Separazione attraverso membrana

Corso di

Operazioni Unitarie della Tecnologia Alimentare

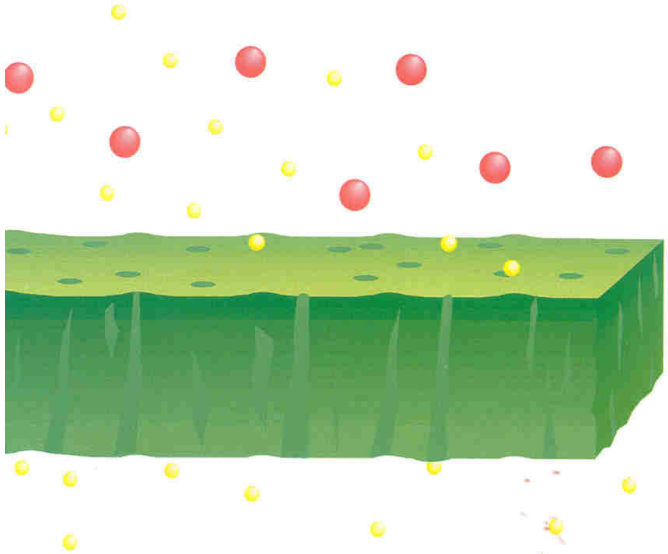
Scienze Tecnologie Alimentari – Facoltà Agraria

Università degli Studi di Parma

Prof. G. Mucchetti

Separazione attraverso membrana

Operazione unitaria caratterizzata dal trasporto selettivo dei componenti di una soluzione o una sospensione attraverso una membrana grazie all'azione di una forza "guida", la pressione, ed il cui risultato è una chiarificazione, una concentrazione o un frazionamento.



La pressione idraulica

La pressione è la forza guida dei processi di filtrazione tangenziale che consente il trasporto di materia attraverso la membrana

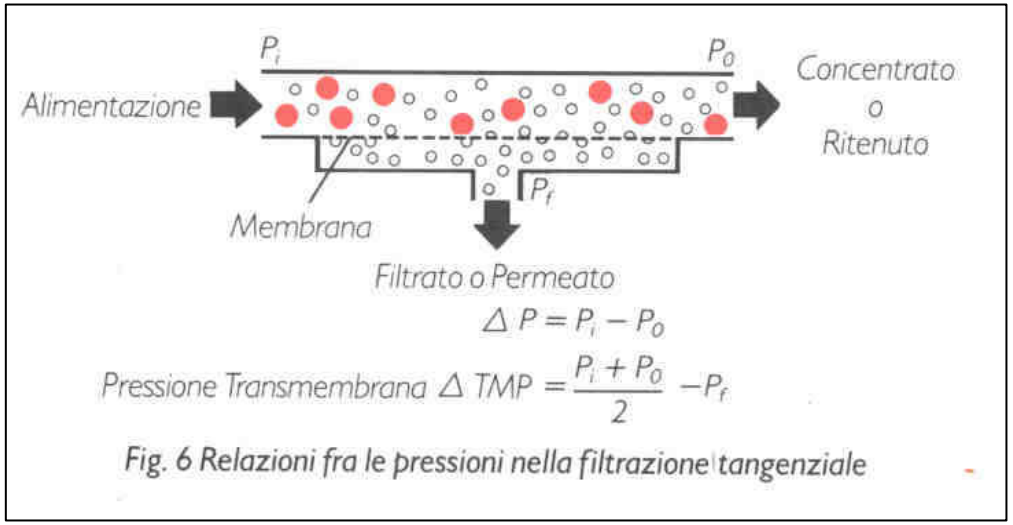


Fig. 6 Relazioni fra le pressioni nella filtrazione tangenziale

la pressione idraulica di alimentazione del sistema

Tra ingresso del liquido ed uscita del concentrato dall'unità filtrante si verifica una caduta di pressione che si indica come ΔP, o come Pin-Pout.

Il suo valore dipende dalla velocità di scorrimento del fluido e dal tipo di modulo filtrante

La pressione transmembrana

la differenza di pressione transmembrana (PTM)

Il liquido che scorre sotto pressione parallelamente alla membrana esercita a sua volta una pressione sulla membrana, detta pressione transmembrana. Tale pressione si applica perpendicolarmente alla membrana e determina il passaggio del permeato.

PTM non è uguale lungo tutta la membrana, perché varia la pressione idraulica e diminuisce linearmente.

$$PTM=(P_{in}+P_{out}/2)-P_{perm}$$

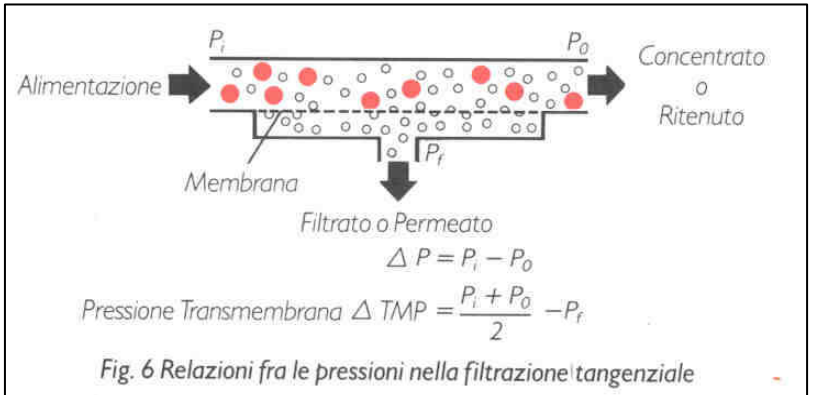


Fig. 6 Relazioni fra le pressioni nella filtrazione tangenziale

Confronto tra processi di membrana con altre tecniche di separazione

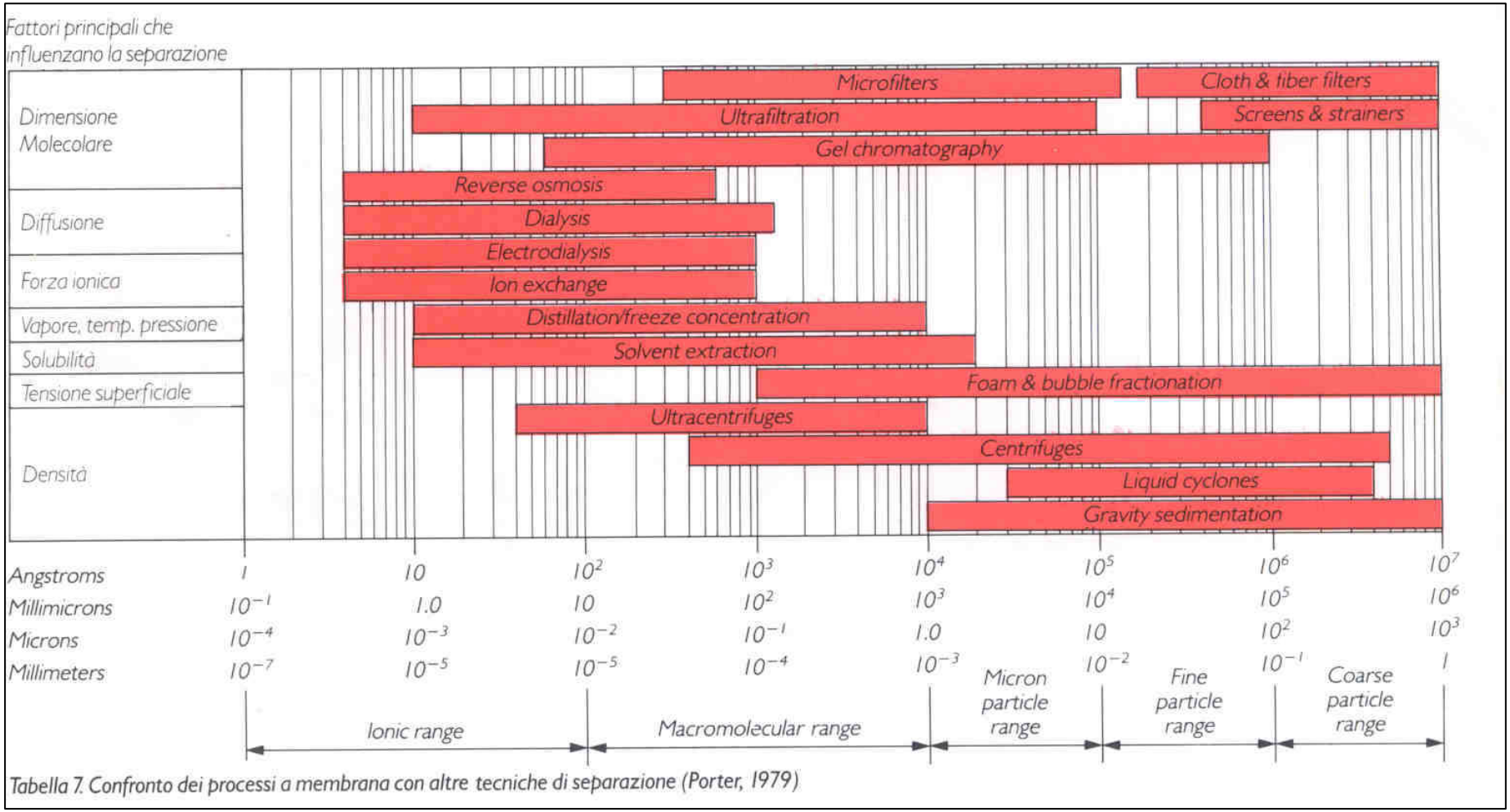
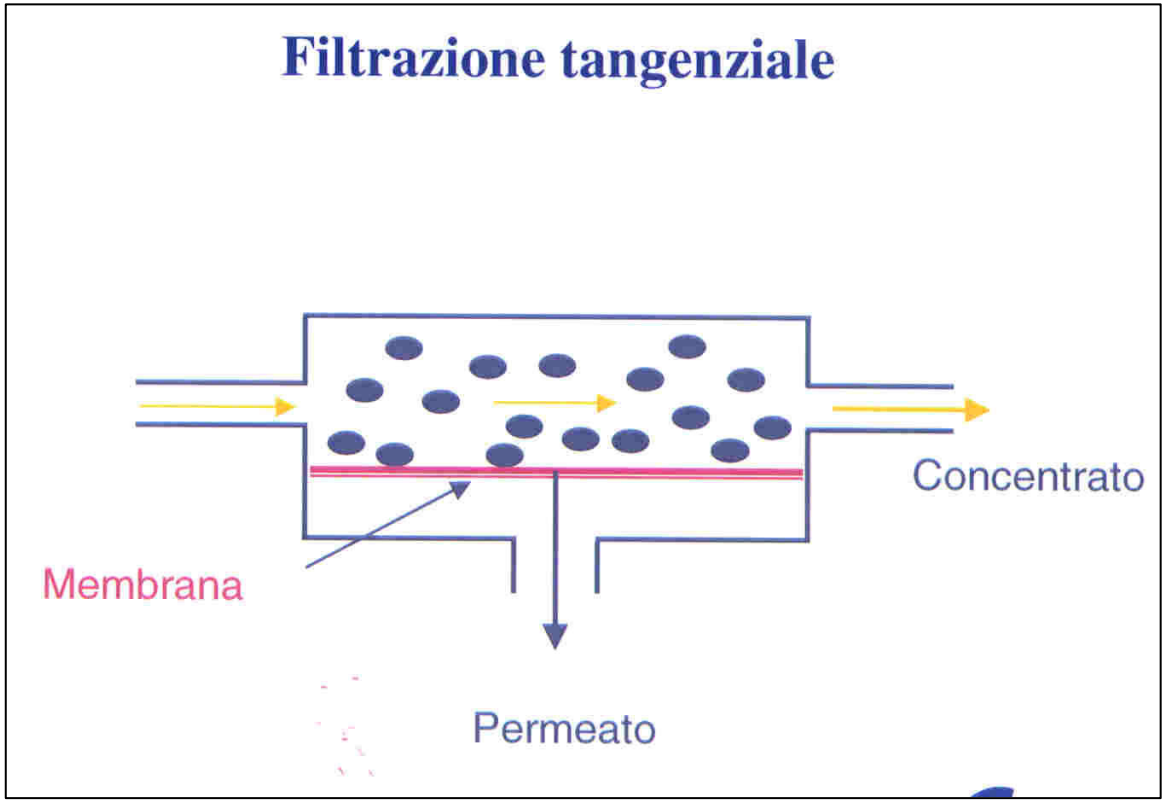


Tabella 7. Confronto dei processi a membrana con altre tecniche di separazione (Porter, 1979)

