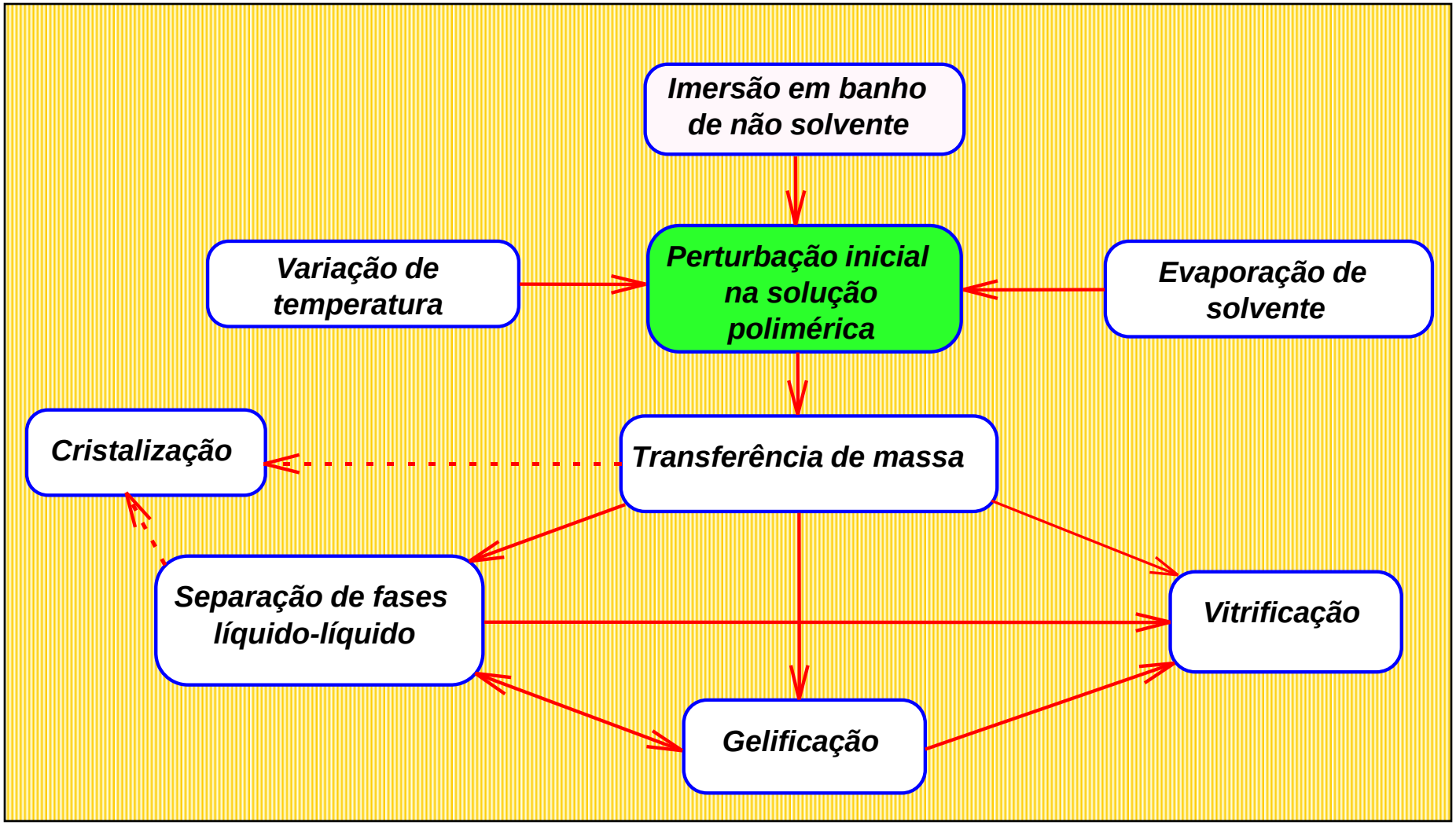
Processos envolvidos na formação de membranas por Inversão de Fase.



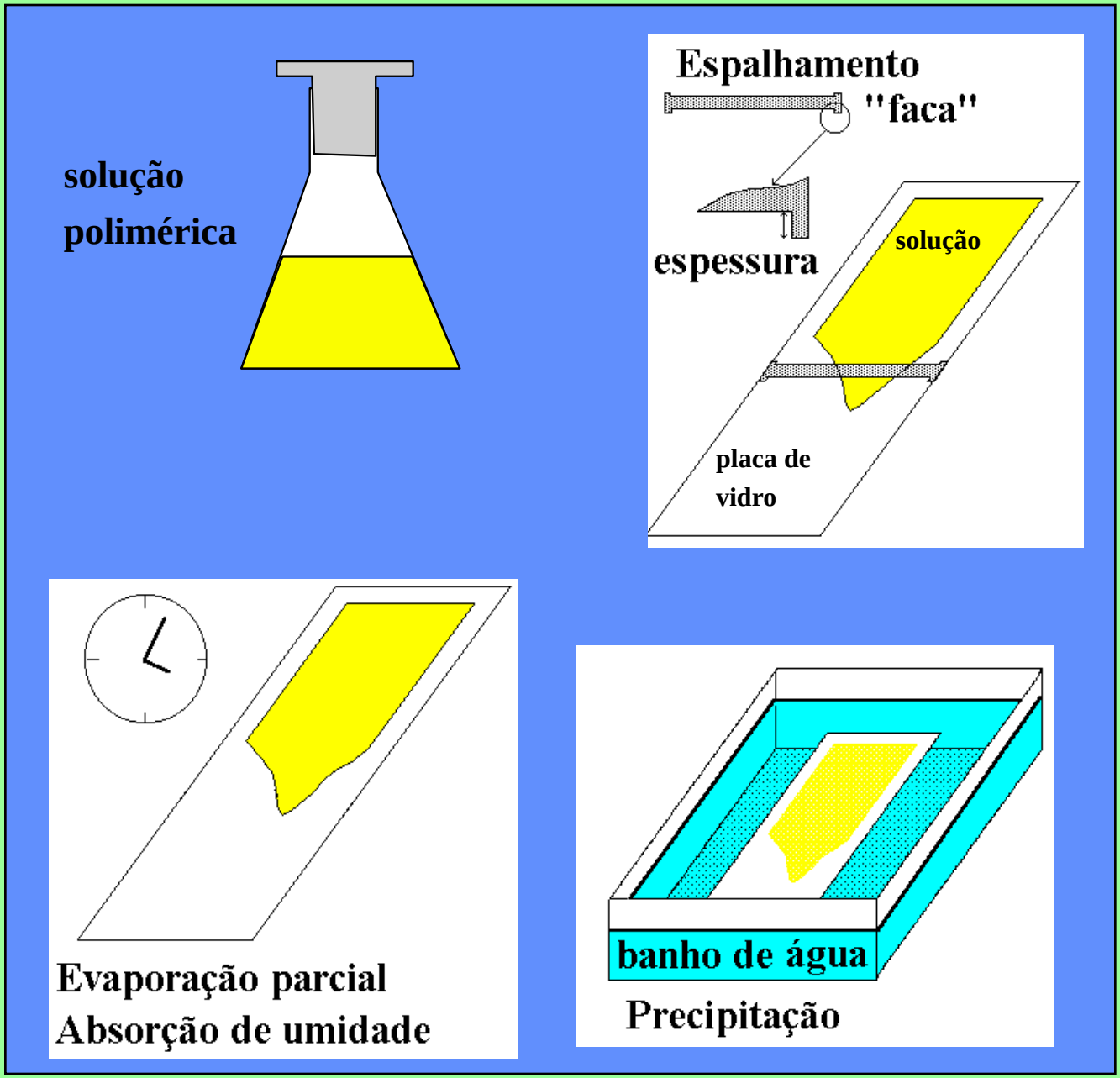
Em um processo de Inversão de Fase pode obter diferentes morfologias de membrana em função:

- *Natureza do polímero*
- *Natureza do solvente*
- *Natureza do não solvente*
- *Presença ou não de aditivos*
- *Condições de precipitação (indução de instabilidades).*

Principais técnicas de Inversão de Fase:

- *Precipitação Térmica*
- *Precipitação por Evaporação de Solvente*
- *Precipitação por imersão*

PREPARO DE MEMBRANAS POROSAS ANISOTRÓPICAS – PRECIPITAÇÃO POR IMERSÃO

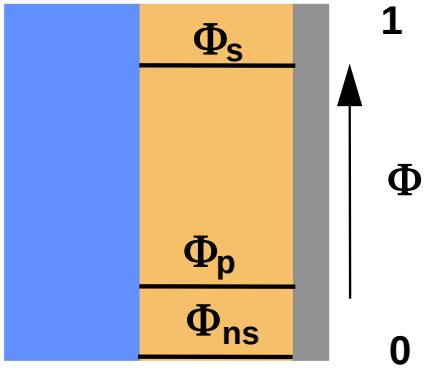


MEMBRANAS ANISOTRÓPICAS – PRECIPITAÇÃO POR IMERSÃO – ANÁLISE FENOMENOLÓGICA

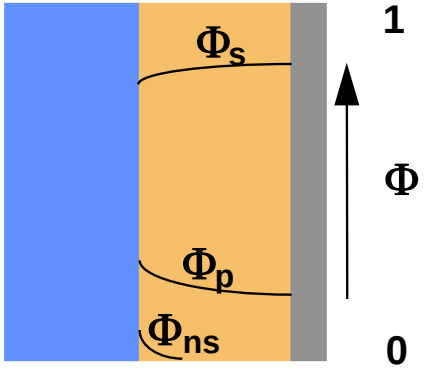
- *Banho de precipitação*
- *Solução polimérica*
- *placa de vidro*

fração mássica de não-solvente - Φns
fração mássica de solvente - Φs
fração mássica de polímero - Φp

