

PHA 3418 – TECNOLOGIA DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

Aula 6 – Mecanismos de Transporte e Fatores Relacionados ao Desempenho dos Sistemas



Prof.: José Carlos Mierzwa
mierzwa@usp.br

Introdução

- Vários modelos matemáticos procuram descrever os mecanismos de transporte através das membranas;
- Para compreensão desses modelos é necessário conhecer alguns aspectos básicos sobre o escoamento de fluídos;
- Quando um fluído escoia próximo a uma superfície ocorre a formação da camada limite;
- O atrito entre as paredes e o líquido resulta no atraso das moléculas junto à parede e acelera aquelas mais afastadas.

Perfil longitudinal de velocidade



**Formação da Camada Limite de
Velocidade**

Conceitos básicos sobre escoamento (cont.)

- A linha que separa a região de baixa velocidade da região de velocidade uniforme é conhecida como camada limite;
- No escoamento laminar a distância para desenvolvimento completo do perfil de velocidades é dado pela seguinte relação:

$$L_v = B \cdot d_h \cdot Re$$

Re = N° de Reynolds;

B = Constante que varia de 0,03 a 0,05;

d_h = Diâmetro hidráulico;

L_v = Distância necessária para desenvolvimento do perfil de velocidade

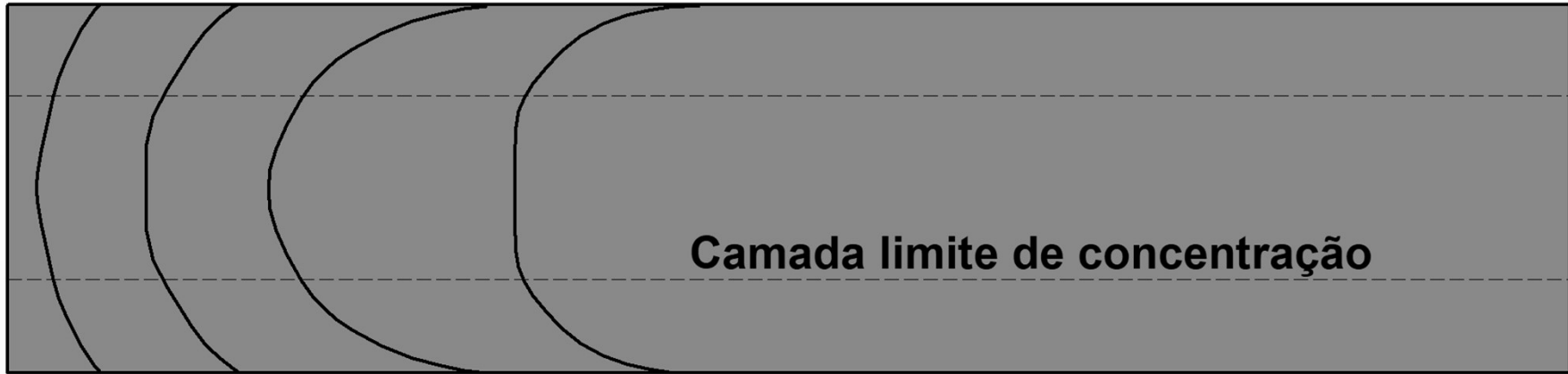
Conceitos básicos sobre escoamento (cont.)

- Para escoamento turbulento o perfil de velocidade é desenvolvido muito rapidamente, próximo à entrada;
- As relações entre velocidade média de escoamento e velocidade máxima atingida são:
 - *Regime laminar:*
 - $V_{\max} = 2 \cdot V_{\text{média}}$
 - *Regime turbulento:*
 - $V_{\max} = V_{\text{média}} / (0,662 + 0,336 \log Re)$

Conceitos básicos sobre escoamento (cont.)

- A camada limite de velocidade dá origem ao conceito de camada limite de concentração;
- Nas membranas porosas (MF e UF), os sólidos são transportados até a superfície pelo mecanismo de convecção;
- Como uma parcela do solvente atravessa a membrana, haverá um aumento na concentração junto à superfície.