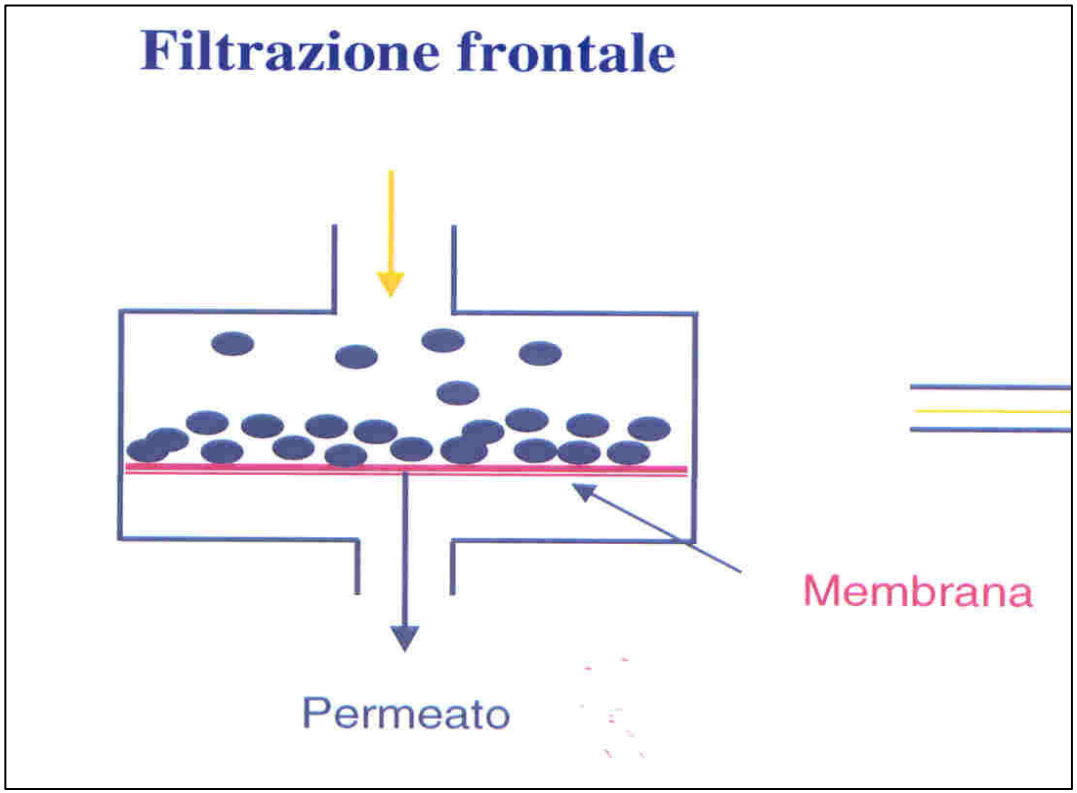
FILTRAZIONE TANGENZIALE

E' una tecnica di filtrazione nella quale il senso di scorrimento del fluido da filtrare è parallelo alla superficie della membrana.



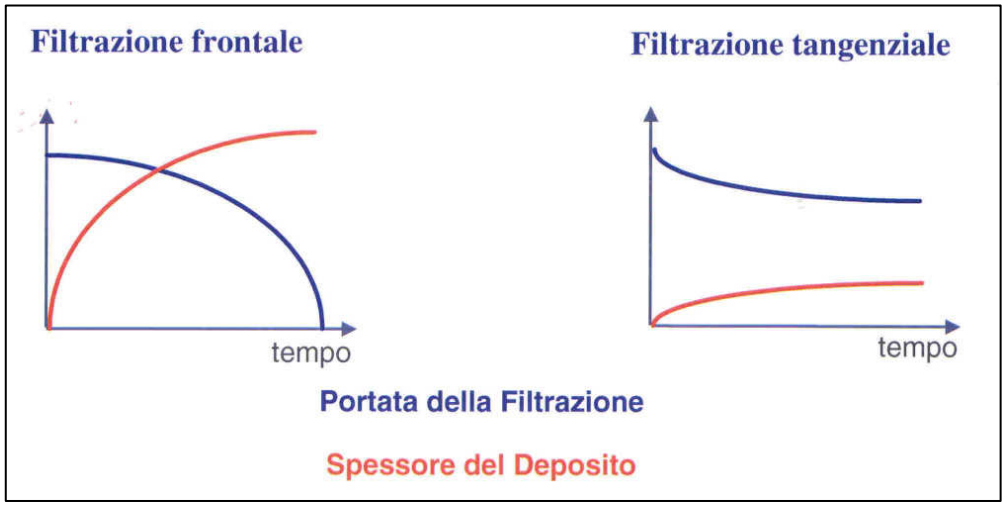
FILTRAZIONE FRONTALE

E' una tecnica di filtrazione nella quale il senso di scorrimento del fluido da filtrare è perpendicolare alla superficie della membrana.



Flusso tangenziale e deposito

il flusso tangenziale permette di **ridurre** la **colmatazione** della membrana, ovvero quel fenomeno di sporcamento della membrana per **accumulo** di molecole e/o particelle alla sua superficie o all'interno (**fouling**) che ne modifica le prestazioni



Processi di separazione attraverso membrana nel settore caseario

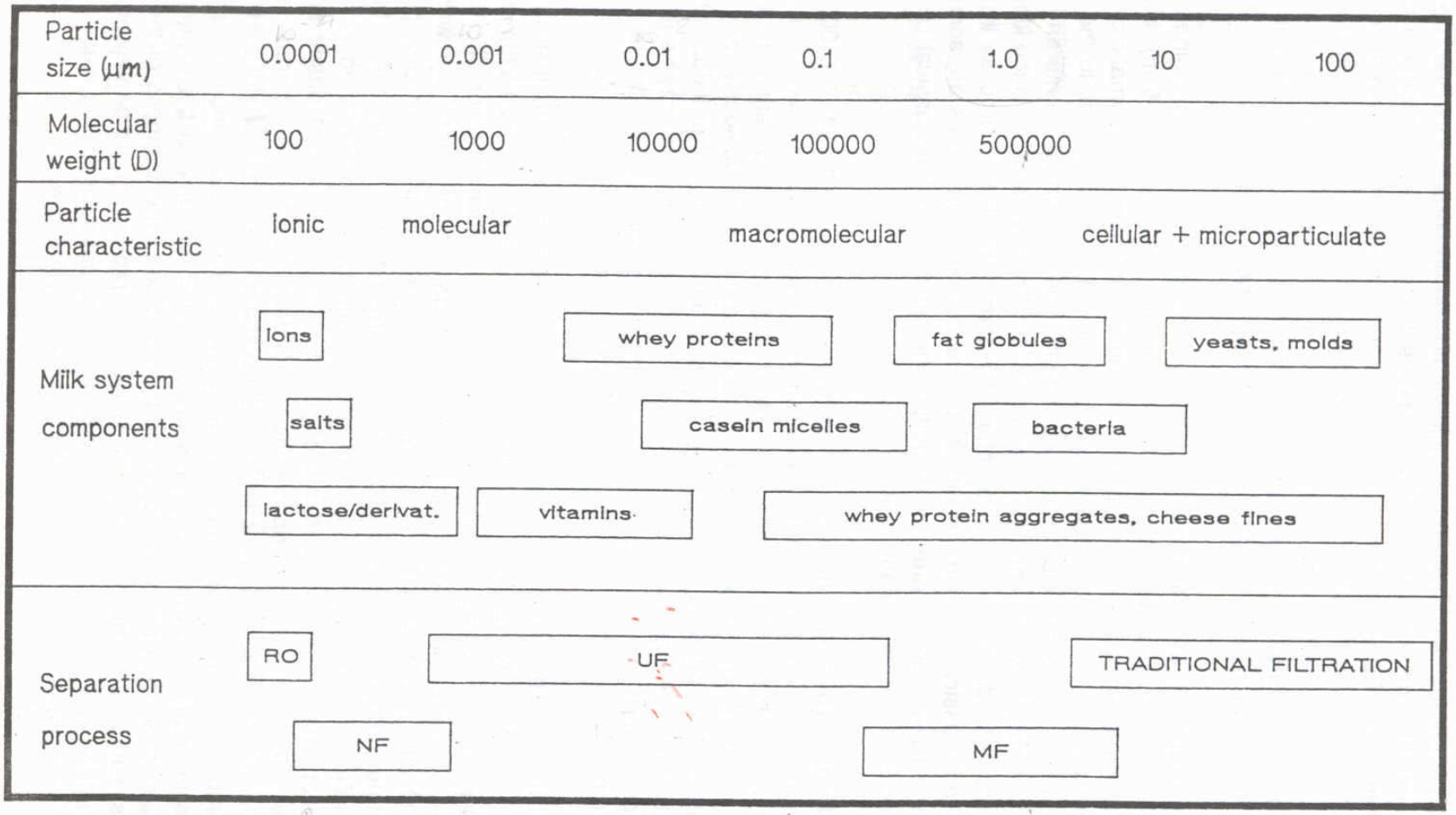
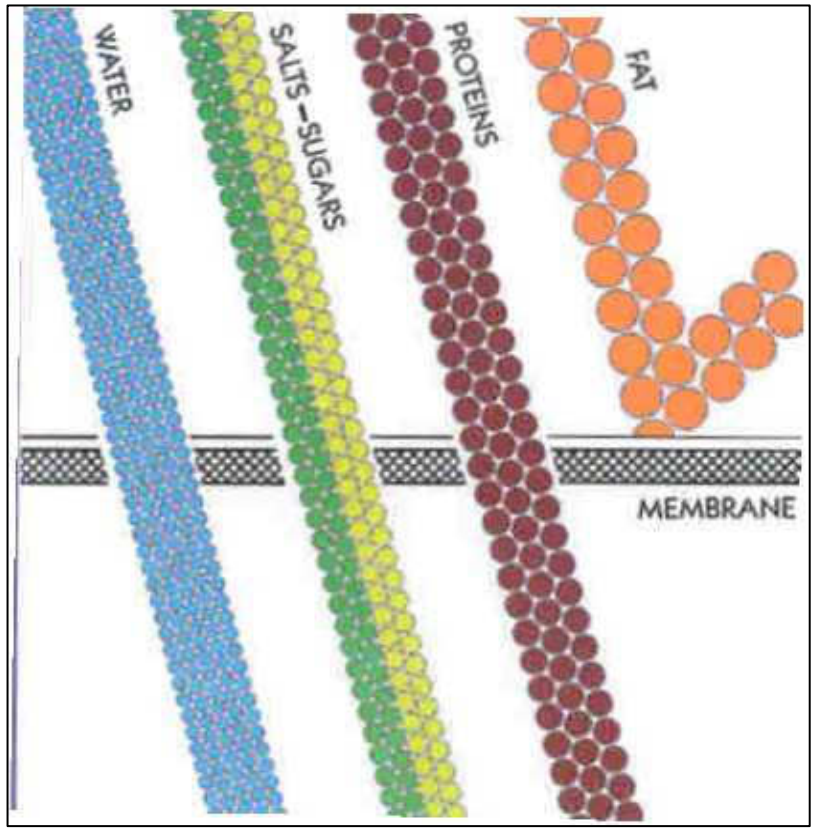


Figure 1.1: Spectrum of application of membrane separation processes in the dairy industry.

Microfiltrazione

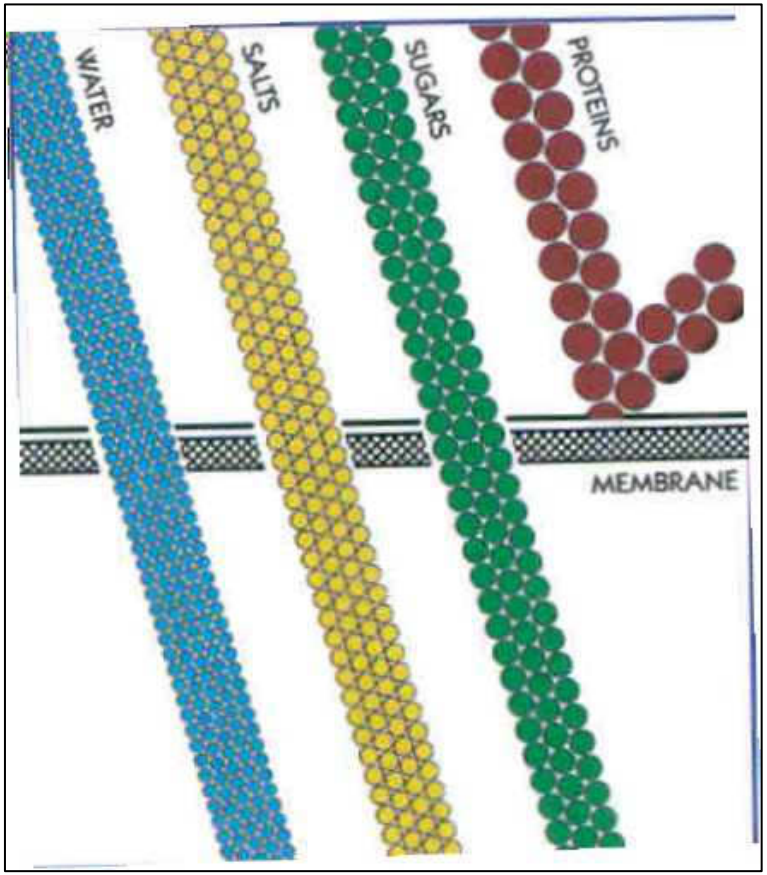
operazione di separazione condotta a bassa pressione (fino a 5 bar) in cui le particelle ritenute hanno dimensioni comprese tra 0,1 e 10 micrometri.