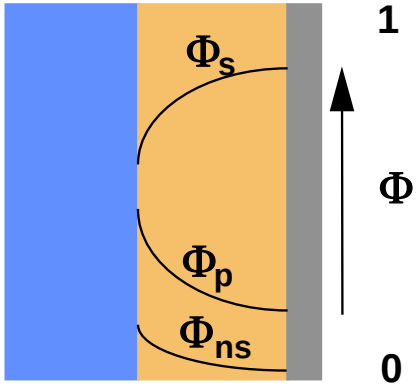
a) Antes da imersão



b) Logo após a imersão

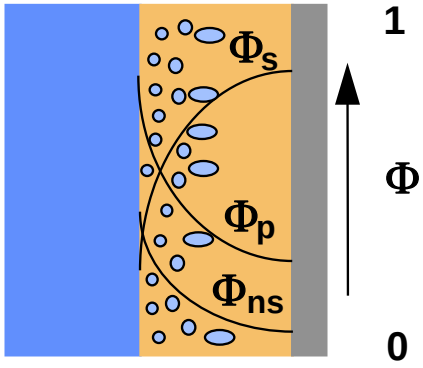


c) Precipitação da interface



efeitos viscosos presentes na região superficial

d) Separação Líquido-Líquido

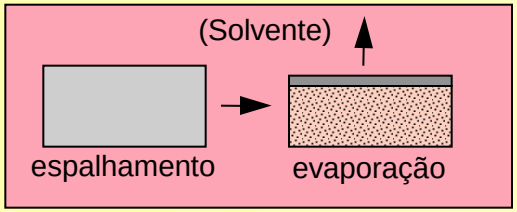


presença de núcleos da fase diluída em polímero

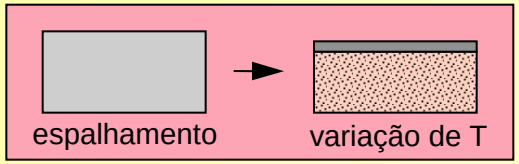
em resumo:

Técnicas de formação por Inversão de Fase
membranas Iso/Anisotópicas

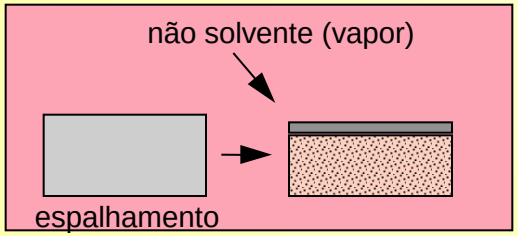
a) Evaporação



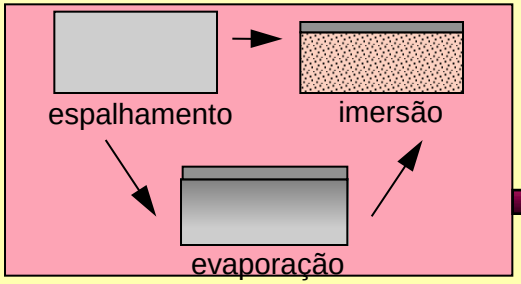
b) Temperatura



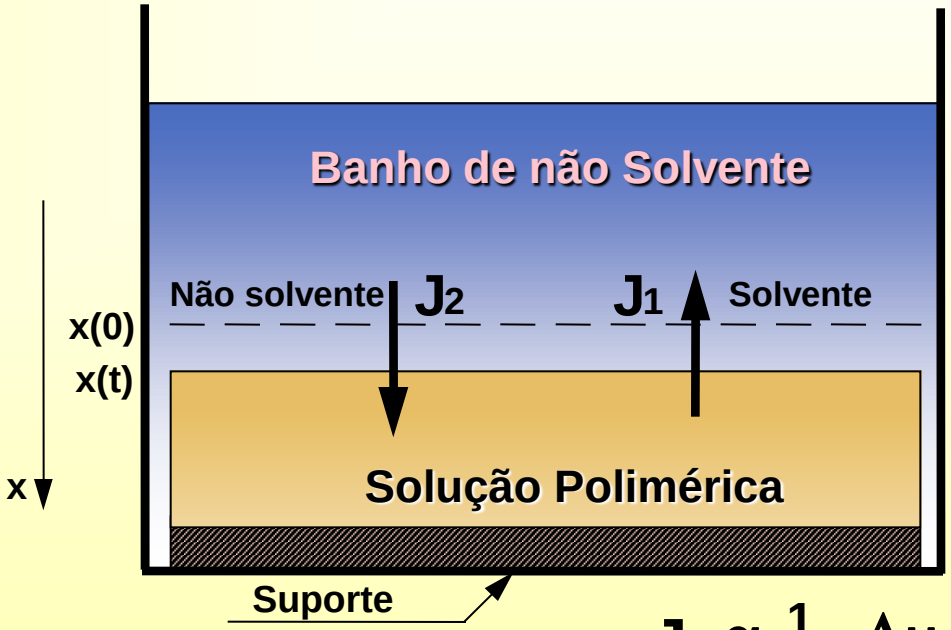
c) Absorção de não solvente



d) Evaporação +Imersão



Imersão



$$J_i \;\alpha\; \frac{1}{R} \cdot \Delta\mu$$

TÉCNICAS DE PREPARO DE MEMBRANAS DENSAS

Qual o objetivo?

"obter uma barreira seletiva capaz de promover a separação com base na interação (afinidade) entre espécies e membrana"

MEMBRANAS DENSAS ISOTRÓPICAS

- Evaporação por Solvente
- Extrusão
- Laminação
- Sopro

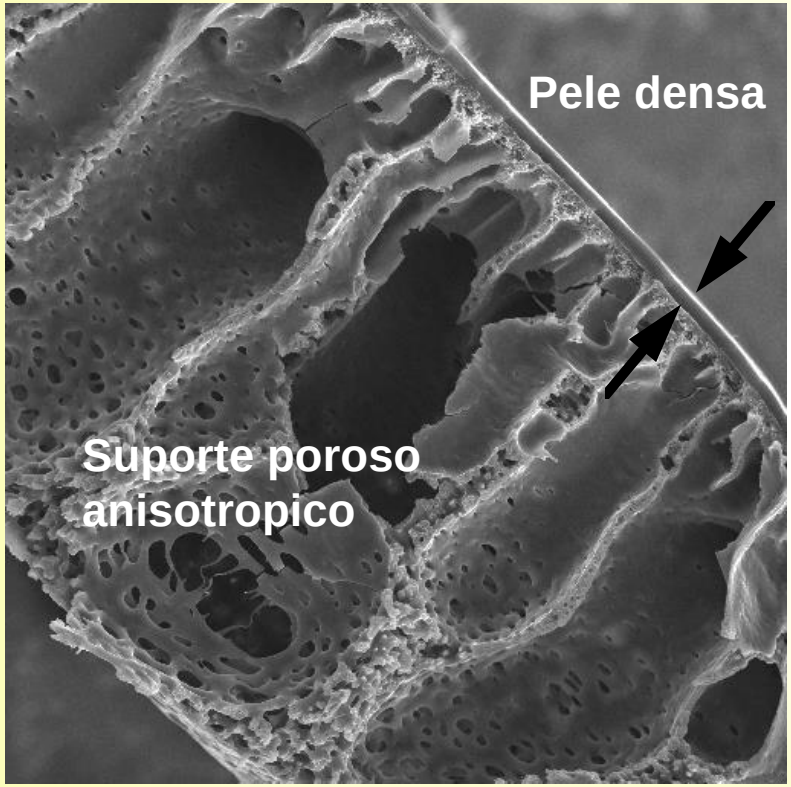
MEMBRANAS DENSAS ANISOTRÓPICAS

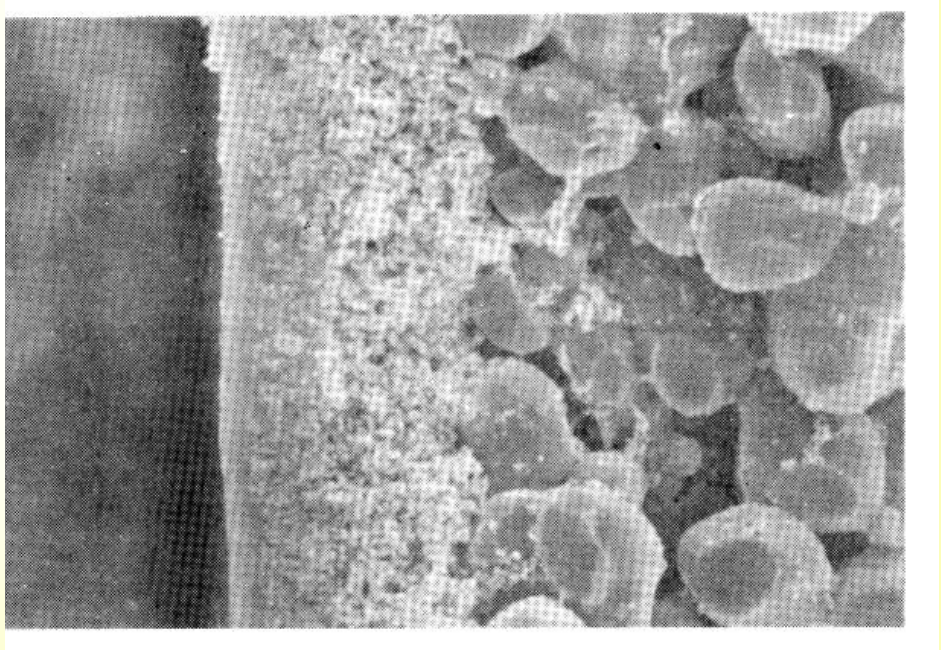
- Inversão de Fase (Integral)
- Deposição de um filme denso sobre um suporte microporoso (composta)
  - "Casting"
  - Polimerização "in situ"
  - Polimerização por Plasma

"Membranas Densas Isotrópicas não apresentam nenhum interesse comercial"

"CASTING"

Detalhes das seções transversais de membranas anisotrópicas





Suporte – poli(etersulfona)
Pele - EPDM

Suporte – inorgânico
Pele – inorgânico (sol gel)

Caracterização de Membranas

1. **Caracterização de membranas Porosas**

   - ***Microscopia Eletrônica***
   - ***Porosimetria pelo Método da Intrusão de Mercúrio***
   - ***Adsorção e Dessorção de Gás***
   - ***Permeabilidade***
   - ***Ponto de bolha***
   - ***Permeação Gás - Líquido***
   - ***Rejeição de Solutos Polidispersos***

2. **Caracterização de Membranas Densas**

3. **Caracterização de Membranas Compostas**

1. Introdução

PSM – fracionamento de misturas/soluções/suspensões

espécies de tamanhos diferentes

espécies de natureza química diferentes

Espécie	*Faixa de Tamanho* (nm)
Fungos e leveduras	1000 - 10000
Bactéria	300 - 10000
Emulsões de óleo	100 - 10000
Sólidos coloidais	100 - 1000
Vírus	30 - 300
Proteínas/Polissacarídeos (PM: 10^4 - 10^6)	2 - 10
Enzimas (PM: 10^4 - 10^5)	2 - 5
Antibióticos (PM: 300 - 1000)	0,6 - 1,2
Moléculas orgânicas (PM: 30 - 500)	0,3 - 0,8
Ions inorgânicos (PM: 10 - 100)	0,2 - 0,4
Água (PM: 18)	0,2

- não podemos esquecer que.....