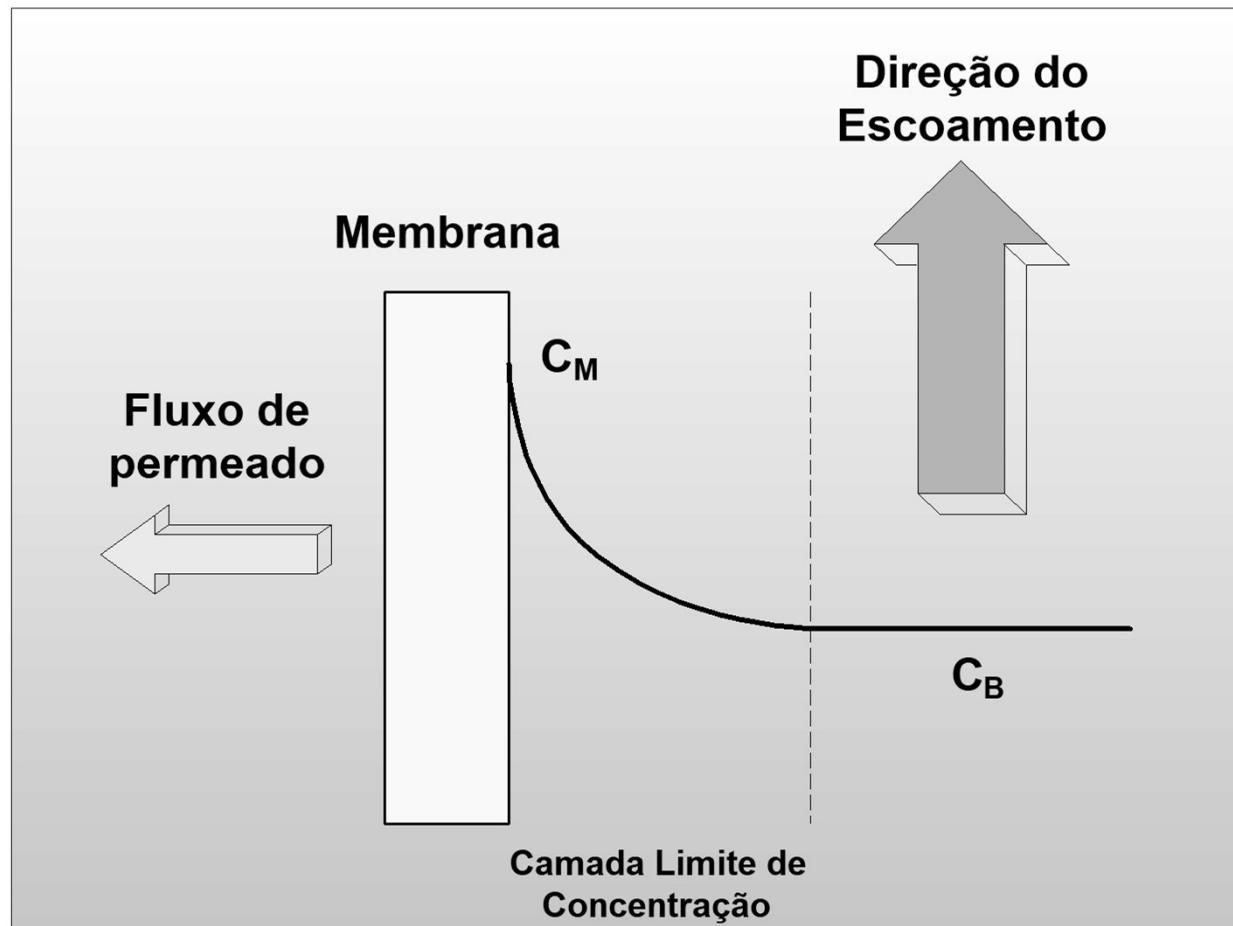
Perfil longitudinal de velocidade



**Formação da Camada Limite de
Concentração**

Conceitos básicos sobre escoamento (cont.)