- **Applicazioni:**
  chiarificazione e deconta-minazione microbiologica di liquidi alimentari (latte, succhi di frutta, aceto, vino, birra) (1,4 micron)
- Concentrazione selettiva caseina (0,1-0,2 micron)



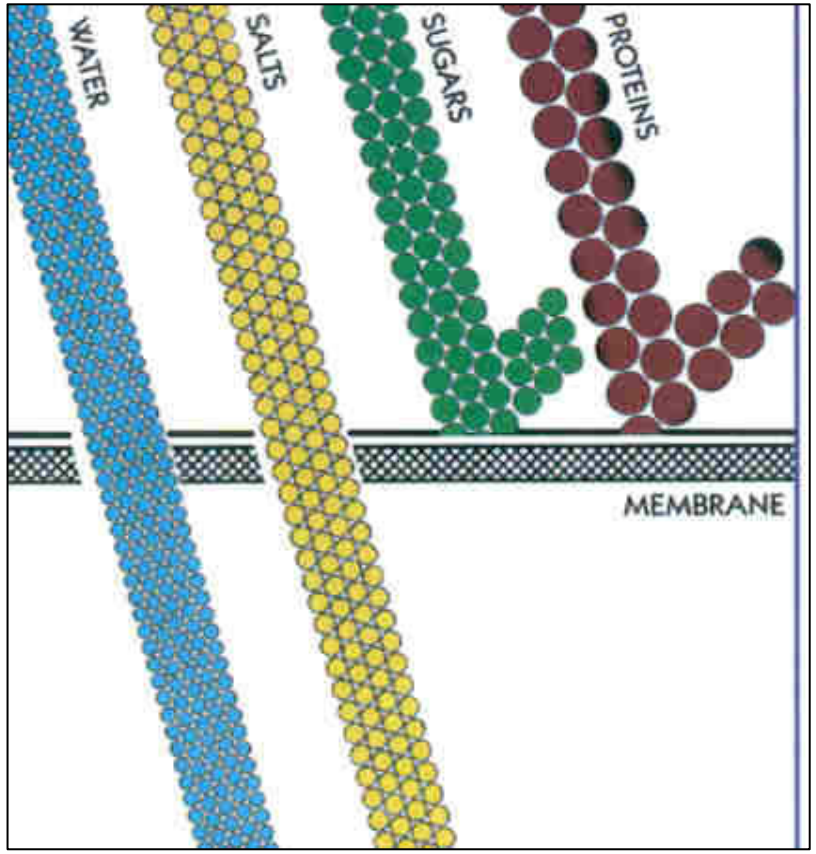
Ultrafiltrazione

- operazione di separazione condotta a pressione moderata (0,2-10 bar) in cui le particelle ritenute hanno dimensioni superiori a 1.000 daltons
- **Applicazioni**
- concentrazione di:
- proteine di latte, siero e soia, albume d'uovo, fecola di patate;
- chiarificazione di succhi di frutta e verdura, salamoie



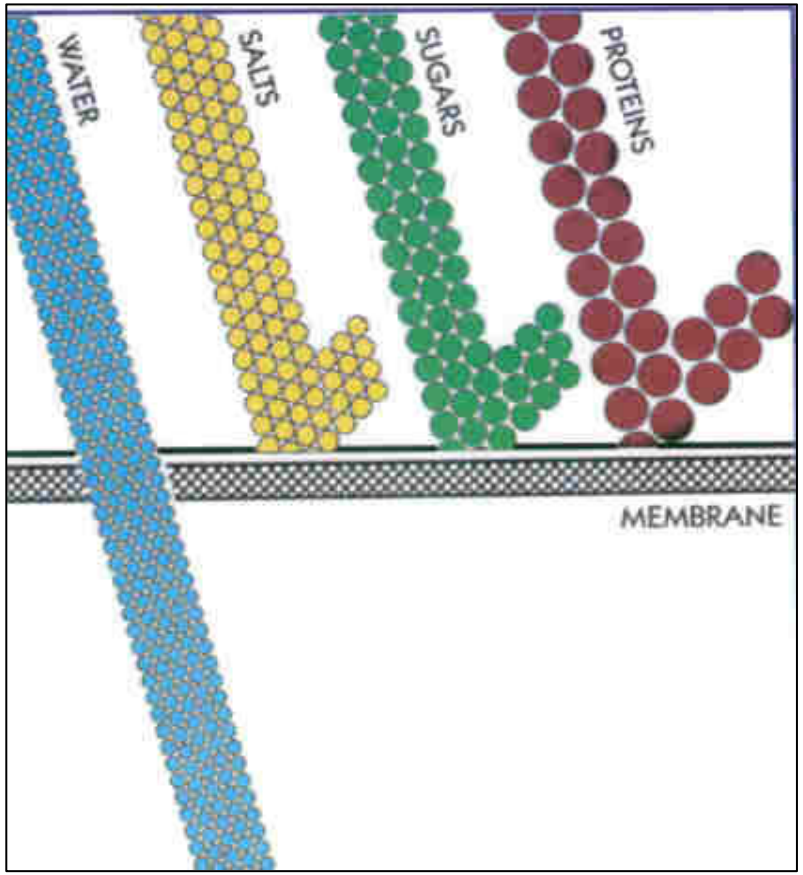
Nanofiltrazione

- operazione di separazione condotta a media pressione (10-35 bar) in cui le particelle ritenute hanno dimensioni dell'ordine dei nanometri o comprese tra 200 e 1.000 daltons.
- **Applicazioni:** concentrazione e demine-ralizzazione di siero di latte e latte, frazionamento di amminoacidi
- Purificazione salamoie, recupero di detergenti acidi



Osmosi inversa

- operazione di separazione di ioni o molecole di una soluzione, realizzata permeando il solvente attraverso la membrana, a pressione (10-80 bar) superiore alla pressione osmotica della soluzione.
- **Applicazioni:** demineralizzazione acqua marina, concentrazione di di latte e siero, soluzioni zuccherine, melasse, acido citrico, caffè.



Caratteristiche delle membrane utilizzate in filtrazione tangenziale

Funzionano con un **effetto "barriera"** o "schermo" al passaggio delle particelle, a differenza dei filtri di profondità, nei quali le particelle sono trattenute sia alla superficie che all'interno della matrice del filtro

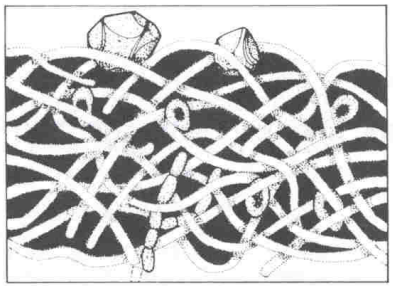


Figure 2.1. Schematic of depth filter, showing the randomly oriented fibers trapping particles on its surface and within its matrix (Source: Millipore, 1978).

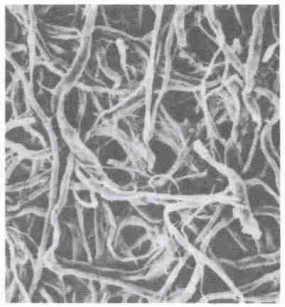


Figure 2.2. Micrograph of a depth filter (Millipore Type A20). Magnification 100X (Source: Millipore, 1980).

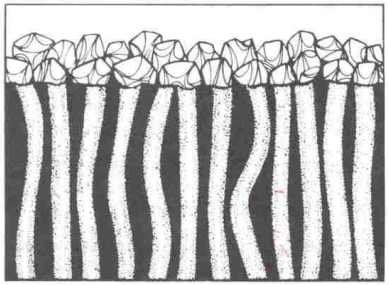


Figure 2.3. Schematic of screen filter, which retains particles on its surface (Source: Millipore, 1978).

Caratteristiche delle membrane utilizzate in filtrazione tangenziale

- **membrane asimmetriche**
- almeno una proprietà della membrana (porosità, diametro dei pori, densità delle cariche fisse, natura dei gruppi funzionali) è molto differente a seconda della faccia considerata.
- **Le due facce**
- a) lo strato filtrante vero e proprio "pelle"
- b) il supporto macroporoso

Una membrana asimmetrica è anisotropa, cioè le sue caratteristiche che dipendono dalla direzione lungo la quale esse sono considerate

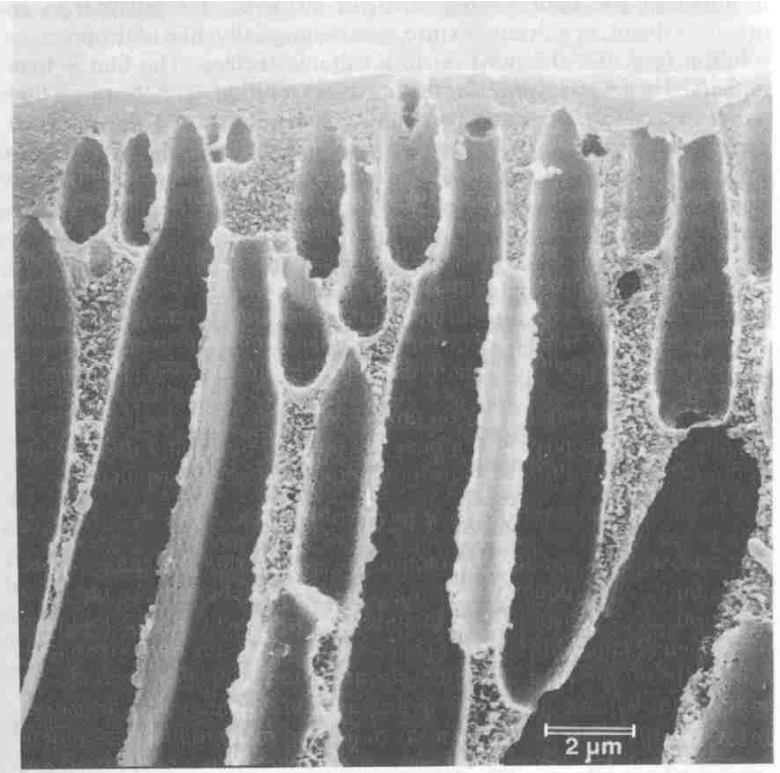
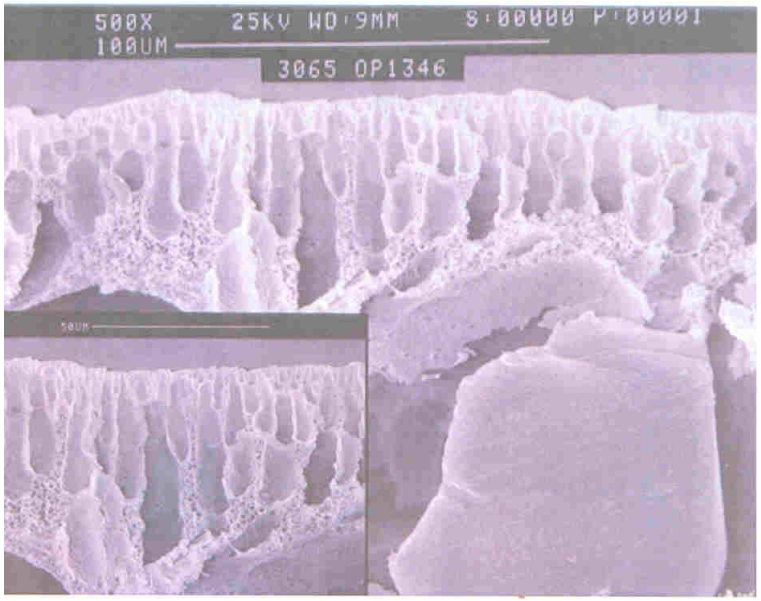


Fig. 3. Cross-sectional view (5000×magnification) of an asymmetric skinned membrane. Electron micrograph kindly provided by T. Kimura, Snow Brand Milk Products Co. Ltd, Japan.