Boas membranas devem combinar:

- *Altos Fluxos*
- *Boas Propriedades de Separação.*

Importante

- *Conhecer a estrutura das membranas e*
- *sua relação com as propriedades de transporte*
- *Ter melhor compreensão dos fenômenos envolvidos*
- *Selecionar a melhor estrutura para cada separação*

- técnicas adequadas.....

Busca-se com as técnicas de Caracterização relacionar:

Propriedades Estruturais das Membranas

(Porosidade)

(Distribuição de tamanho de poros)

(Curva de Corte)

(Permeabilidade Hidráulica)

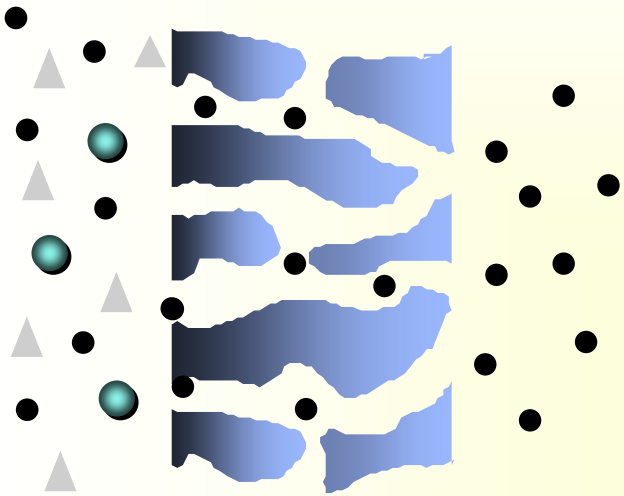
(Espessura)

(cristalinidade)

(volume livre)

Características de Separação (Membranas Porosas/densas)

Membranas Porosas



tamanho dos poros

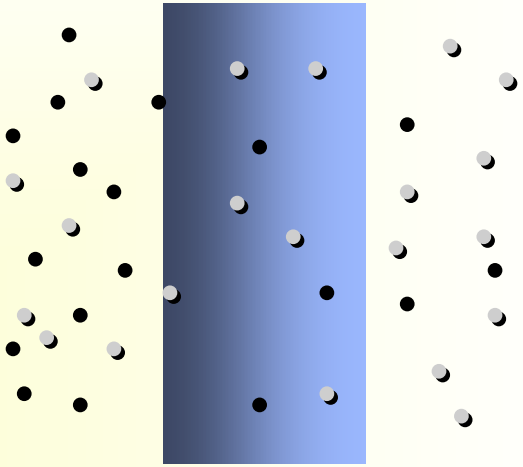
distribuição de tamanhos

partículas/moléc. retidas

partículas/moléc. passam pelos poros

Obs.: Geralmente, em membranas porosas o material de que é feita a membrana tem pouca ou nenhuma influência na capacidade seletiva.

Membranas Densas



não existência de poros

características físico-químicas

fatores determinantes da performance

Obs.: O transporte em membranas densas ocorre pela sorção da espécie no polímero seguida de sua difusão através da espessura da membrana.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

Características básicas das membranas para os diferentes processos de separação.

PROCESSO	Tamanho de Poro	Características	Mecanismo de Separação	Observações
Microfiltração	5 - 0.05 μm	isotrópica [a] $\varepsilon \sim 10\text{-}50\ \%$	por tamanho	
Ultrafiltração	50 - 3 nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 10\ \%$	por tamanho	cerâmica $\varepsilon \sim 10 - 50\%$
Nanofiltração	4 – 0,7nm	anisotrópica $\varepsilon \sim 0.1 - 5\ \%$	por tamanho	
Osmose Inversa	1- 0.1 nm [b]	anisotrópica	sorção/ difusão	
Diálise	10 - 0.1 nm	porosidade elevada $\varepsilon \sim 50\ \%$	difusão	Matriz pol. altamente inchada
Eletrodiálise	10 - 0.1 nm	densidade de carga	Δ carga elétrica	
Separação de Gases	< 0.1 nm	- anisotrópica	sorção/ difusão	
Pervaporação	< 0.1 nm	anisotrópica	sorção/ difusão	volatilidade dos permeantes

a) Porosidade (ε) da "top layer" no caso de membranas anisotrópicas e porosidade global no caso de membranas isotrópicas

b) transição entre microporos e espaço intermolecular.

2. Caracterização de membranas porosas – *Aspectos gerais*

Natureza dos Parâmetros

Permeabilidade

Fluxos de água Ultra-pura em condições padrão de T e P

Rejeição solutos polidispersos

Estrutura da Membrana

Tamanho de Poros
Distrib. de tamanho de poros
Porosidade Superficial
Espessura da pele

Outras Características Importantes

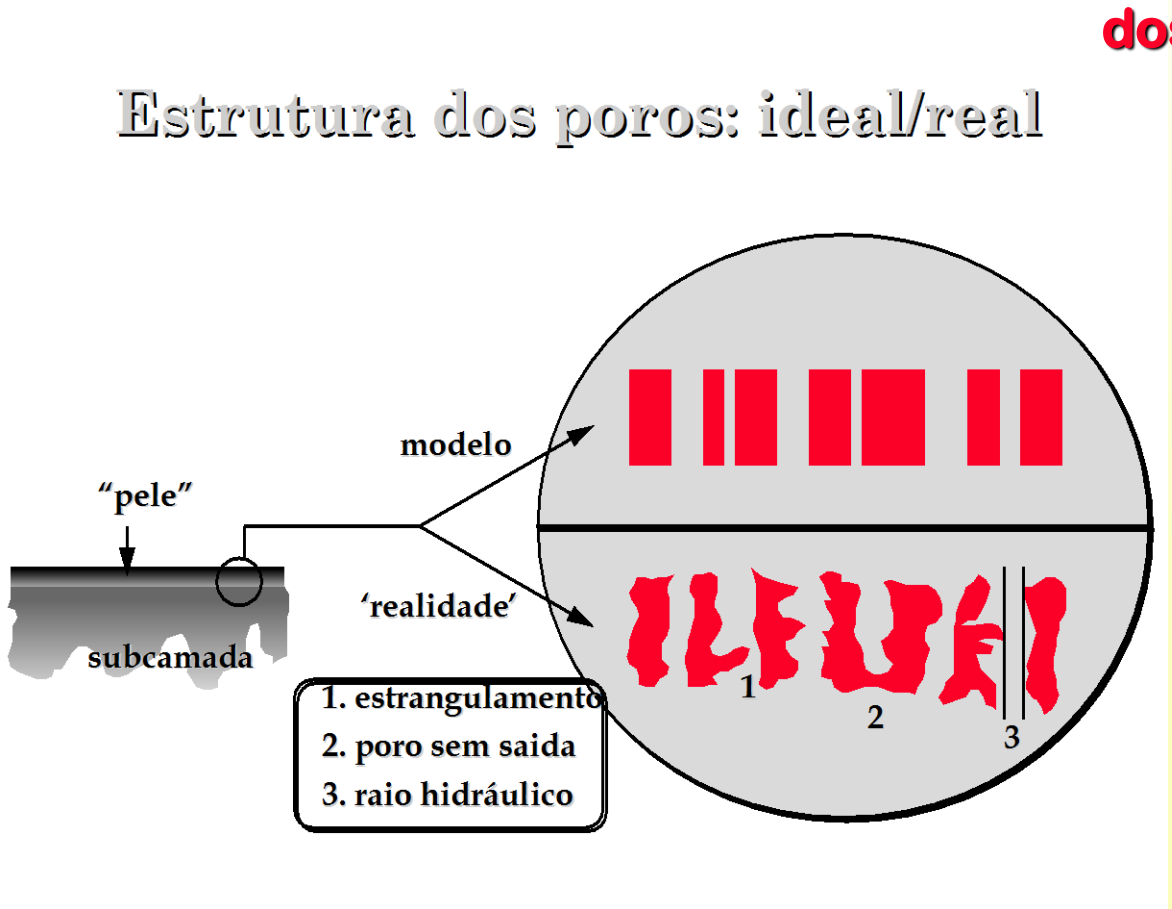
-natureza do material da membrana (hidrofílico ou hidrofóbico),

- Estabilidades Mecânica, Química e Térmica.

Com relação a estrutura dos poros

Problema a ser enfrentado

definição da forma e geometria dos poros da membrana



Obs.: Somente os poros passantes contribuem para o fluxo permeado.

A seguir....

principais métodos de caracterização

Principais métodos de caracterização de membranas porosas

Método	Princípio	Tamanho de Poros	Limitações	Vantagens	M/P *
Permeabilidade		ampla	Só valores médios podem ser obtidos	equip.simples de medidas rápidas.	P
Rejeição de Solutos Polidispersos	Relação entre retenção e tamanho de poro	Ampla	-relação massa molec./geom. - deform. da macromolécula	Distribuição tamanho de poros	P
Microscopia Eletrônica		> 500 A^0	- boa definição para poros > que 500 A^0	- determina distribuição de tamanho de poros.	M
Porosimetria de Mercúrio	Equilíbrio entre **P**ext. e σsup.	7,5 μm a 20 A^0	-pressões elevadas -presença assimetria	-rapidez - determina a distr.de poros	M
Adsorsão e desorção de gas	Condensação capilar / Tensão superficial	500 A^0 a 15 A^0	-equilíbrio lento -presença assimetria	- determ. a dist. de poros	M

***** M - Parâmetros relacionados com a morfologia da membrana.
P - Parâmetros relacionados com a permeabilidade

Principais métodos de caracterização de membranas porosas

Método	Princípio	Faixa de Tamanho de Poros	Limitações	Vantagens	M/P *
Ponto de Bolha	tensão superficial		-só para poros com diâmetro $>$ 1000 A^0	equip.simples de medidas rápidas.	M
Permeação de líquido + ponto de bolha	Desobstrução do poro quando Pext. $> \sigma$sup.	$>$ 300 A^0	- não é sensivel para poros pequenos	- determina poro máximo e distr. de poros.	P/M
Perporometria	Combinação: condensação capilar/perm. de gases	300 A^0 a 20 A^0	- interação penetrante/pol.	- distribuição de tamanho de poros	P/M
Termoporometria	abaixamen. da temp. de fusão em função do raio do poro	1500 A^0 a 15 A^0	Interação líq./polím -presença de assimetria	a amostra não é submet- secagem e compressão	M

***** M - Parâmetros relacionados com a morfologia da membrana.
P - Parâmetros relacionados com a permeabilidade

Permeabilidade de Água Pura – Fluxo de Água Pura

Princípios:

"O Fluxo, J, através de um meio poroso é proporcional a Pressão Transmembrana, P, e inversamente proporcional a viscosidade do solvente, η, como expressa a lei de Darcy"

$$J_v = \frac{L_p \Delta p}{\eta}$$

Onde:

J_V = *fluxo transmembrana*

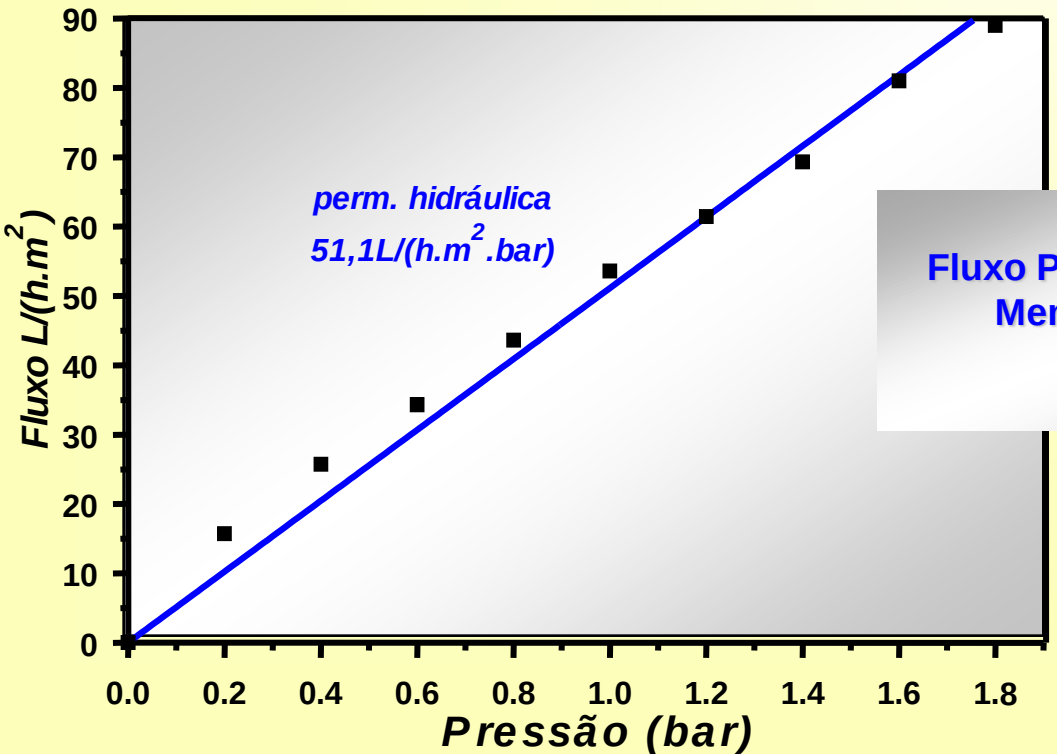
L_P = *permeabilidade do solvente*

η = *viscosidade do solvente*

Δp = *pressão aplicada*

Cuidados importantes:

- ***Para determinar o fluxo de água é muito importante usar água de qualidade.***
  - **Solvente: água deionizada ou destilada com uma condutividade menor que 5 μScm^{-1} a qual é tratada por microfiltração para remover materiais em suspensão.**
- ***Determina-se o fluxo a diferentes pressões e plota-se em função da pressão.***
- ***A partir da inclinação da reta obtida determina-se a permeabilidade (Lp).***



Fluxo Permeado de Água em Membrana hidrofílica 20 kDaltons

Fluxos típicos (água pura) membranas de:

microfiltração: 500 – 50.000 L $m^{-2}h^{-1}bar^{-1}$

ultrafiltração: 50 – 800 L $m^{-2}h^{-1}bar^{-1}$

Rejeição de Solutos Polidispersos – Massa Molecular de Corte (MWCO)

(MWCO) – Molecular Weigth Cut-Off

Característica muito usada por fabricante de membranas de ultrafiltração

Princípios:

"O Corte de uma membrana é definido como sendo o valor da Massa Molecular para o qual a rejeição da membrana é de 90%"

Exemplo:

Uma membrana de corte 70.000 Daltons *deve rejeitar moléculas de massa molecular de 70.000 Daltons em pelo menos 90%.*

Medida de permeabilidade de diferentes Massas Molares rigorosamente definidas.

Os solutos normalmente utilizados são o PEG de diferentes MM ou proteinas de altas MM como a Tripsina, Albuminas e Pepsina.

Parâmetros das proteínas utilizadas em ensaios de ultrafiltração

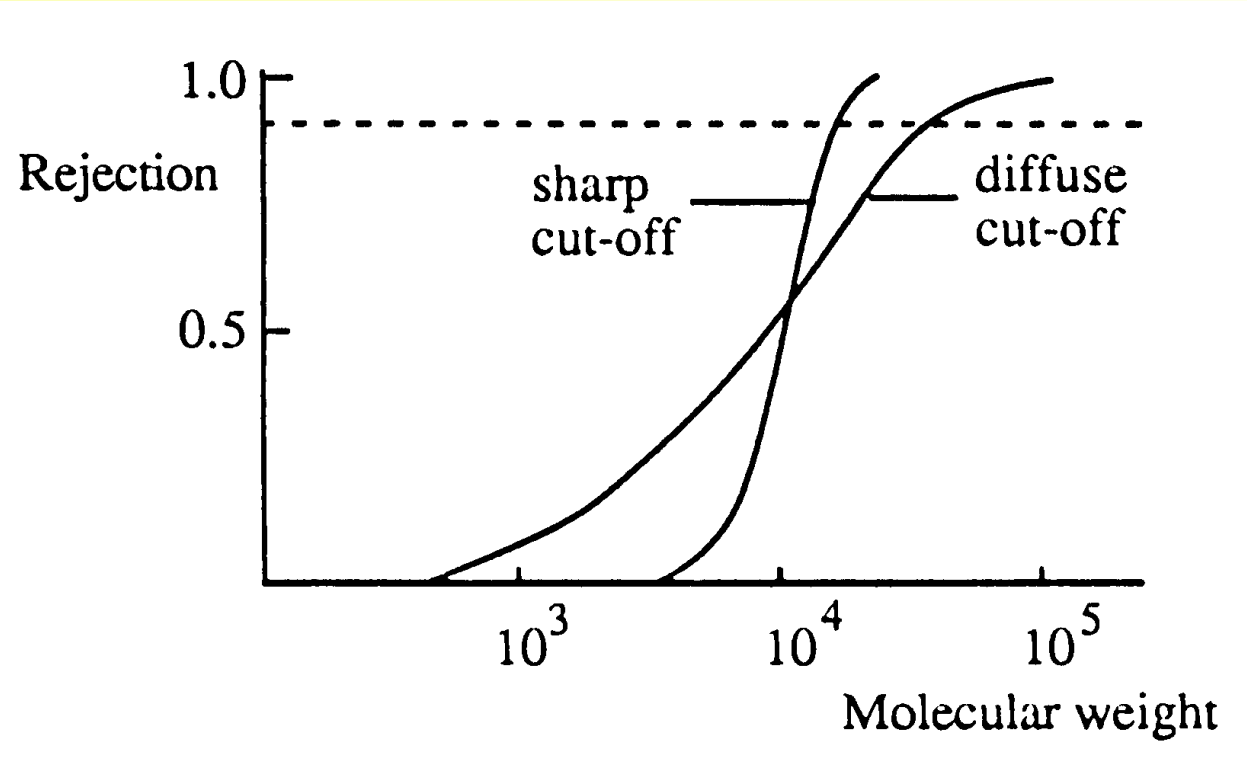
Proteína	Massa molar (kDa)	Raio médio do soluto (Å)
Trypsina	20	21,5
Pepsina	35	28,5
Albumina de ovo	45	33,0
*BSA	69	45,0

* BSA = albumina sérica bovino

*A partir de medidas de rejeição de solutos de diferentes massas moleculares é possível se obter a chamada "**Curva de Corte**" de uma membrana.*

Ex.:

Características de rejeição de membranas de ultrafiltração que apresentam curva de corte estreita e curva de corte espalhada.



Vantagem:

- *detecta apenas poros ativos*

Obs.:

- *Curva de corte pode ser obtida através de vários experimentos, ou*
- *Através de um único experimento que utilize como soluto polímeros com distribuição de MM bastante ampla.*

Microscopia Eletrônica

Técnicas Microscópicas mais utilizadas:

-Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV ou SEM)

-Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET ou TEM)

Princípios:

"A partir da observação visual direta obtém-se informações sobre a morfologia das membranas"

Obs.:

- *Diferentes técnicas requerem diferentes métodos de prepar. e tem diferentes resoluções.*

  MEV (5nm e fornece boas informações sobre tamanho e formato dos poros)

  TEM (0,5nm porém procedimentos preparativos muito mais complexos)

- *Material polimérico corre o risco de se alterar (alta voltagem na aceleração de elétrons)*
- *Necessidade de procedimentos especiais de secagem das amostras (evitar colapso dos poros)*

