2) Facilidade de Limpeza;
- 3) Elevada relação área de permeação/ volume de módulo;
- 4) Baixo custo de fabricação.

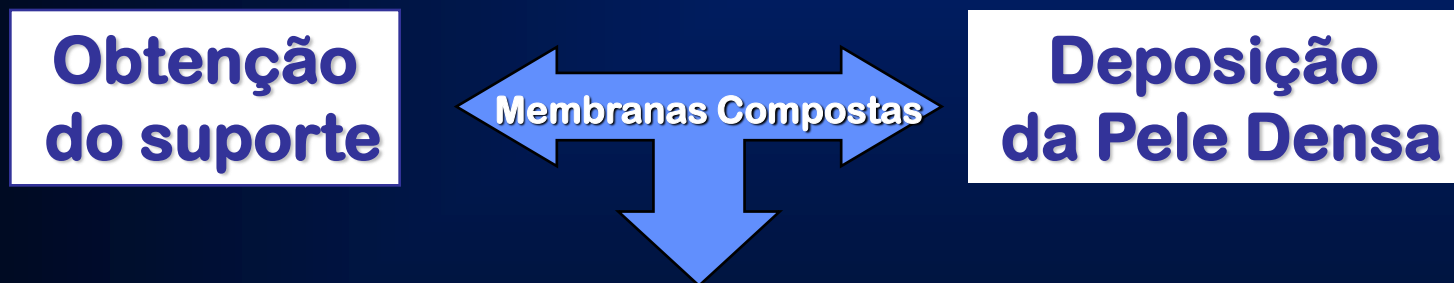
Comparação dos diferentes tipos de módulos

<i>TIPO DE MÓDULO</i>	<i>M²/M³</i>
Tubular	30
Placa/quadro	500
Espiral	900
Capilar	1.000
Fibra-oca	10.000

Fabricação de Membranas Compostas

Obtenção de membranas compostas normalmente ocorre em duas etapas distintas:

- 1) Obtenção do suporte;
- 2) Deposição de filme ultrafino denso sobre uma das superfícies do suporte;



Técnicas de Fabricação

Deposição de Solução diluída ("dip-coating")

Polimerização interfacial

Polimerização por plasma

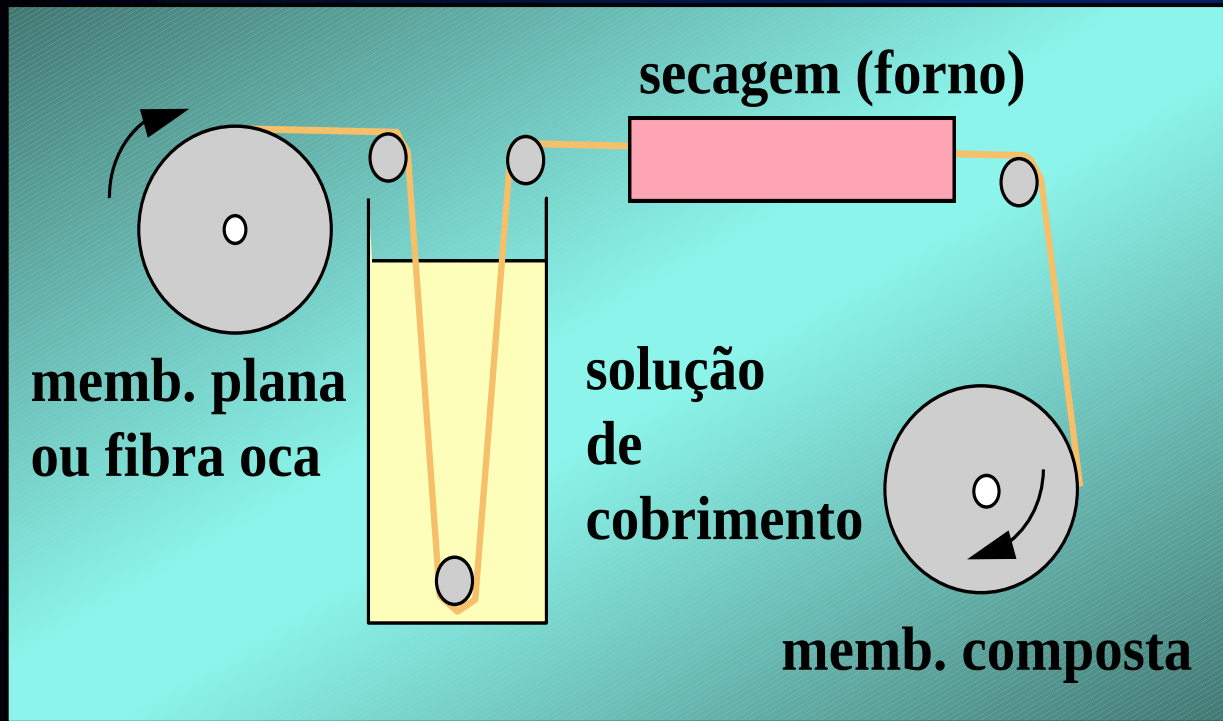
Modificação Química na Superfície de Membranas Anisotrópicas