- Esse aumento na concentração de sólidos é conhecido como Polarização de Concentração;
- A polarização de concentrações é responsável pela redução do fluxo através da membrana;
- Similar ao que ocorre com a camada limite de velocidade, será desenvolvida uma camada limite de concentração.



Perfil de Concentração durante o processamento por membrana para solutos parcialmente ou completamente rejeitados

Conceitos básicos sobre escoamento (cont.)

- A camada limite de concentração será mais fina que a de velocidade;
- A distância necessária para o desenvolvimento da camada limite de concentração é superior à necessária para formação da camada limite de velocidade;

$$L_c = \frac{0,1 \cdot \gamma_w \cdot d_h^3}{D}$$

γ_w = taxa de cisalhamento na parede da membrana

D = coeficiente de difusão do soluto;

d_h = diâmetro hidráulico;

L_c = distância para formação da camada limite de concentração.

Conceitos básicos sobre escoamento (cont.)

- O escoamento de fluido fora da camada limite influencia a transferência de soluto da superfície da membrana para a solução;
- Isto mantém a camada limite de concentração com pequena espessura;
- Estes conceitos formam a base da teoria para descrever os mecanismos de transporte através das membranas.

Modelos para previsão do fluxo através das membranas

- Basicamente podem ser utilizados quatro modelos para prever o fluxo de solvente através das membranas:
 - Modelo para a região controlada pela pressão;
 - Modelo de transferência de massa (Teoria de Filme);
 - Modelo de resistências em série;
 - Modelo de pressão osmótica para o fluxo limitante (baseado na Teoria de Filme);

Modelos para previsão do fluxo através das membranas

- Modelagem do fluxo em função dos parâmetros operacionais e propriedades físicas da solução não é satisfatória.
- Problema relacionado com a dificuldade de modelar os fenômenos que ocorrem próximos à superfície.

Modelo para a região controlada pela pressão

- Em uma situação ideal, sem ocorrência de depósitos e com o efeito de polarização de concentração desprezível, pode-se utilizar a seguinte relação:

$$J = \frac{\varepsilon \cdot d^2 \cdot \Delta P}{32 \cdot \mu \cdot \Delta x}$$

J = fluxo através da membrana (m/s);

ε = Porosidade da membrana

d = diâmetro dos poros (m);

ΔP = Pressão efetiva (Pa);

Δx = espessura equivalente membrana (m);

μ = viscosidade dinâmica (Pa.s);

ε = porosidade da membrana

Modelo para a região controlada pela pressão (cont.)

- No modelo apresentado devem ser válidas as seguintes condições:
 - Escoamento laminar através dos poros;
 - A densidade do fluido é constante;
 - Regime permanente;
 - Outros efeitos são desprezíveis.
- Qualquer desvio destas condições pode tornar o fluxo menos dependente da pressão aplicada, sendo necessário utilizar outros modelos.

Modelo de Resistências em série

- Nenhum dos modelos apresentados descreve o comportamento dos sistemas de MF e UF;
- Para estes casos a melhor abordagem é utilizar os Modelo de Resistências em Série;
- Em um sistema ideal pode-se utilizar a seguinte expressão:
 - $J = A \cdot P_T / \mu$, onde A é a permeabilidade da membrana;

Modelo de Resistências (cont.)

- Com base nestas condições, o fluxo através da membrana será dado pela seguintes relação:

$$J = \frac{P_T}{R_M + R_d + R_G}$$

- Como a resistência devido à depósitos resulta de interações físico-químicas, assume-se que ela não é afetada pelos parâmetros operacionais;

Modelo de Resistências (cont.)

- Assim, para um determinado tipo de alimentação a resistência causada pelo depósito pode ser incorporada na resistência da membrana:

$$J = \frac{P_T}{R'_M + R_G}$$

- R_G é função da permeabilidade da camada de gel e de sua espessura, que são função da pressão aplicada.