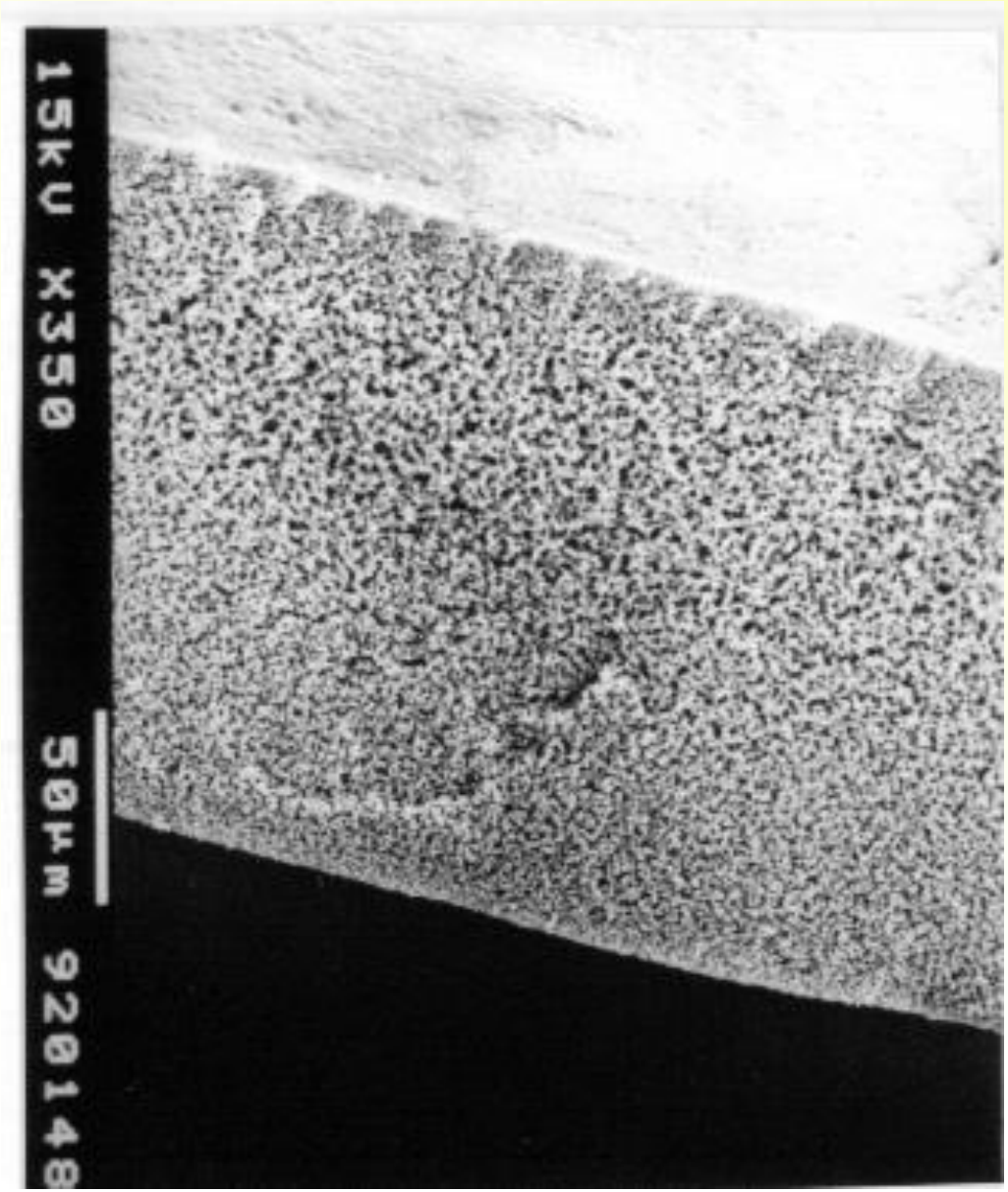
Algumas imagens típicas de estrutura de membranas obtidas com o uso de MEV:

Micrografia 1

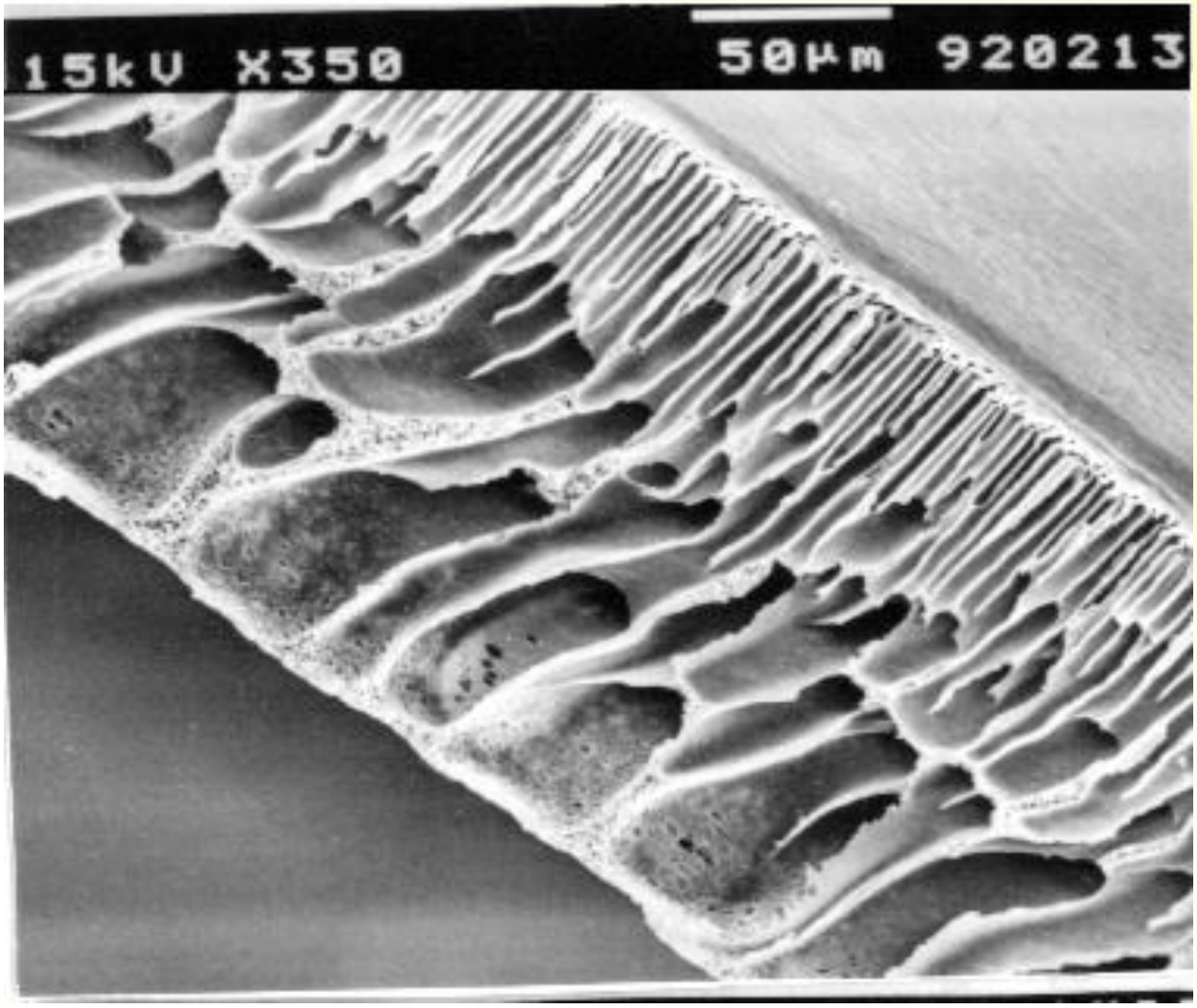
Material: Polietersulfona

Estrutura: isotrópica

Posição: seção transversal



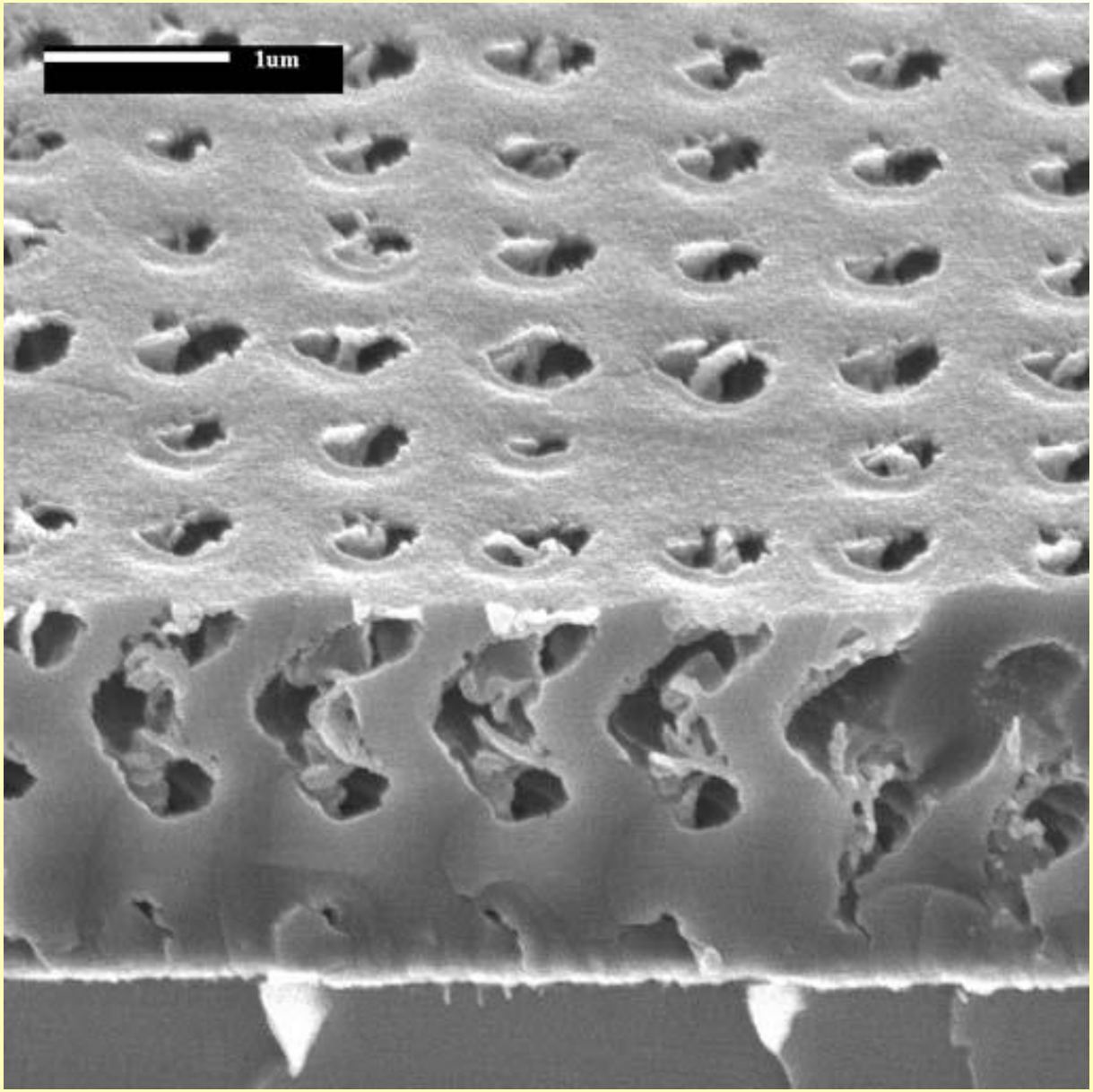
Algumas imagens típicas de estrutura de membranas obtidas com o uso de MEV:



Micrografia 2

Material: Polietersulfona **Estrutura: anisotrópica** **Posição: seção transversal**

Algumas imagens típicas de estrutura de membranas obtidas com o uso de MEV:



Micrografia 3

Material: Poliamida

Estrutura: isotrópica

Posição: seção transversal e superfície

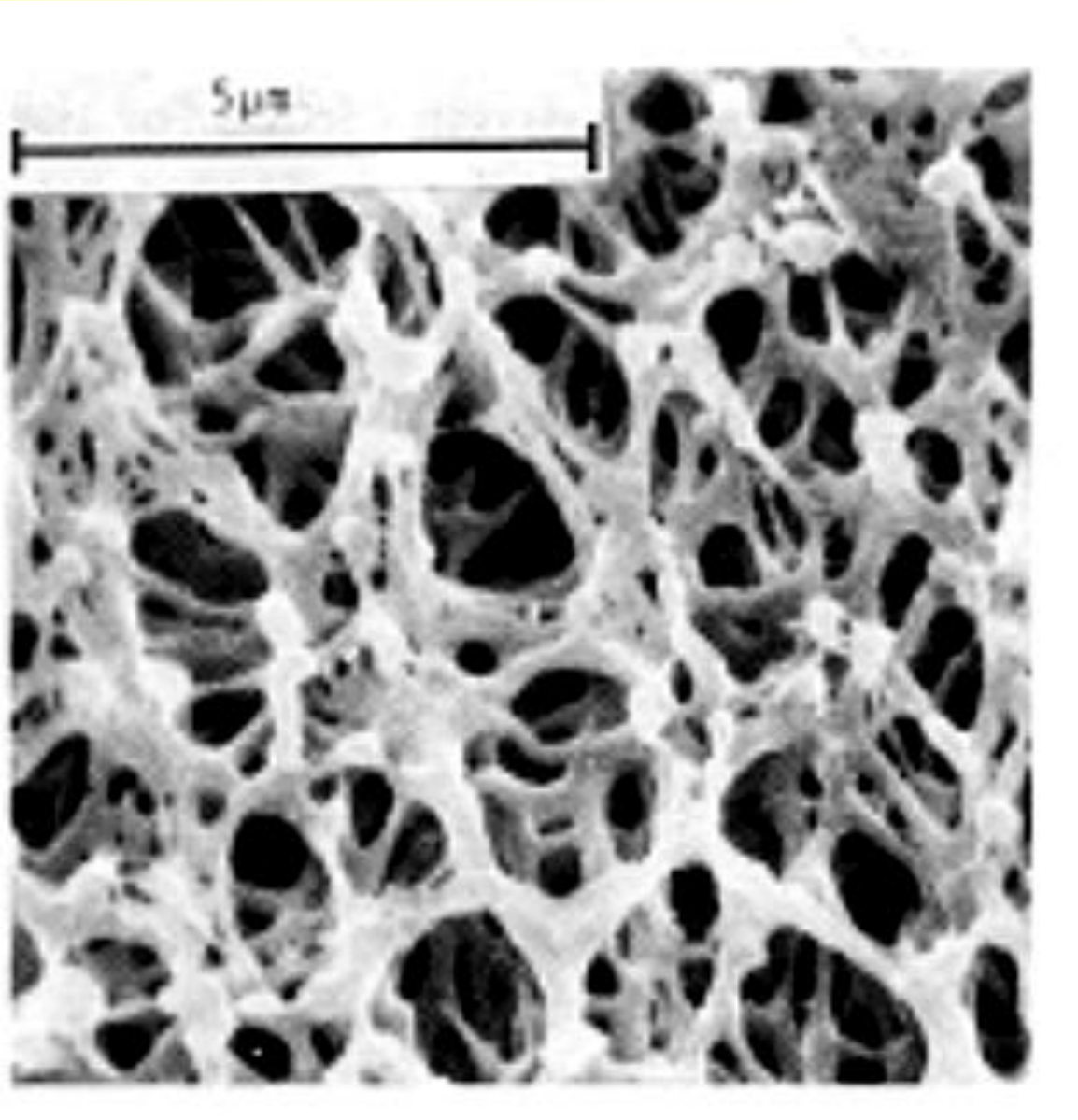
Algumas imagens típicas de estrutura de membranas obtidas com o uso de MEV:

Micrografia 4

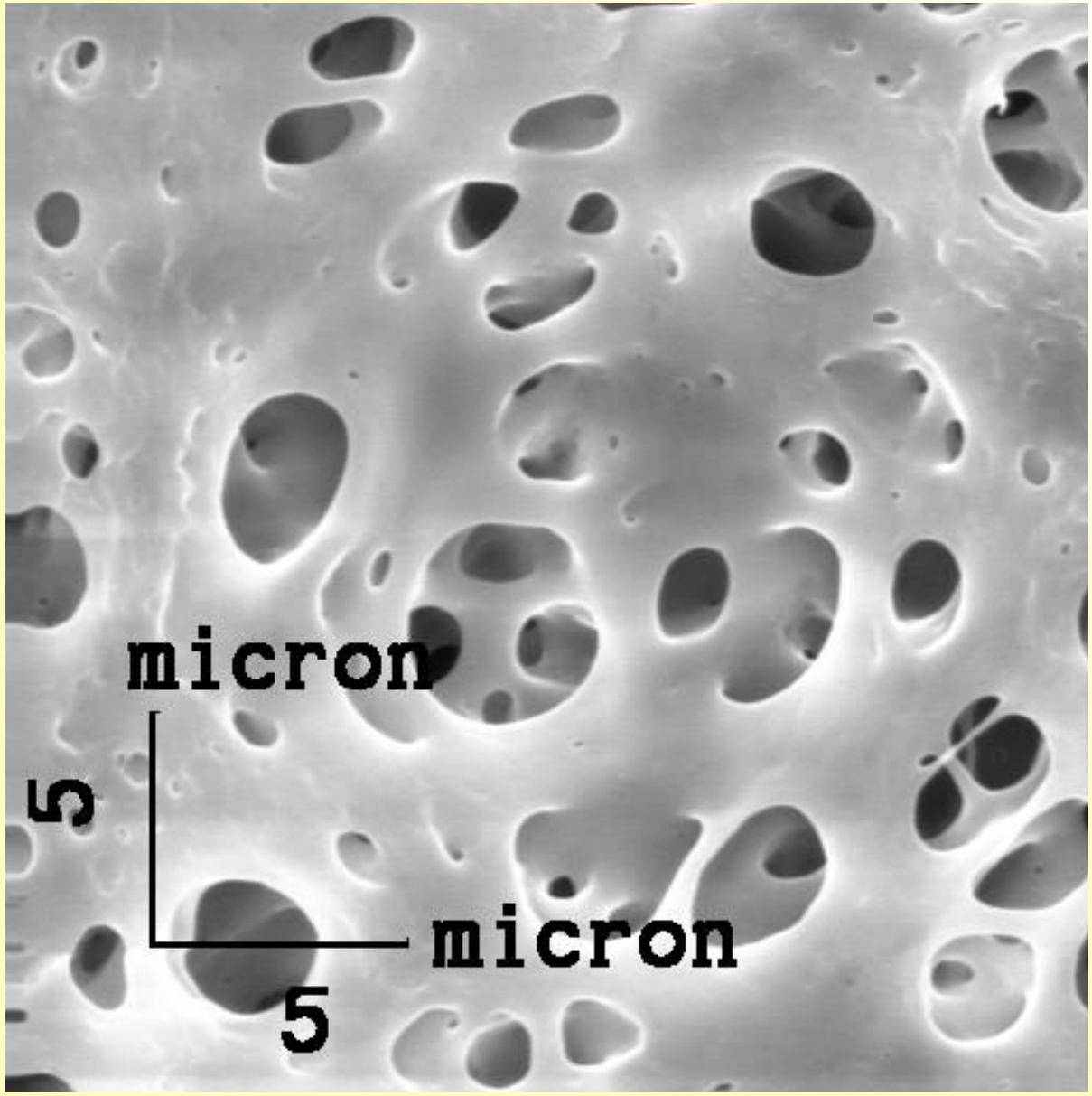
Material: Nitrato de celulose

Estrutura: isotrópica

Posição: superfície



Algumas fotos típicas de estrutura de membranas obtidas com o uso de MEV:



Micrografia 5

Material: Polieterimida

Estrutura: anisotrópica

Posição: superfície

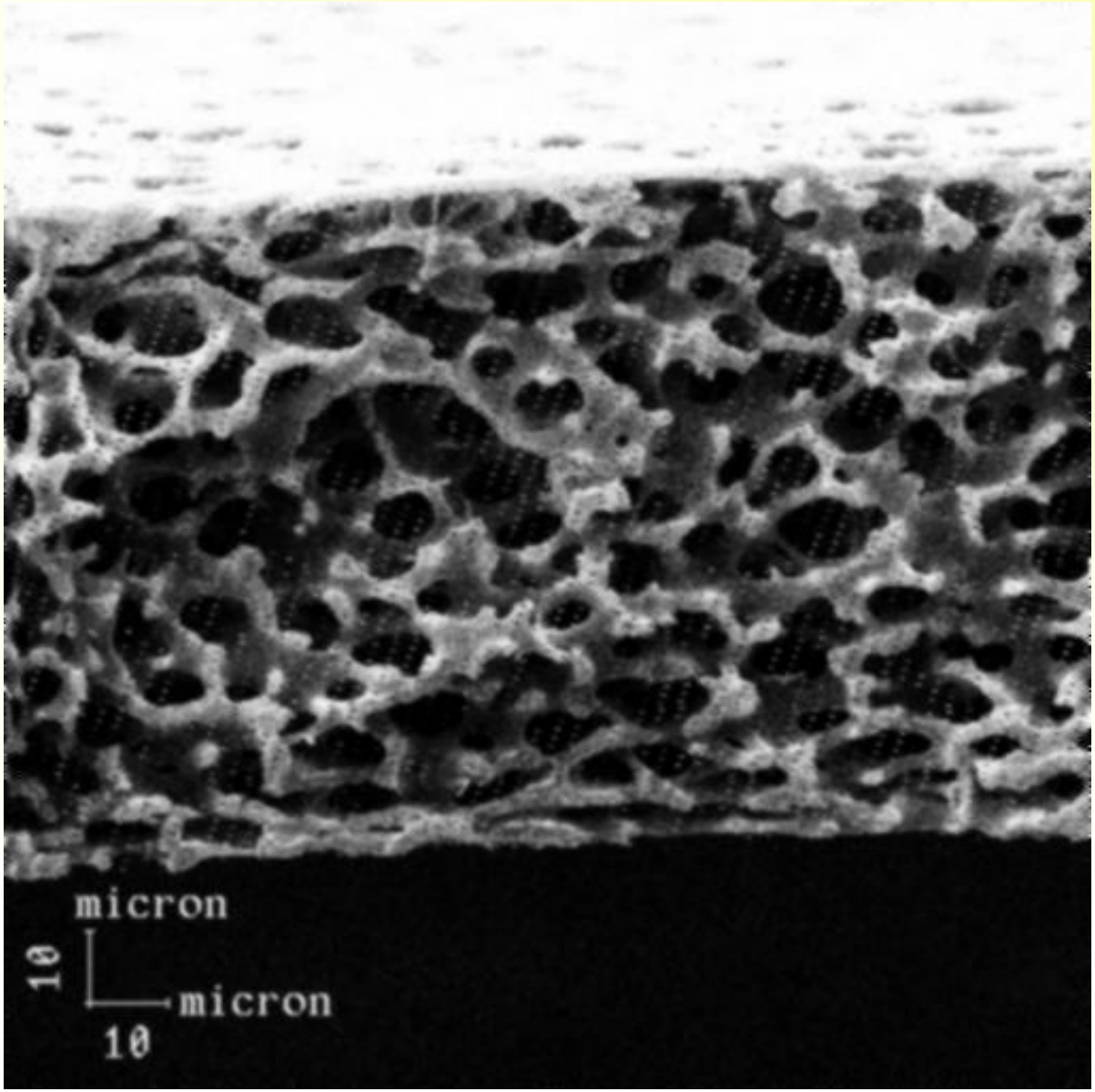
Algumas fotos típicas de estrutura de membranas obtidas com o uso de MEV:

Micrografia 6

Material: Acetato de celulose

Estrutura: isotrópica

Posição: seção transversal



Teste do Ponto de Bolha

Um dos testes mais simples na análise da integridade de membranas.