Deposição de Solução diluída ("dip-coating")

Uma das primeiras técnicas a ser utilizada e mais empregada;

Etapas de obtenção:

- O suporte é direcionado para a solução de recobrimento (imersão ou contato superficial);
- Após contato ocorre a evaporação controlada



Obs.:

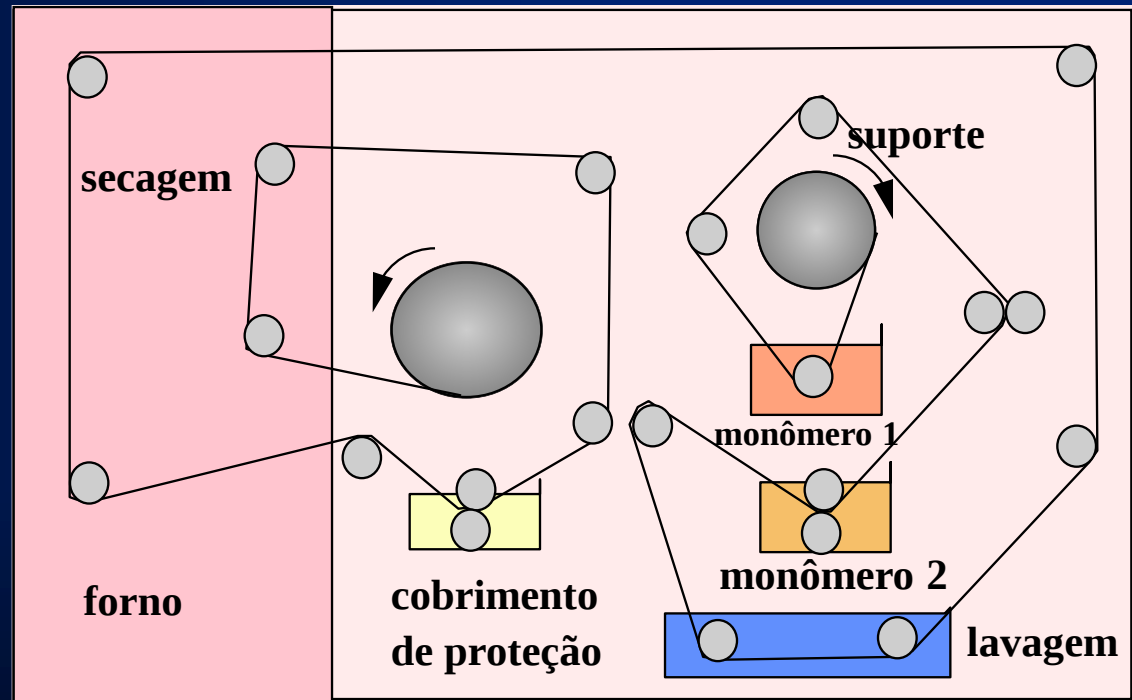
- 1) A espessura final depende da conc. do polímero na sol. (valores típicos = 5%);
- 2) Apresentam espessura de cobrimento de 0,5 a 2,0 μm ;
- 3) O solvente orgânico pode atacar o suporte;
- 4) Pode apresentar falta de aderência entre filme e suporte.

Polimerização Interfacial

Caracteriza-se pelo uso de duas fases imiscíveis contendo monômeros que reagem por polimerização ocorrendo a formação do polímero na interface.

Etapas do processo:

- 1) A membrana microporosa impregnada com tensoativos é imersa em solução aquosa (monômero 1);
- 2) A seguir esta membrana é imersa na fase orgânica contendo o monômero 2 iniciando a polimerização e conseqüente formação da pele superficial;
- 3) Uma vez formado o filme a membrana é lavada e encaminhada a câmara de secagem e armazenamento.



Obs.:

- As propriedades do filme denso dependem da solubilidade, reatividade, conc. dos reagentes, tempo de residência nos banhos e secagem.
- Apresentam espessura de cobrimento de $0,1\mu\text{m}$ ou menor.

Processos de Separação por Membranas

Plano de Aulas:

- ✓ ***Considerações Gerais – Introdução***
- ✓ ***Breve Histórico***
- ✓ ***Morfologia de Membranas***
- ✓ ***Força Motriz e Mecanismos de Transporte em Membranas***
- ✓ ***Mercado***
- ✓ ***Síntese de Membranas***
- ✓ ***Caracterização de Membranas***
- ✓ ***Fabricação de Membranas e Módulos de Permeação***
- ✓ ***Principais Processos de Separação com Membranas***
- ✓ ***Fouling e Polarização de Concentração***
- ✓ ***Exemplos de Aplicações de Processos com Membranas***