Efeito da pressão no desempenho dos processos de separação por membranas

- A pressão de operação afeta diretamente a taxa de recuperação de água;
- Contudo, o efeito do aumento de pressão sobre o fluxo de água é variável;
- Para sistemas de OR a relação entre pressão e fluxo é praticamente linear;

Modelo de Resistências (cont.)

$$R_G = \phi \cdot P_T$$

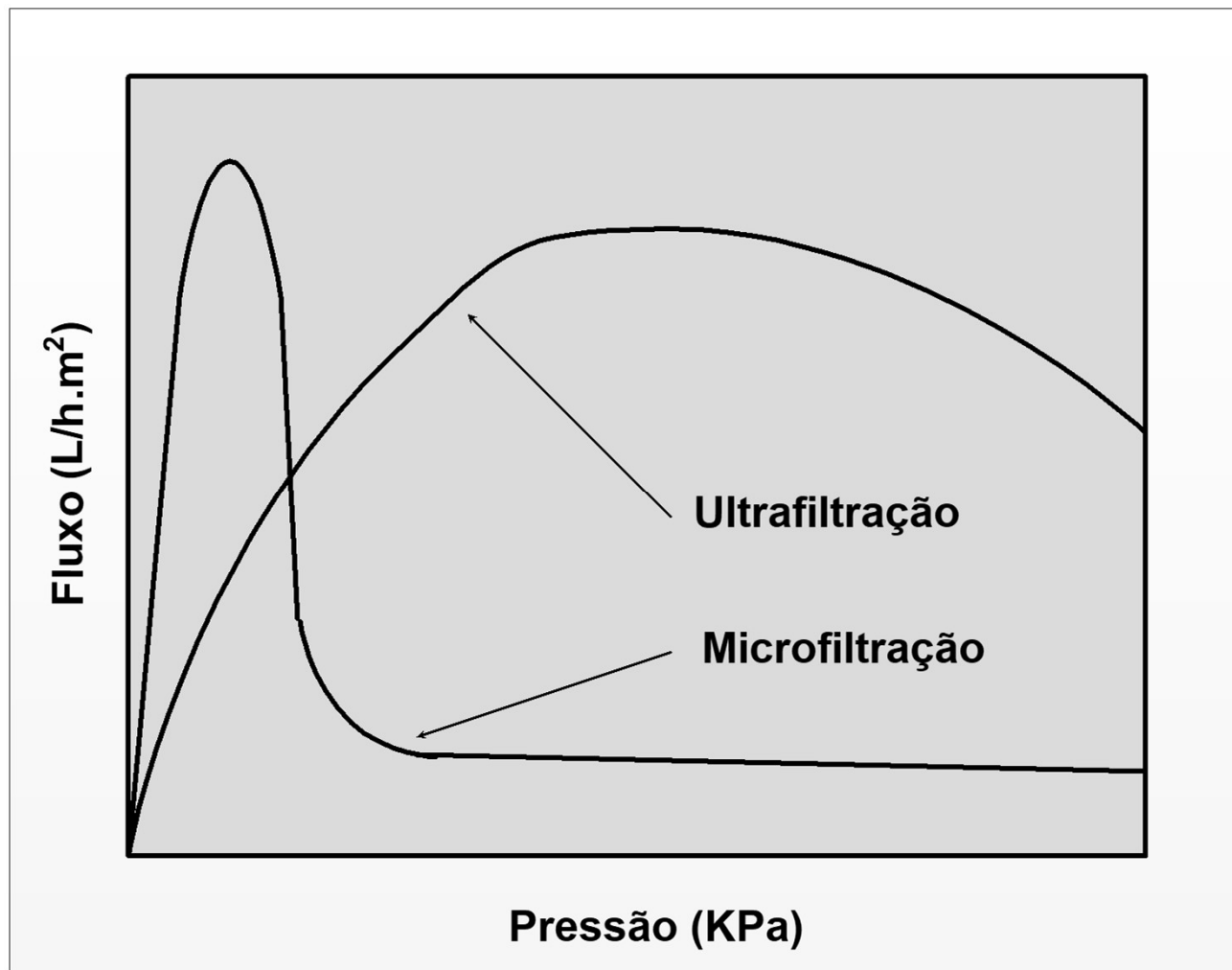
- Associando-se as expressões apresentadas tem-se:

$$J = \frac{P_T}{R'_M + \phi \cdot P_T}$$

- Este modelo se adequa, conceitualmente, aos dados típicos de fluxo de permeado em função da pressão.

Modelo de Resistências (cont.)

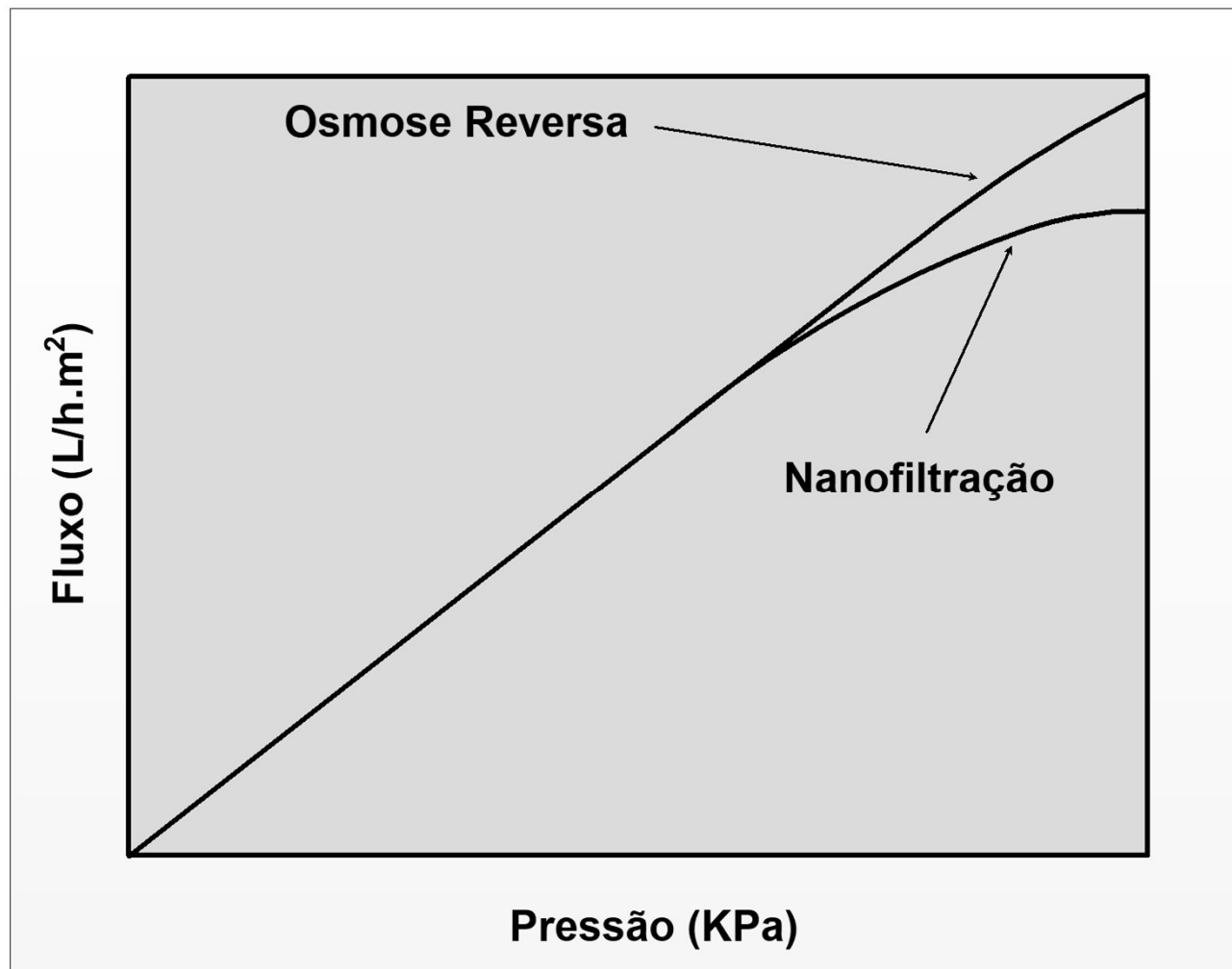
- O termo ϕ será função das variáveis que afetam a transferência de massa:
 - Viscosidade, velocidade de escoamento ou taxa de cisalhamento e temperatura;
- A pressão ótima para operar sistemas que se enquadram neste modelo deve ser obtida experimentalmente;
- Conceito de pressão crítica e fluxo crítico.