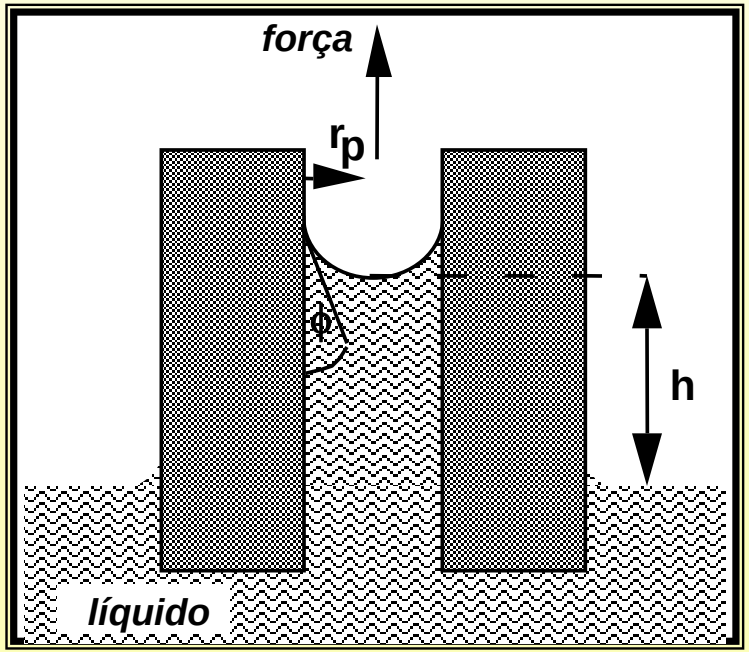
Permite determinar o poro de maior tamanho de uma dada membrana.

Princípios:

"Consiste na medida da pressão necessária para fazer escoar ar através de uma membrana cujos poros se encontram cheios de um dado líquido"

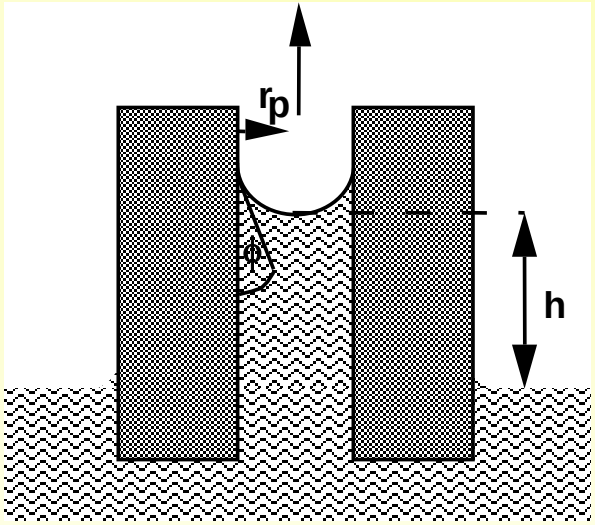
-É um método baseado no efeito de capilaridade em poros pequenos devido a forças oriundas da tensão superficial.

- No equilíbrio estas forças são balanceadas com a gravidade do líquido no poro.



Este equilíbrio entre as forças de tensão superficial e a gravidade do líquido no poro pode ser expressa pela seguinte equação:

$$2\ \pi\ r_p \sigma\ \cos\phi\ =\ r_p^2 \pi\ h\ \rho\ g$$



Onde:

r_p = *raio do poro*

σ = *tensão superficial*

ϕ = *ângulo de contato entre o líquido e a parede do poro*

h = altura da coluna de líquido

ρ = **densidade do líquido**

g = aceleração da gravidade

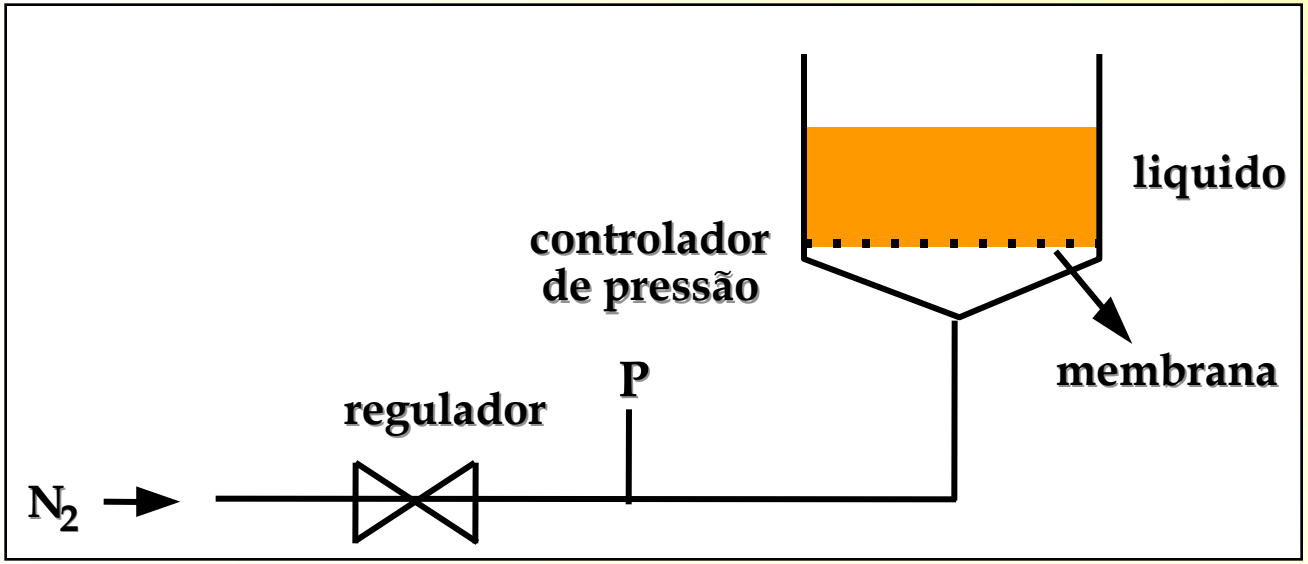
Como:

h ρ g pode ser expresso em pressão (ΔP), a equação acima pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$r_p = \frac{2\ \sigma\ \cos\phi}{\Delta P}$$

Equação de Laplace

Esquema do Equipamento para medidas do Ponto de Bolha

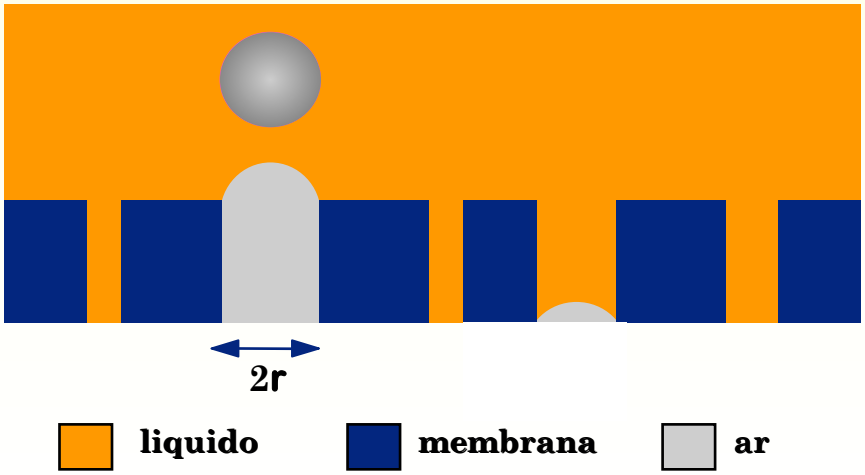


A medida que a pressão aumenta lentamente, bolhas de ar começam a penetrar nos poros da membrana (ver ao lado).

Apenas o maior poro ativo é medido.

Líquidos normalmente usados:

- água
- álcoois
- hidrocarbonetos fluorados



Porosimetria de Mercúrio

Ocorre a exposição uma membrana previamente seca a um certo volume de mercúrio líquido.

Princípios:

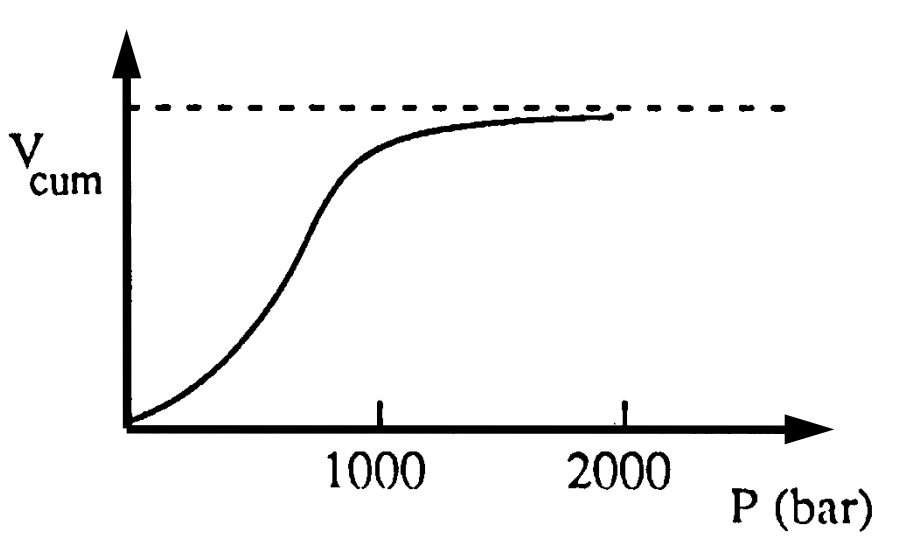
"Consiste nas medidas do volume de mercúrio líquido que penetra nos poros da membrana em função da pressão aplicada"