Caratteristiche delle membrane utilizzate in filtrazione tangenziale

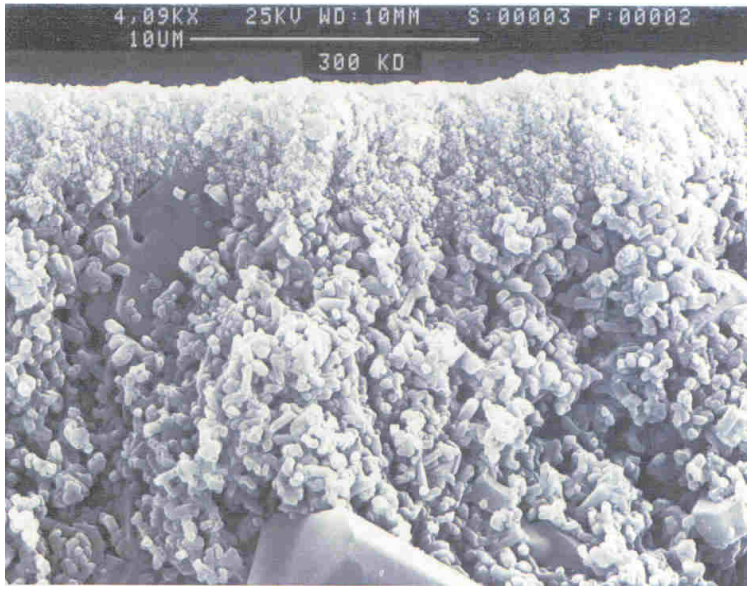
membrana anisotropa

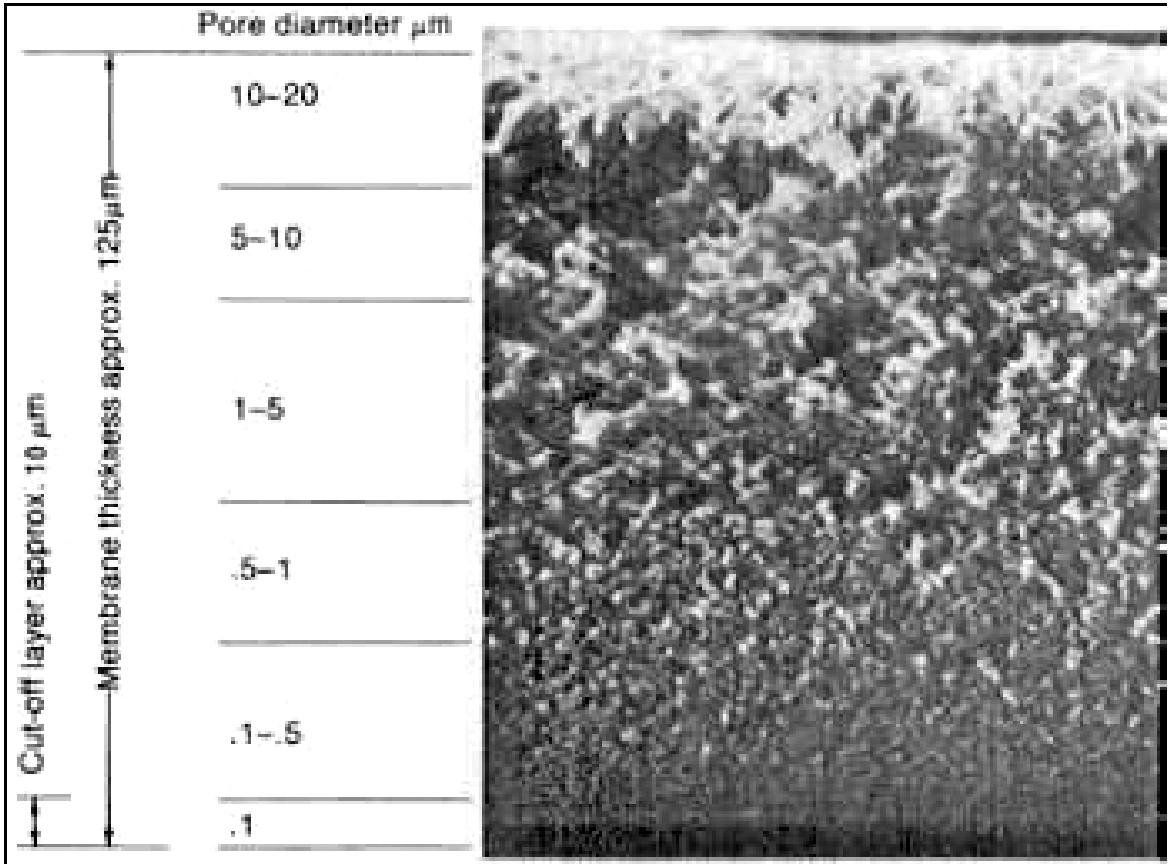
composta da un unico materiale



membrana composita

composta da due materiali differenti, generalmente un film polimerico (0,5-2,5 μ) depositato su una sottostruttura porosa (100-200 μ)





Sezione trasversale di una membrana di polisulfone anisotropa tortuosa → distribuzione dei pori

Caratteristiche delle membrane: selettività

E' la proprietà della membrana, indipendente dalle modalità operative di filtrazione, che definisce la sua attitudine a ritenere le particelle di una certa dimensione (e le più grandi) (*aspetto sterico*), di una certa massa molecolare (e le superiori), le molecole di una certa natura chimica o gli ioni di una certa carica ***(interazioni)***

- **Membrane MF, UF, NF**
- **Membrane OI**
- **Membrane per elettrodialisi**

Caratteristiche delle membrane: dimensione dei pori o soglia di taglio (cut off) o soglia di taglio nominale

E' un parametro che definisce il diametro o la massa molecolare a partire dai quali la maggioranza delle particelle o delle molecole è ritenuta efficacemente.

Tale parametro è espresso in micrometri o in dalton e tuttavia non rappresenta mai un valore rigorosamente esatto. Questo perchè le molecole sono ritenute anche per effetti di ingombro sterico, di carica elettrica, di interazioni idrofobiche o idrofiliche con la membrana, o in funzione delle condizioni operative, che influenzano la formazione dello strato di deposito.

Caratteristiche delle membrane: porosità

- La porosità di una membrana è altra cosa rispetto al suo cut off
- la porosità di una membrana è il rapporto tra il volume dei pori ed il volume totale della membrana, ovvero è il volume *vuoto*. Può essere nell'ordine di 70-90%
- Dipende quindi dal numero dei pori medesimi per unità di area (*densità dei pori*) e dalla loro dimensione.
- E' in relazione con la superficie reale filtrante a disposizione

Caratteristiche delle membrane: membrane dense

Esistono anche **membrane dense**, prive di porosità, attraverso cui il trasporto di ioni e molecole ha luogo per solubilizzazione/diffusione.

Sono membrane asimmetriche costituite da una membrana densa (spessore circa 0,2 micron) deposta su una matrice porosa (spessore circa 99,8 micron)

Sono utilizzate in osmosi inversa ed elettrodialisi

Il valore dichiarato del diametro dei pori della membrana generalmente è un valore medio, che riflette una distribuzione di tipo gaussiano.

Solo le membrane in policarbonato, ottenute per "bombardamento con particelle fissili", hanno una distribuzione significativamente più uniforme del diametro dei pori

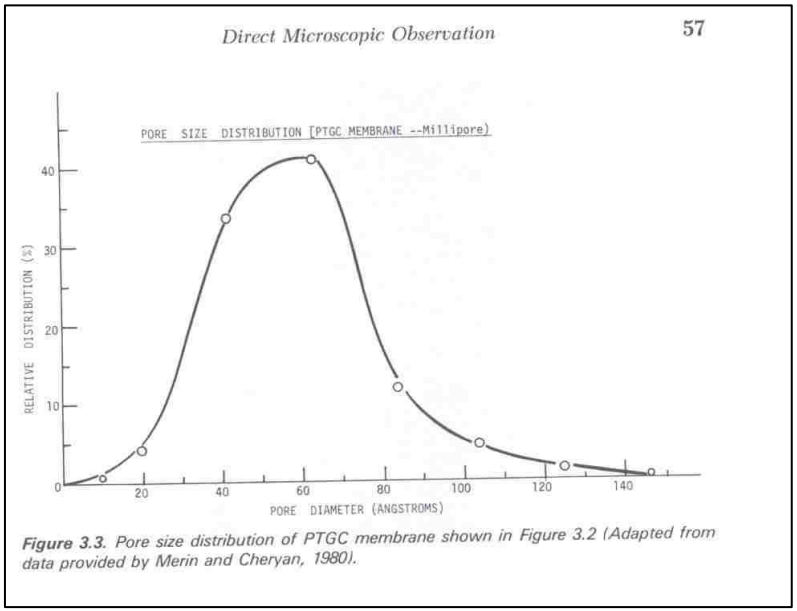
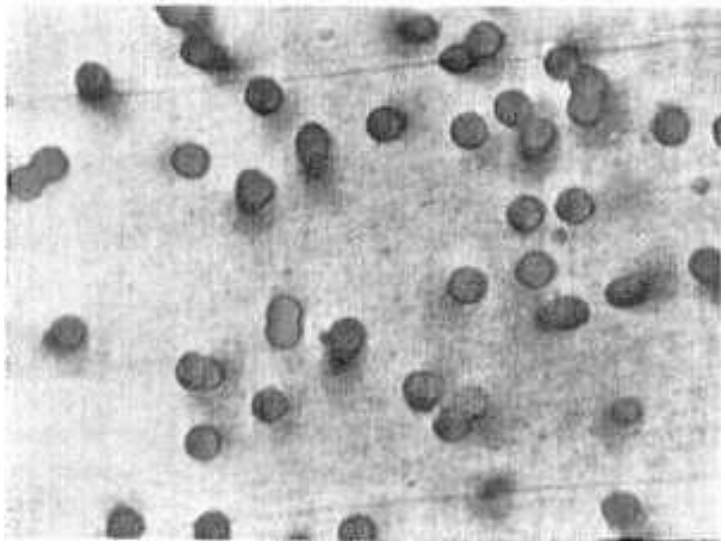
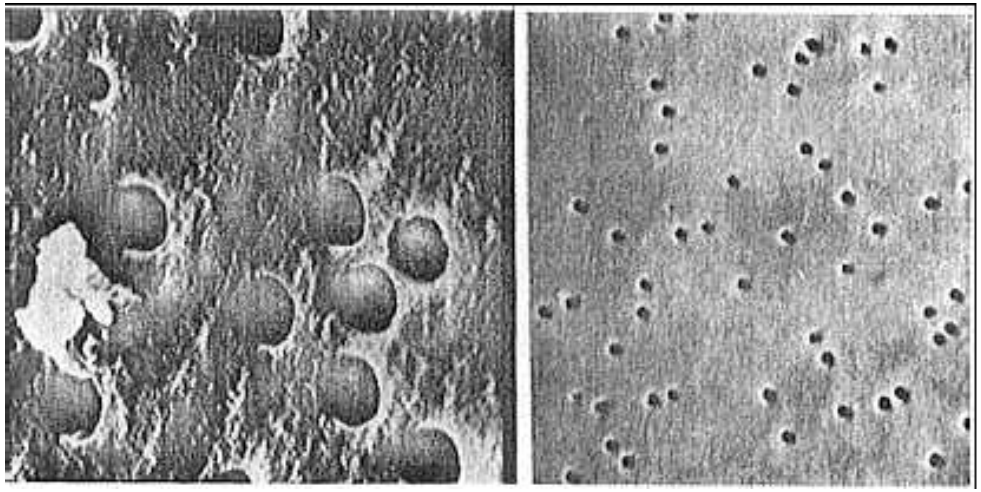
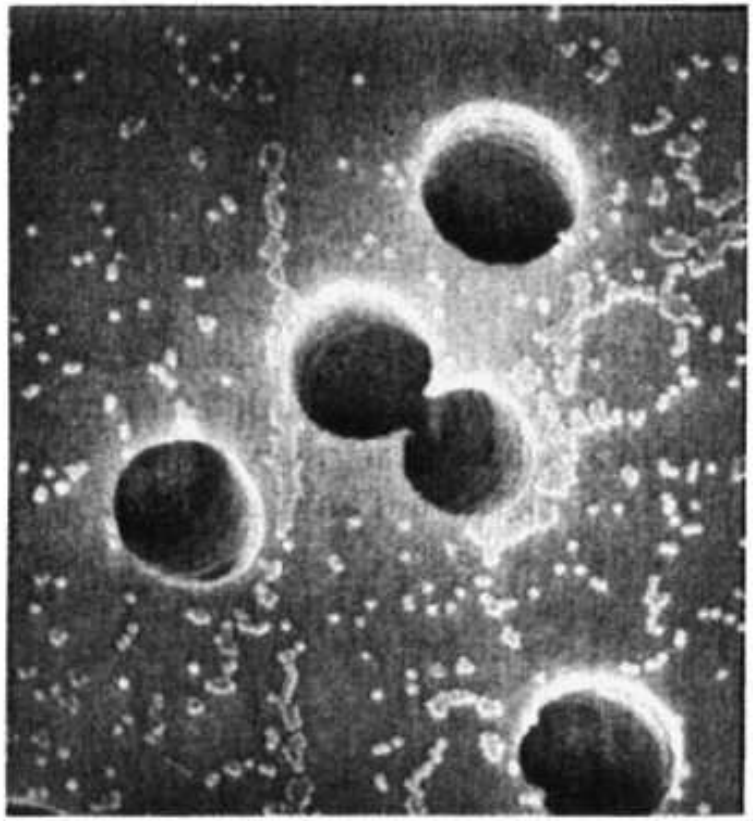