Efeito da pressão de operação no desempenho de membranas com baixa resistência à passagem de água

Pressão de operação do sistema (cont.)

- A capacidade de sistemas de UF e MF depende mais das características da alimentação do que da própria membrana;
- À medida que a pressão de operação aumenta:
 - A camada de polarização atinge uma concentração limite;
 - O fluxo de permeado se torna independente da pressão;



Efeito da pressão de operação no desempenho de membranas com alta resistência à passagem de água

Pressão de operação do sistema

- A pressão de operação afeta diretamente a taxa de recuperação de água;
- Contudo, o efeito do aumento de pressão sobre o fluxo de água é variável;
- Para sistemas de OR a relação entre pressão e fluxo é praticamente linear;

Material das membranas

- O material das membranas exerce grande influência sobre a capacidade de separação;
- A natureza química da membrana afeta as interações com o soluto;
- Membranas hidrofóbicas apresentam maior tendência à depósitos:
 - Interação entre o soluto e a membrana;
 - Diminuição da capacidade de produção;

Material das membranas (cont.)

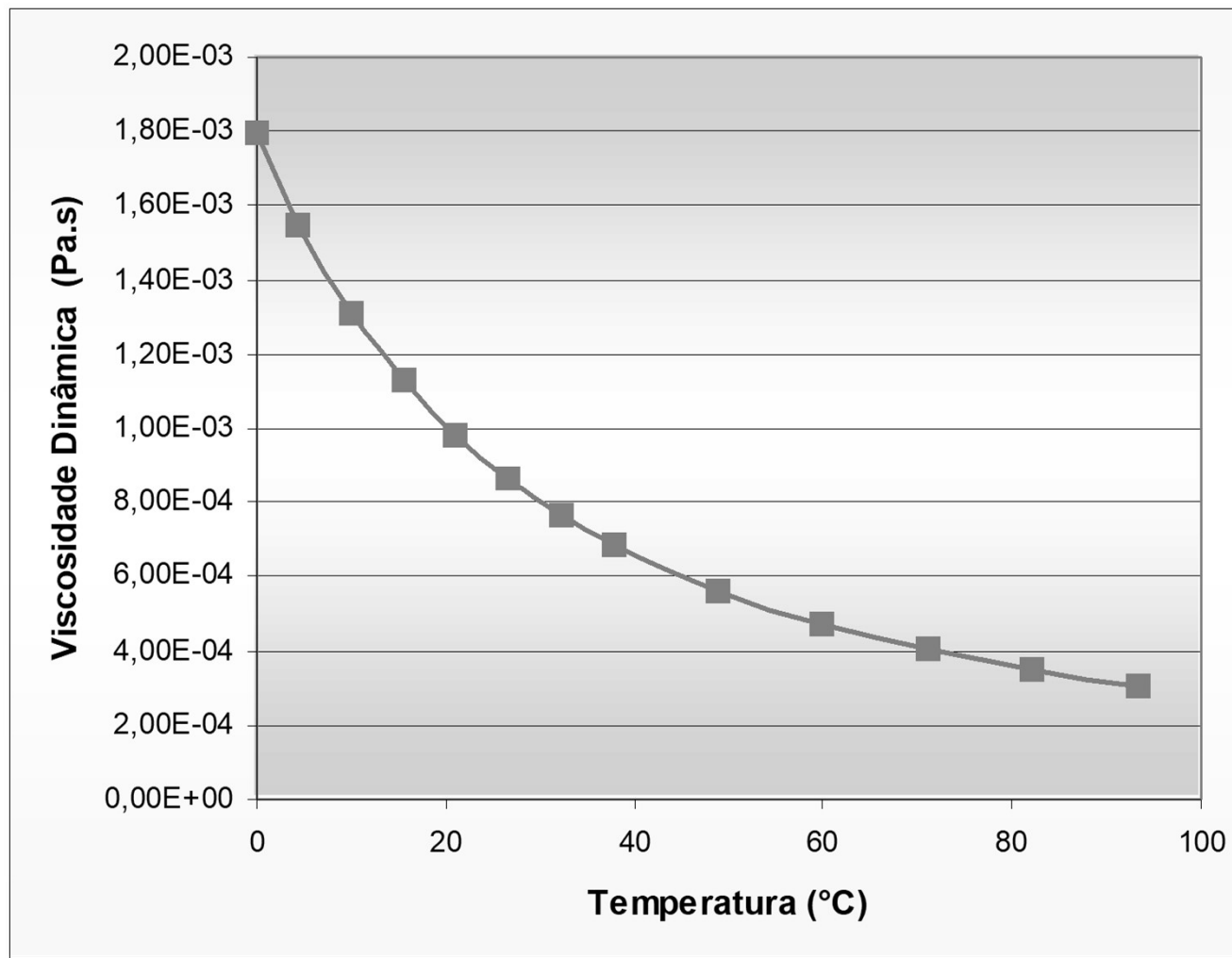
- Nas membranas de MF, UF, NF e OR, a presença de cargas elétricas influencia a capacidade de separação;
- A maioria das membranas apresenta carga elétrica líquida negativa;
- Estas membranas apresentam melhor desempenho para separação de contaminantes com a mesma carga.

Taxa de recuperação de água

- Problemas em se trabalhar com altas taxas de recuperação:
 - Maior potencial para redução do fluxo de permeado;
 - Degradação da qualidade do permeado;
- Agravamento do efeito de polarização de concentrações e aumento na passagem de contaminantes.

Temperatura

- Nos processos de MF, UF, NF e OR a temperatura tem efeito direto sobre o fluxo de permeado;
- Isto acontece porque o fluxo depende da viscosidade do fluído, a qual varia com a temperatura;



Variação da viscosidade da água com a temperatura

Temperatura (cont.)

- Dados disponíveis mostram que ocorre uma variação de 3,3% no fluxo através das membranas por °C de variação de temperatura;
- Esta condição só é válida para poucos produtos;
- Fenômenos químicos e bacteriológicos acabam limitando o fluxo através das membranas;

Temperatura (cont.)

- Para sistemas de NF e OR o aumento de temperatura também resulta no aumento da passagem de sais;
- Do ponto de vista químico, a temperatura influencia na solubilidade dos contaminantes presentes;
- Para algumas substâncias há uma redução na solubilidade, podendo ocorrer a precipitação de sais ou proteínas.

Temperatura (cont.)

- O aumento do fluxo com a temperatura pode ser estimado pelas seguintes relações:
 - Abaixo de 25°C:
 - Fator = $(1 + CT/100)^{(T - T_0)}$
 - Acima de 25°C:
 - Fator = $(1 + CT/100) \cdot (T - T_0)$
 - CT = coeficiente de temperatura (%/°C).

Valores de CT em função do fluido e do material da membrana

Fluído	Material	CT (%/°C)
Água	Filme fino	3,3
Água	PS e AC	2,7
Outro fluido	Todas	1,0