-O método baseia-se na equação de Laplace modificada:

$$r_p = -\frac{2\ \sigma\ \cos\phi}{\Delta P}$$

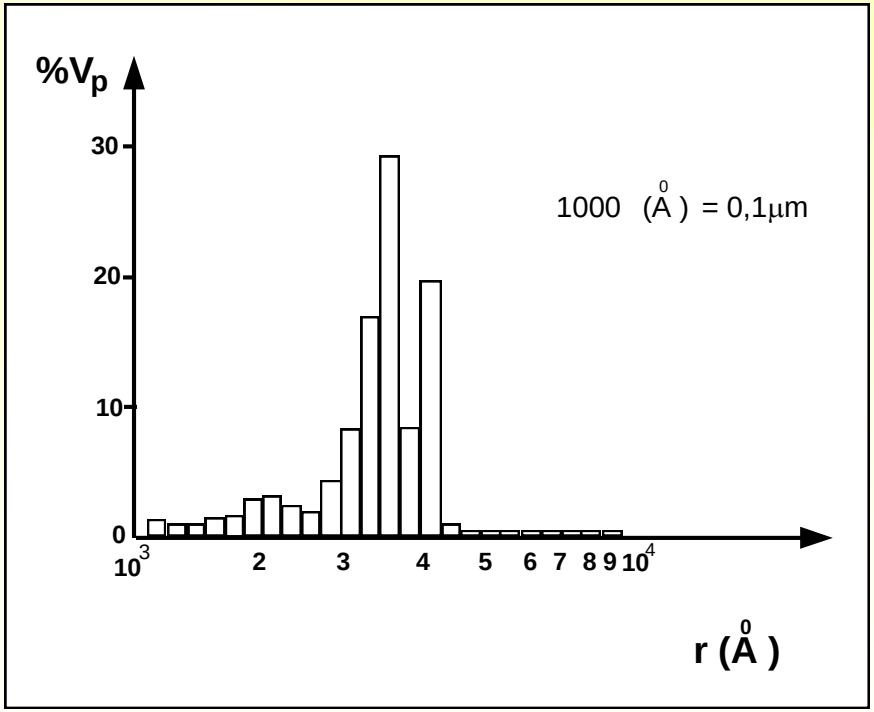
O sinal negativo da equação é devido ao elevado ângulo de contato entre mercúrio-polímero (>90°), assim cosθ é negativo.

Considerando que o volume de mercúrio pode ser medido com precisão, o método permite a determinação precisa da distribuição de tamanho de poros em membranas.



Curva típica de porosimetria de mercúrio
Volume acumulado em função da P

Histograma da distribuição de poros de uma membrana microporosa



limitações:

- determinação de poros muito pequenos são de difícil determinação (pressão elevada pode deformar a membrana).

- o método só deve ser aplicado para membranas isotrópicas.

- o método não exclui os poros não passantes.

Permeação Gás-Líquido

Método semelhante ao Ponto de Bolha porém permite determinar a distribuição de tamanho de poros.

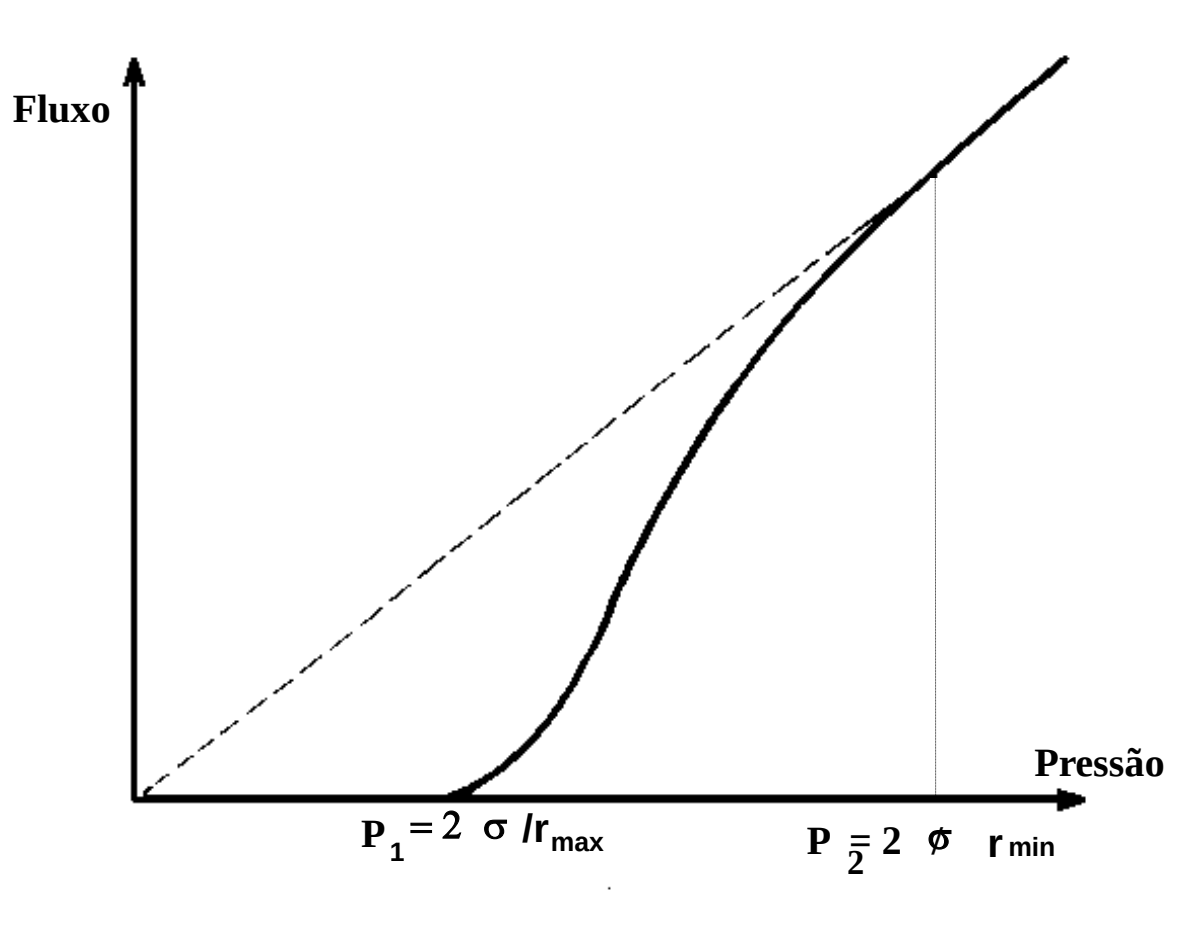
Princípios:

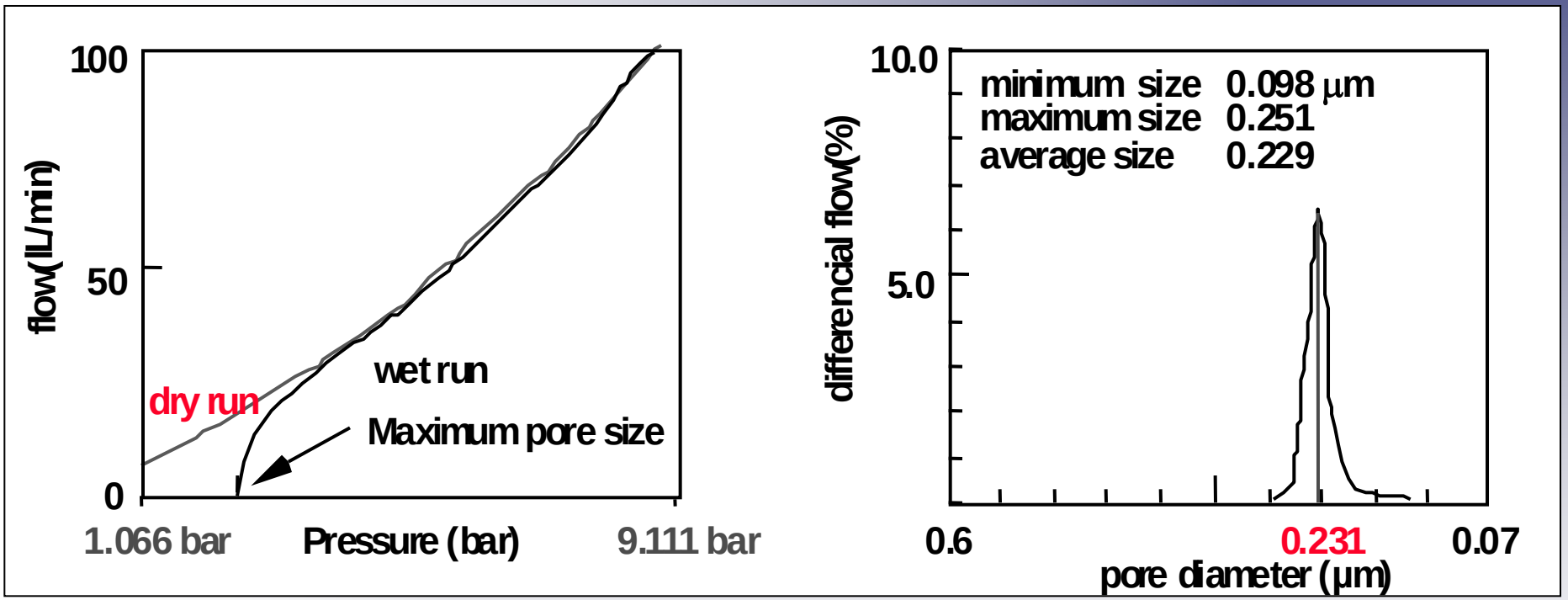
" Com o aumento da pressão, os poros menores vão progressivamente ficando permeáveis e, portanto, contribuindo para o fluxo permeado total. Quando um aumento de pressão não provocar um aumento da permeabilidade, admite-se que todos os poros estão livres"

Obs.:

- **Os poros da membranas geralmente são preenchidos com um solvente orgânico de tensão superficial menor que da água.**
- **O gás utilizado é o nitrogênio.**
- **O fluxo de gás é medido em função da pressão aplicada.**
- **A partir da equação de Laplace e considerando a proporcionalidade entre o fluxo permeado e a pressão aplicada, é possível determinar os poros máximo e mínimo e a distribuição do tamanho de poros.**

Fluxos gasosos típicos obtidos em função da pressão aplicada. A linha pontilhada representa o fluxo que seria obtido caso a membrana estive seca.





Determinação da distribuição de tamanhos de poros de uma membrana Nuclepore tendo como diâmetro de poro nominal de 0,2µm conforme fabricante.