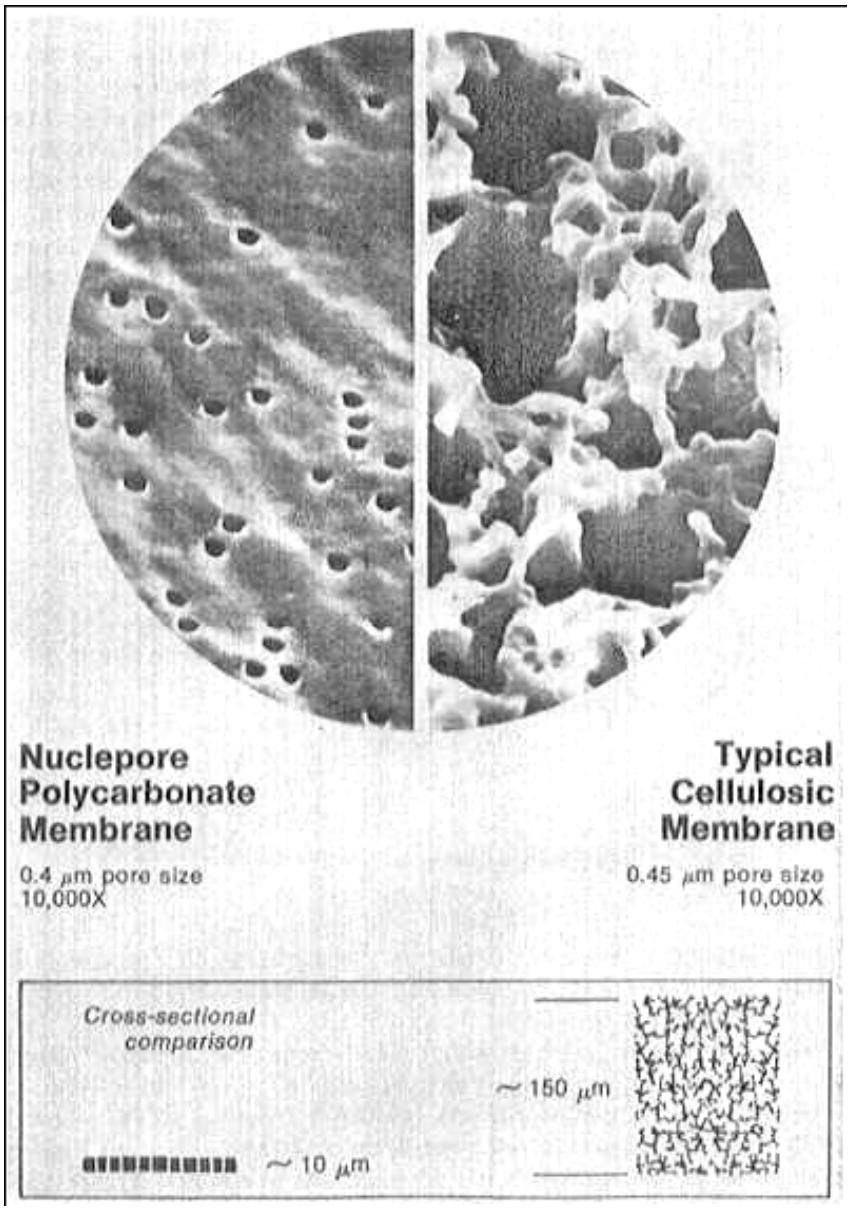
Figure 3.3. Pore size distribution of PTGC membrane shown in Figure 3.2 (Adapted from data provided by Merin and Cheryan, 1980).







Poro doppio in membrana policarbonato



Caratteristiche delle membrane: materiali compositivi

- **Membrane organiche**
- Cellulosa (triacetato, nitrato, esteri)
- Poliacrilonitrile (PAN)
- Poliammide
- Polisulfone
- Polietersulfone
- Policarbonato
- Polivinilidendifluoruro (PVDF)
- Polivinilcloruro (PVC)
- Poliestere
- Polipropilene

Membrane minerali

Allumina (Al_2O_3)

Ossido di Titanio

Ossido di Zirconio

Acciaio

Argento

Caratteristiche delle membrane: resistenza alle condizioni di processo

- **Condizioni di processo**: il fattore limitante più importante è la **stabilità del prodotto da filtrare**
- **Condizioni di lavaggio**, più drastiche, in cui il fattore limitante diventa la membrana (il materiale filtrante vero e proprio, i materiali di supporto, le eventuali colle, altri accessori del modulo di filtrazione).
- Le **caratteristiche sono quindi specifiche per tipo di membrana**, anche se in generale le membrane minerali sono le più resistenti, se non per il rischio di rottura dovuta a "colpi d'ariete" in caso di cattiva modulazione dell'incremento di pressione e montaggio non totalmente corretto.

Caratteristiche di membrane di UF: resistenza alla temperatura ed al pH

Membrana	pH	Temp. Max °C
PVDF	1-10	80
Polisulfone	0-14	80
Acrilica	3-10	50
Cellulosa acetato	2-8	50
Poliammide	2-12	75
Minerali	0-14	120

Caratteristiche delle membrane: geometria

- **membrane piane:**
- sono utilizzate nei moduli piani e a spirale
- **membrane a fibre cave o capillari:**
- sono membrane a forma di micro-tubo (diametro fino a 3 mm, lunghezza fino a 1 m) assemblate in fasci di diverse decine di unità a costituire il modulo

- **membrane tubulari**:
- possono essere mono o multicanale (fino a 19 canali in un'unica membrana);
- il loro diametro varia da 3 a 30 mm.
- Singolarmente o assemblate in un housing sono utilizzate nei moduli tubolari

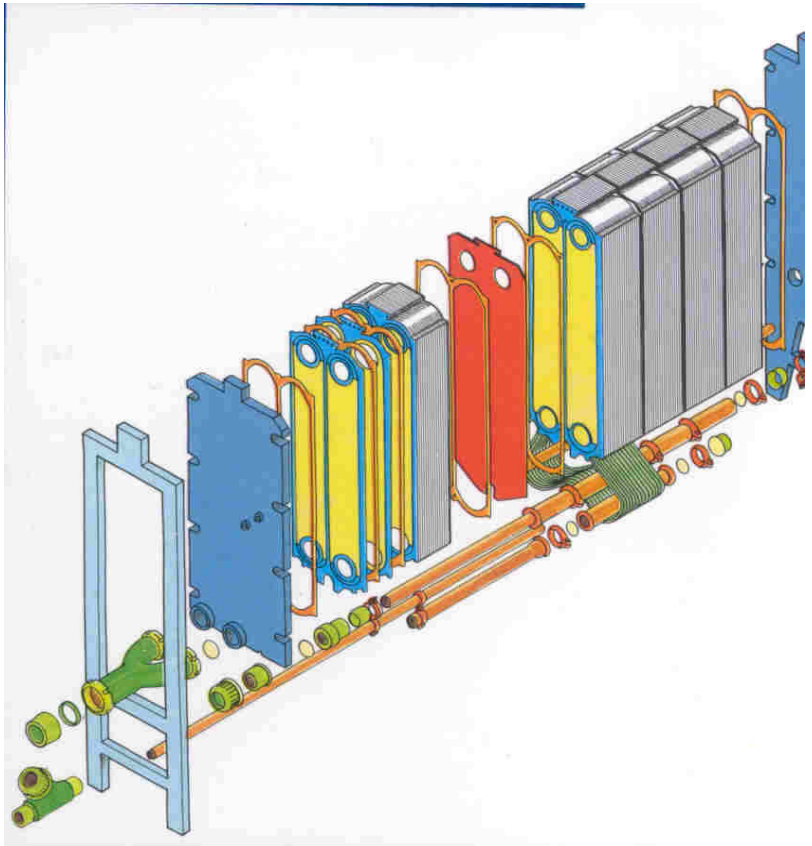
Il modulo di filtrazione

- **E' l'insieme elementare, o più semplice, di un impianto di separazione attraverso membrana e comprende uno o più elementi filtranti (*pacco di piastre, fascio di tubi*) assemblati tra di loro alimentati in parallelo da una medesima pompa, nonché i collegamenti e le tubazioni necessarie per il flusso dei fluidi (alimento, concentrato e permeato).**

Il modulo piano

La sua struttura richiama quella degli scambiatori di calore a piastre o dei filtri pressa.

Il modulo è costituito da una successione di piastre porta membrana (separate da guarnizioni il cui spessore determina il canale di filtrazione) attraverso le quali è drenato il permeato, con una membrana per ciascun lato, intervallate da piastre separatrici con funzione di supporto, il tutto chiuso tra 2 piastre terminali.



Il modulo piano

Circolazione di permeato e retentato

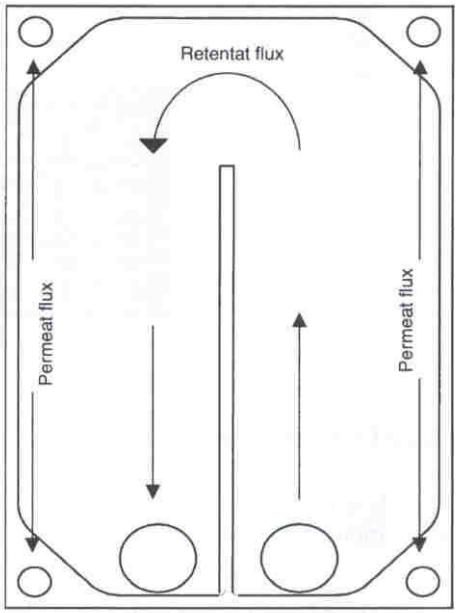


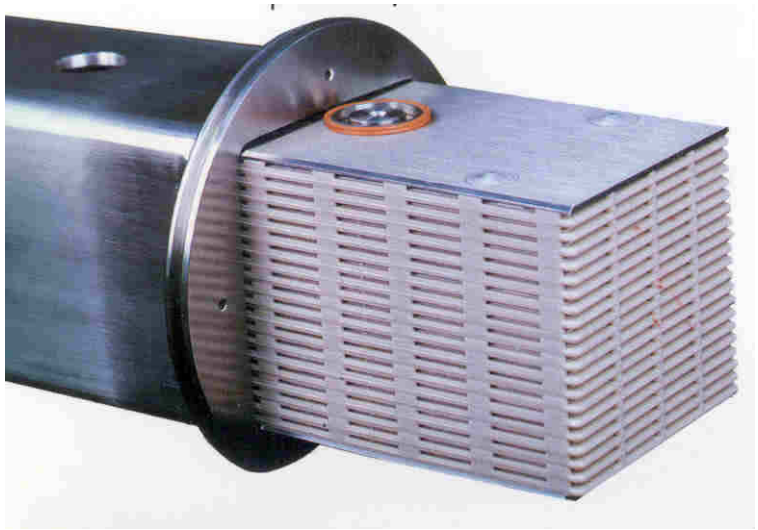
Figure 3. Fluid circulation.



Il permeato scorre tra membrana e piastra ed esce da ogni piastra per mezzo di tubi in plastica e si raccoglie in un collettore

Il modulo piano a cassette

Il sistema piano a cassette



il sistema con membrane piane ceramiche

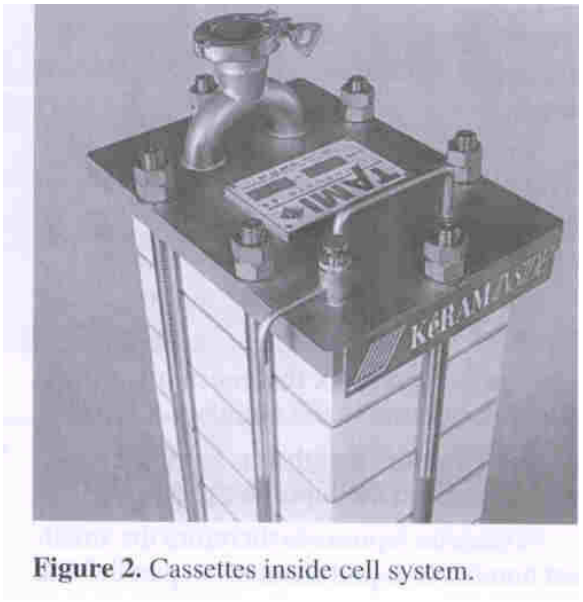


Figure 2. Cassettes inside cell system.

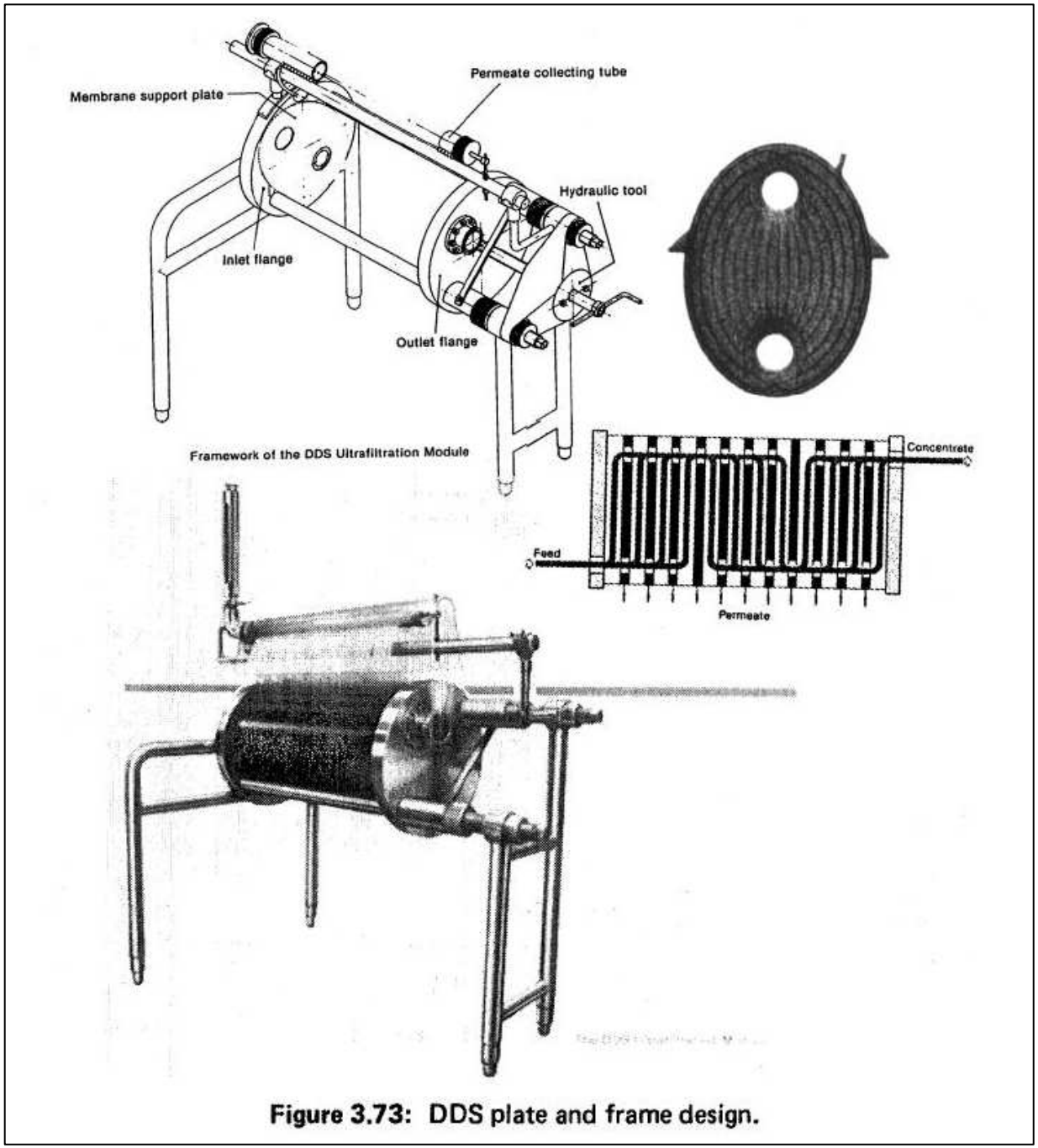
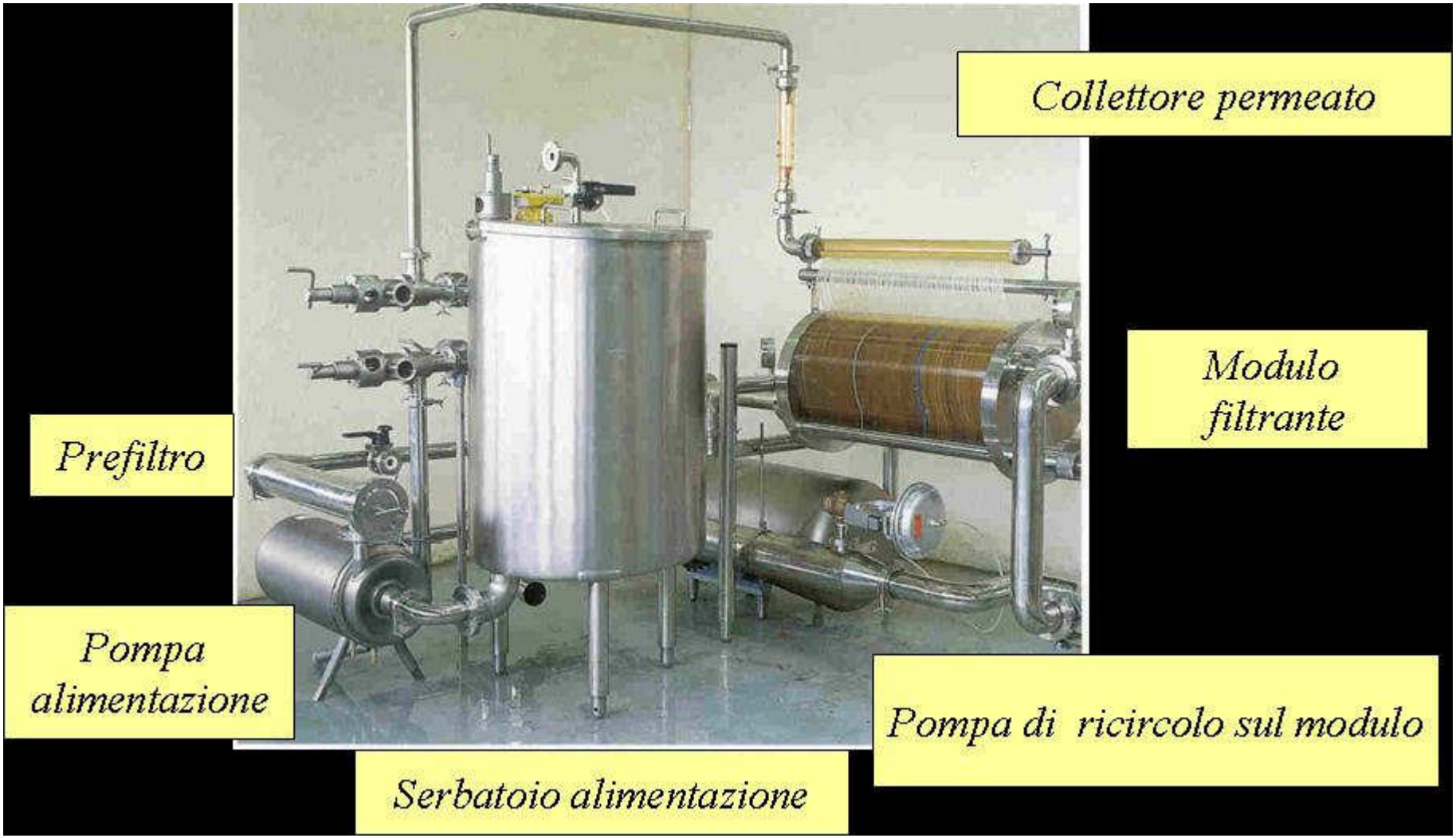


Figure 3.73: DDS plate and frame design.

Un impianto a moduli piani



Il modulo piano

Vantaggi

- **facile manutenzione**
- **volume morto ridotto**
- **possibilità di sostituire, in caso di rottura, coppie di membrane anzichè l'intera unità filtrante *(non per le cassette)***
- **consumi energetici medi (v= 2 m/s)**

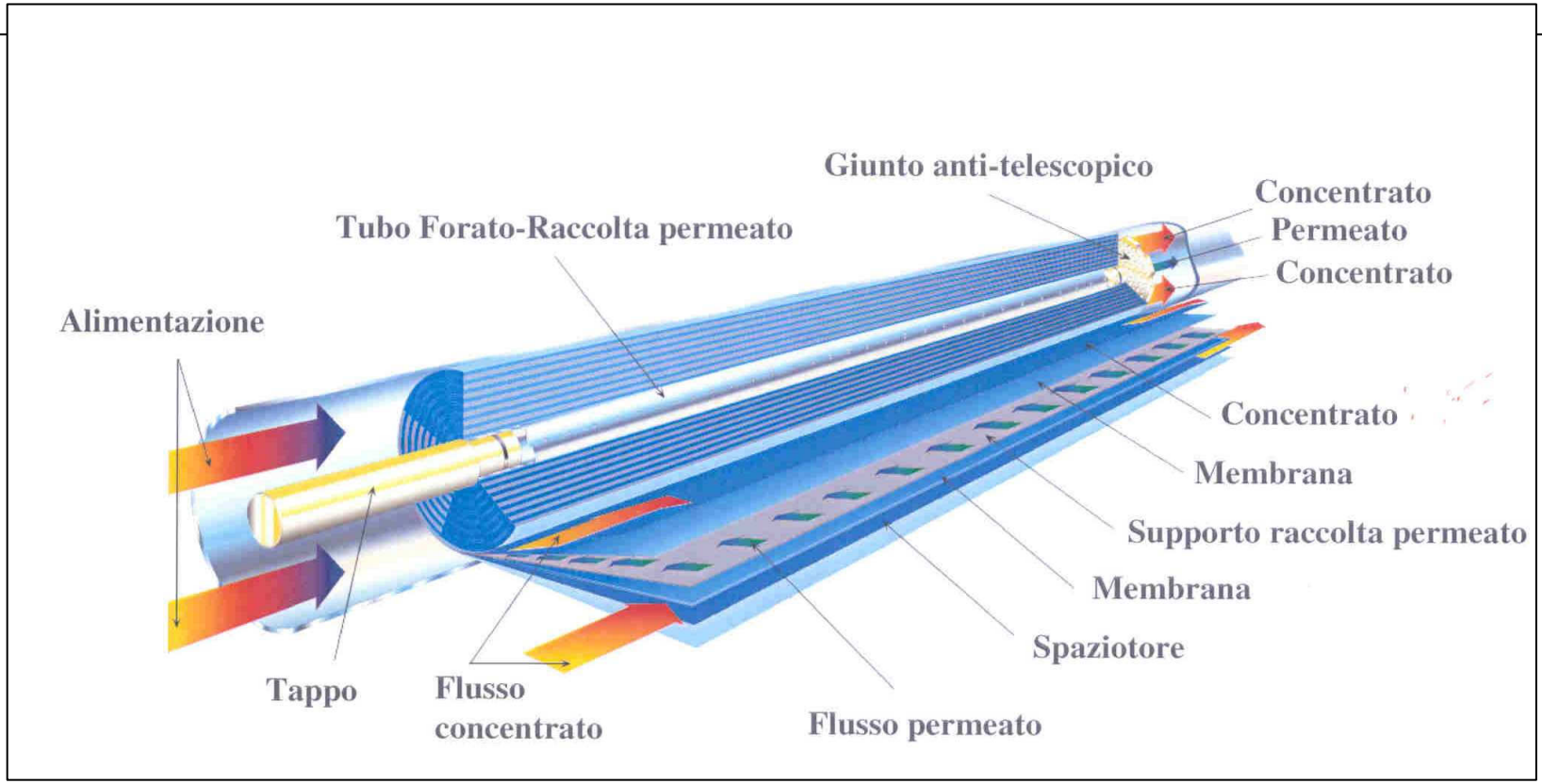
utilizzabile per prodotti viscosi (NB distanza tra piastre → influenza su volume morto)

Svantaggi

- **difficoltà di applicare contropressione del permeato (tenuta tubi – collettore) e quindi regolare PTM**
- **Ingombro relativamente alto**

Il modulo piano a spirale avvolta

Modulo costituito da una membrana piana, un supporto poroso ed un sistema di separazione (*spacer*) avvolti attorno ad un tubo forato che funziona come collettore del permeato, il tutto assemblato all'interno di un housing di geometria tubulare.



Il modulo piano a spirale avvolta

- **Il flusso del permeato all'interno del modulo**

- **la membrana in sezione:**

  gli spaziatori (0,6-1,1 mm)

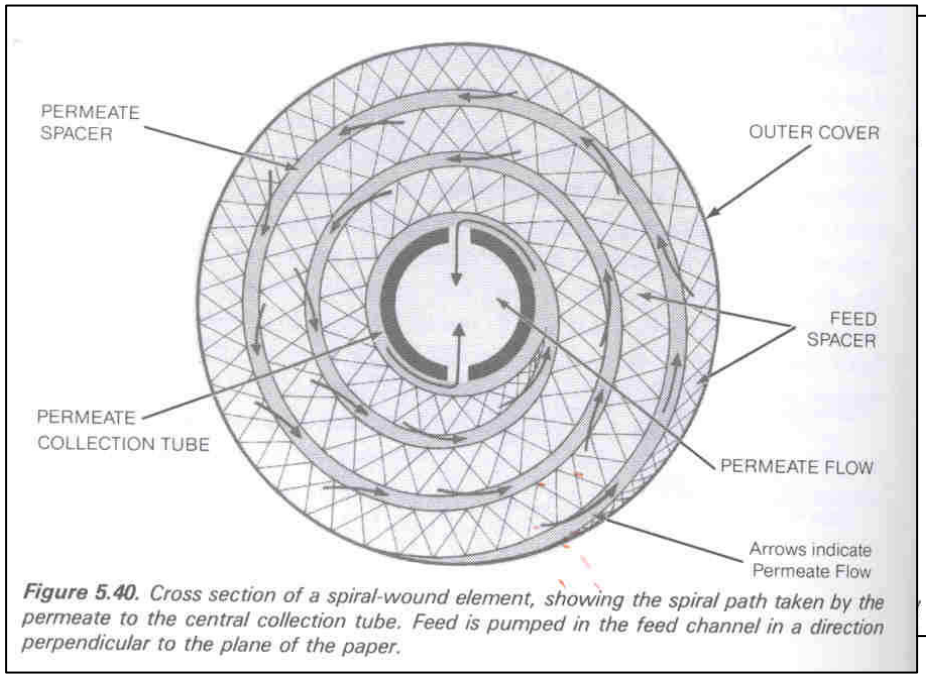
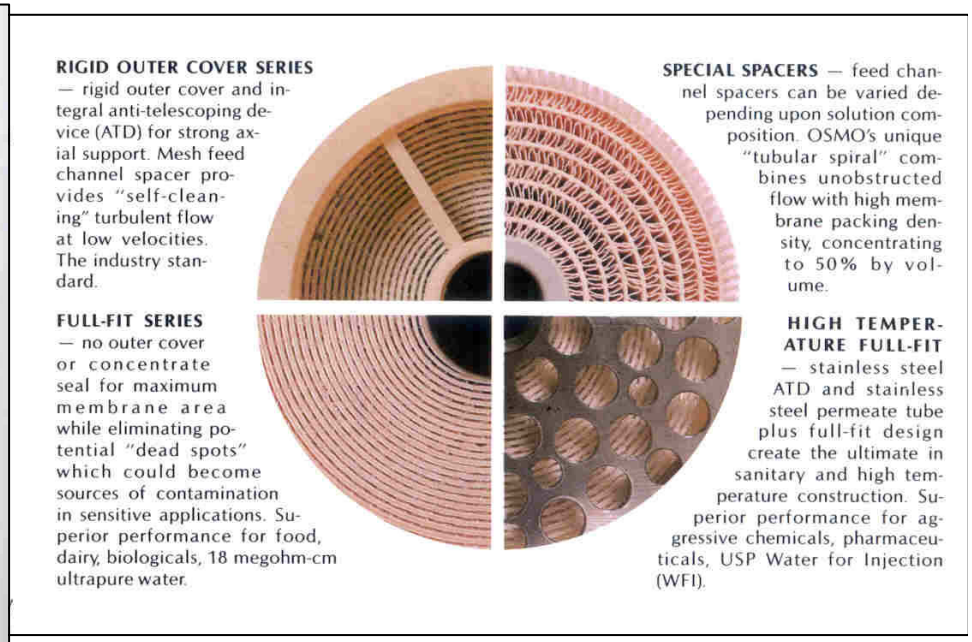
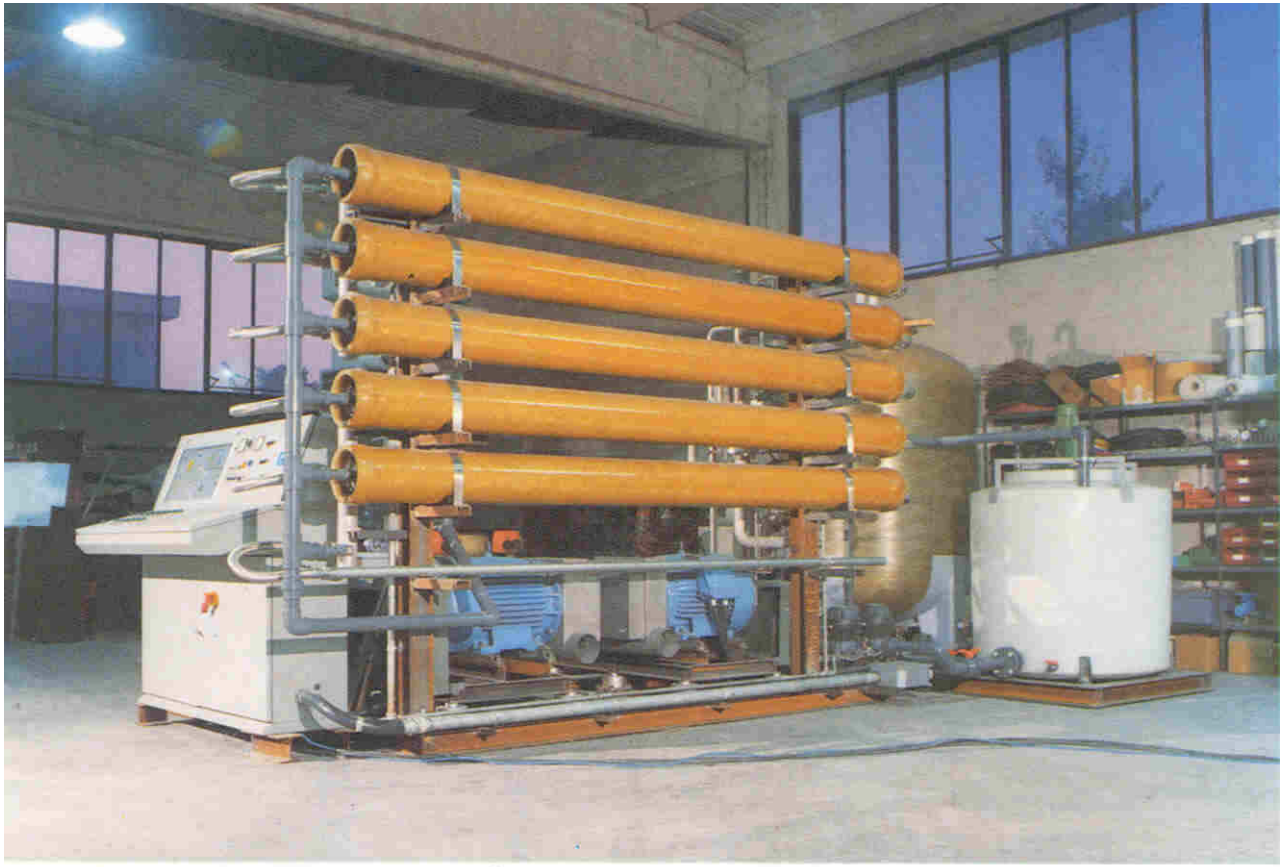


Figure 5.40. Cross section of a spiral-wound element, showing the spiral path taken by the permeate to the central collection tube. Feed is pumped in the feed channel in a direction perpendicular to the plane of the paper.



Un impianto con moduli a spirale avvolta



MPIANTO INDUSTRIALE AD OSMOSI INVERSA CAPACITÀ: 22m³/h - TRATTAMENTO EFFLUENTI INDUSTRIALI.

Il modulo piano a spirale avvolta

Vantaggi

- costi ridotti
- molto compatto (alto rapporto tra superficie e volume, funzione dell' altezza dello spacer 0,6-1,1 mm)
- bassi consumi energetici (v=0,1-0,6 m/sec; effetto di promozione di turbolenza dato dallo spacer)

possibilità di alloggiare in serie più membrane nello stesso housing

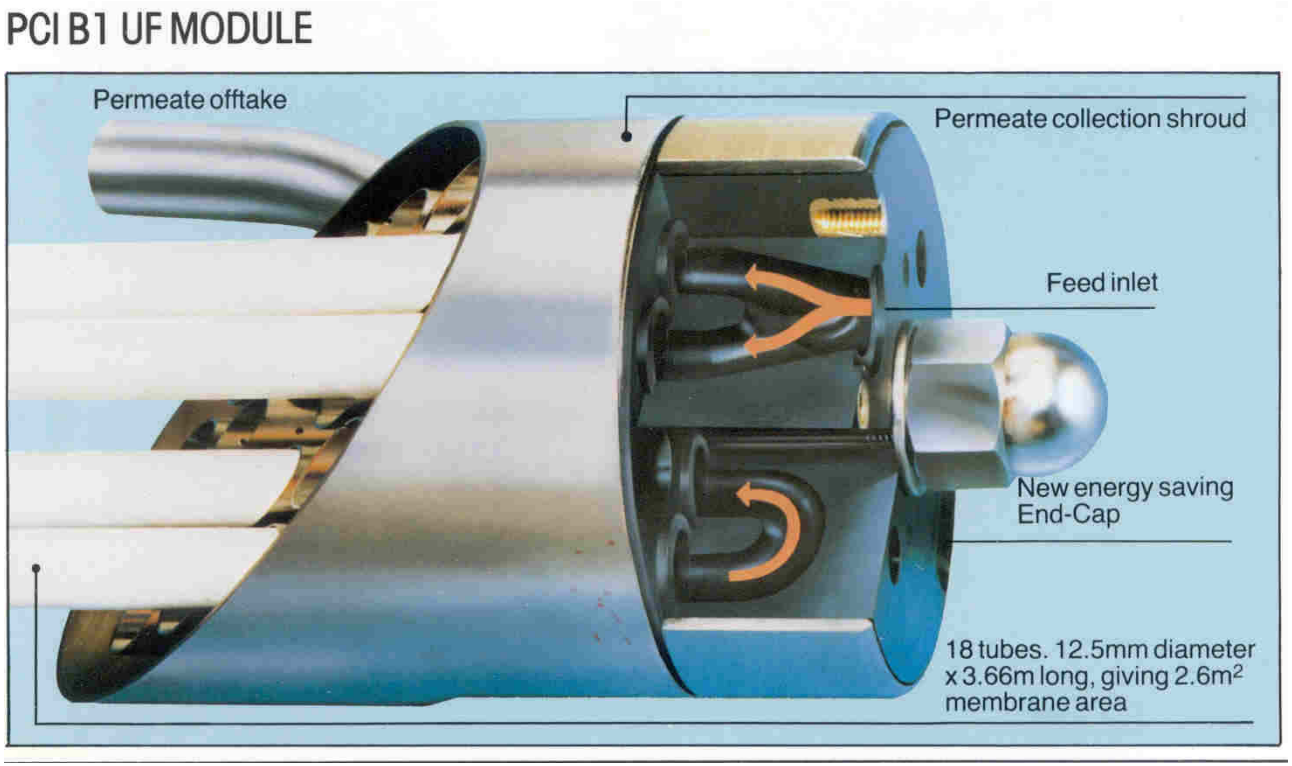
Svantaggi

- nessun controllo sul la pressione del permeato
- sensibile alla colmatazione
- difficoltà di lavaggio (presenza spacer)
- sostituzione del modulo in caso di rottura della membrana

poco adatto per prodotti viscosi

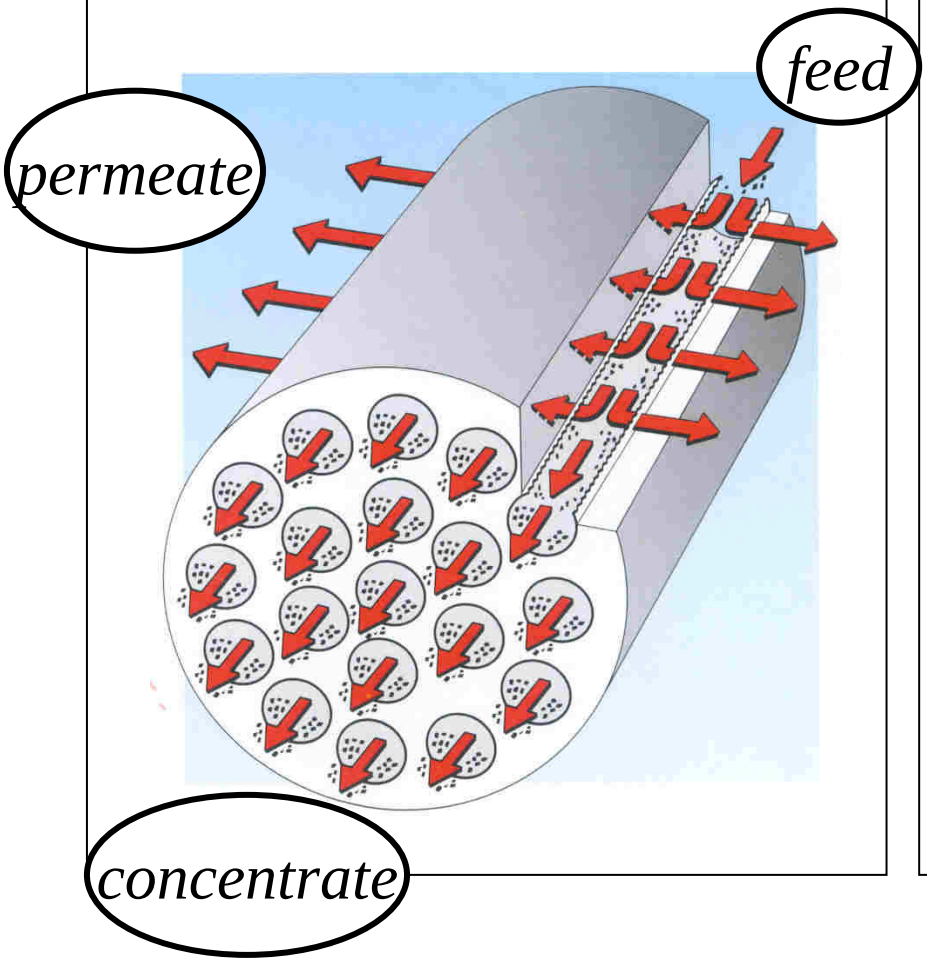
Il modulo tubolare

Modulo costituito da membrane tubolari (monocanale o multicanale - da 7 a 19) assemblate in parallelo all'interno di un housing di geometria tubolare. Il numero di membrane multicanale assemblabile per modulo arriva a circa 100.



Il modulo tubolare

schema di flusso



Un housing contenente 19 membrane multicanale (19 canali per membrana)



Un impianto con moduli tubolari multicanale



Il modulo tubolare

Vantaggi

- Ottimali per prodotti viscosi, o contenenti particelle (max 1/10 del diametro della membrana)
- Varietà del diametro delle membrane (3,5-14,4 mm)
- Facili da pulire
- Possibilità di regolare la contropressione del permeato

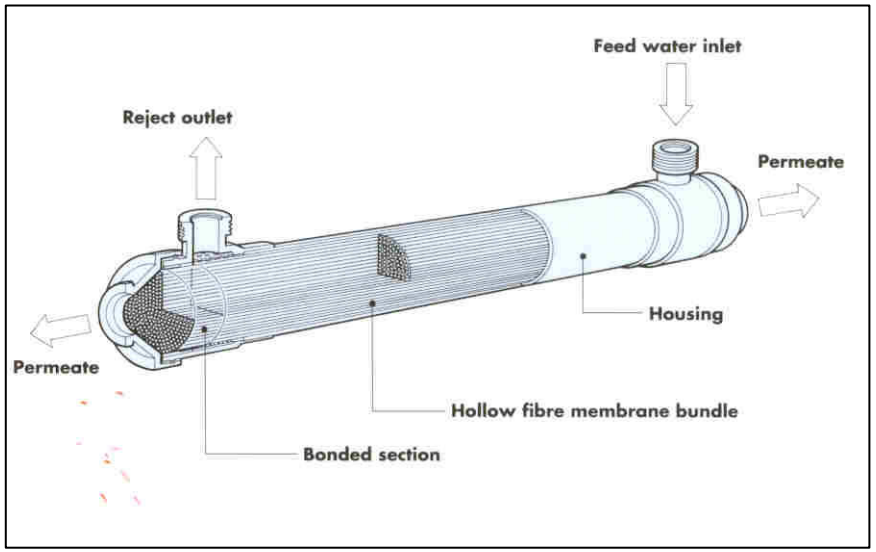
Svantaggi

- Alti consumi energetici (v=2-6 m/sec)
- Basso rapporto area/volume, quindi necessità di grandi spazi
- Alto volume morto

Il modulo a fibre cave

E' un modulo costituito da un grande numero di fibre cave (diametro da 0,5 a 1,1 mm) "*self supporting*"* assemblate all'interno di un housing trasparente (PVC o polisulfone) di geometria tubolare.

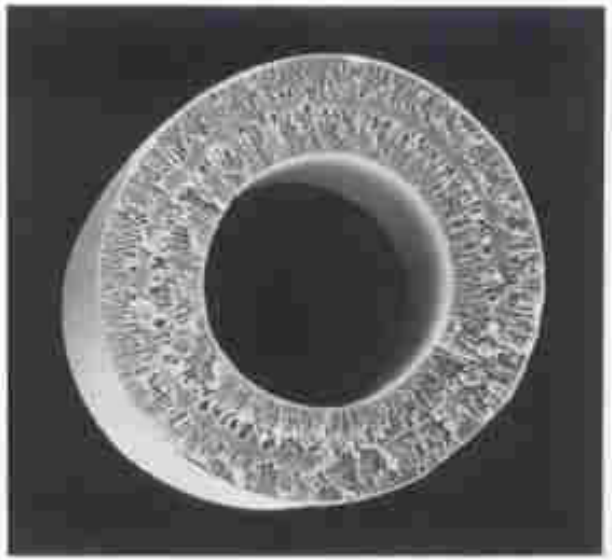
Lo spessore della fibra cava varia da 100 a 200 nanometri a confronto di valori di 5-12 nm caratteristici ad esempio di membrane piane.



Fibre cave

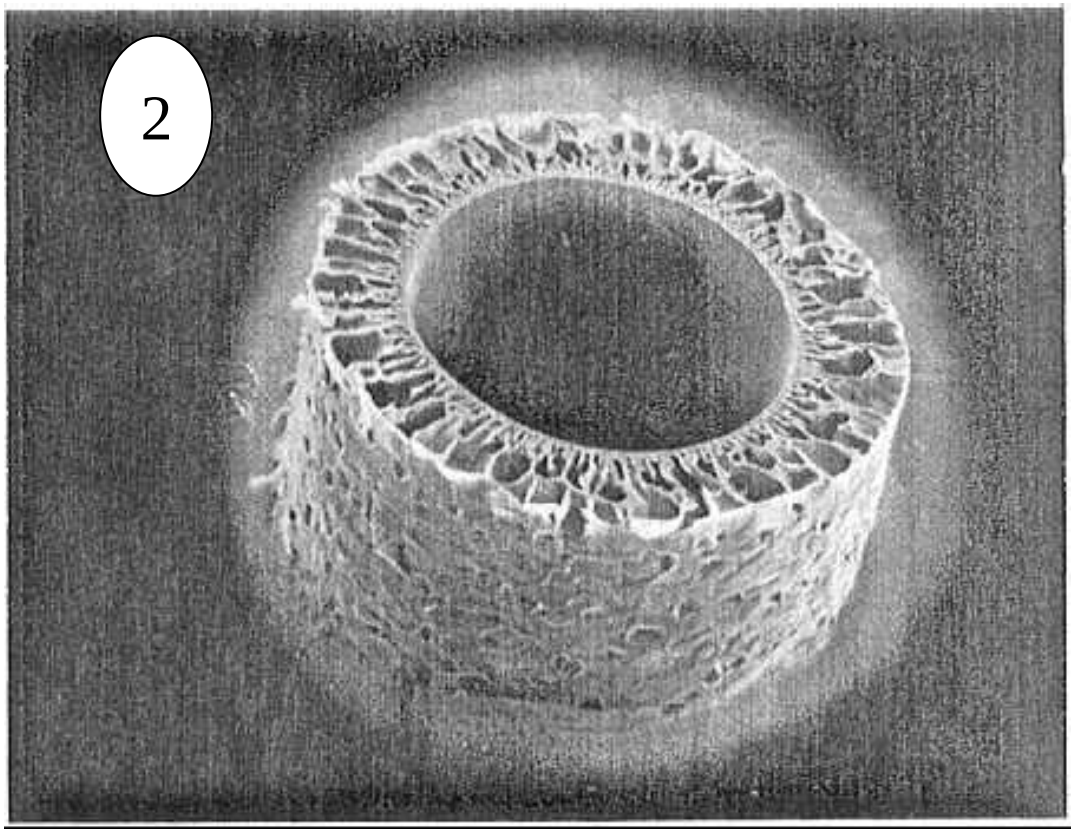
Il senso di filtrazione può essere bidirezionale, in funzione della localizzazione della "pelle" sulla fibra cava (1), oppure il permeato flussa dall'interno della fibra verso l'esterno (2).

1



Cross-section of Microza hollow fibre membrane

2



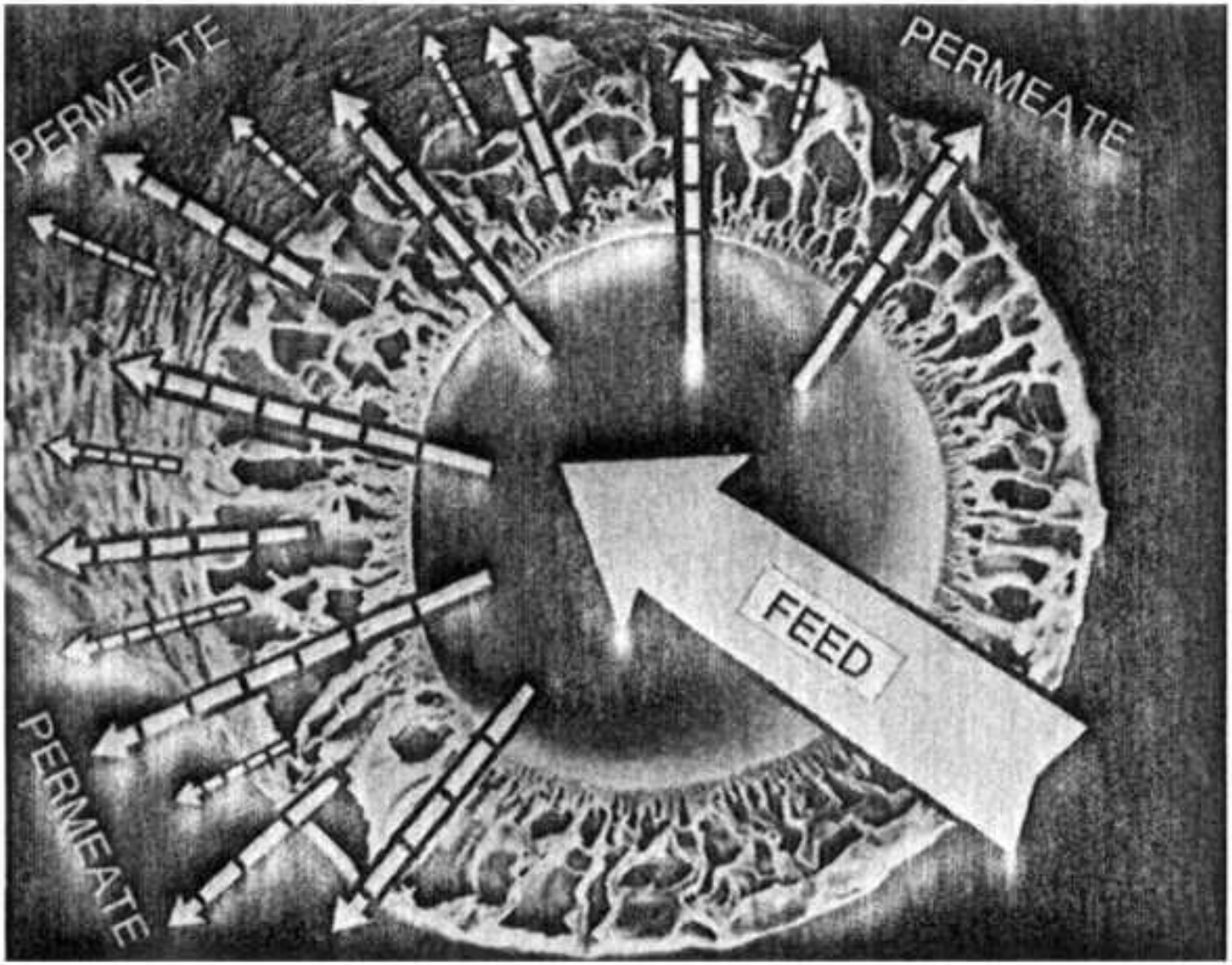
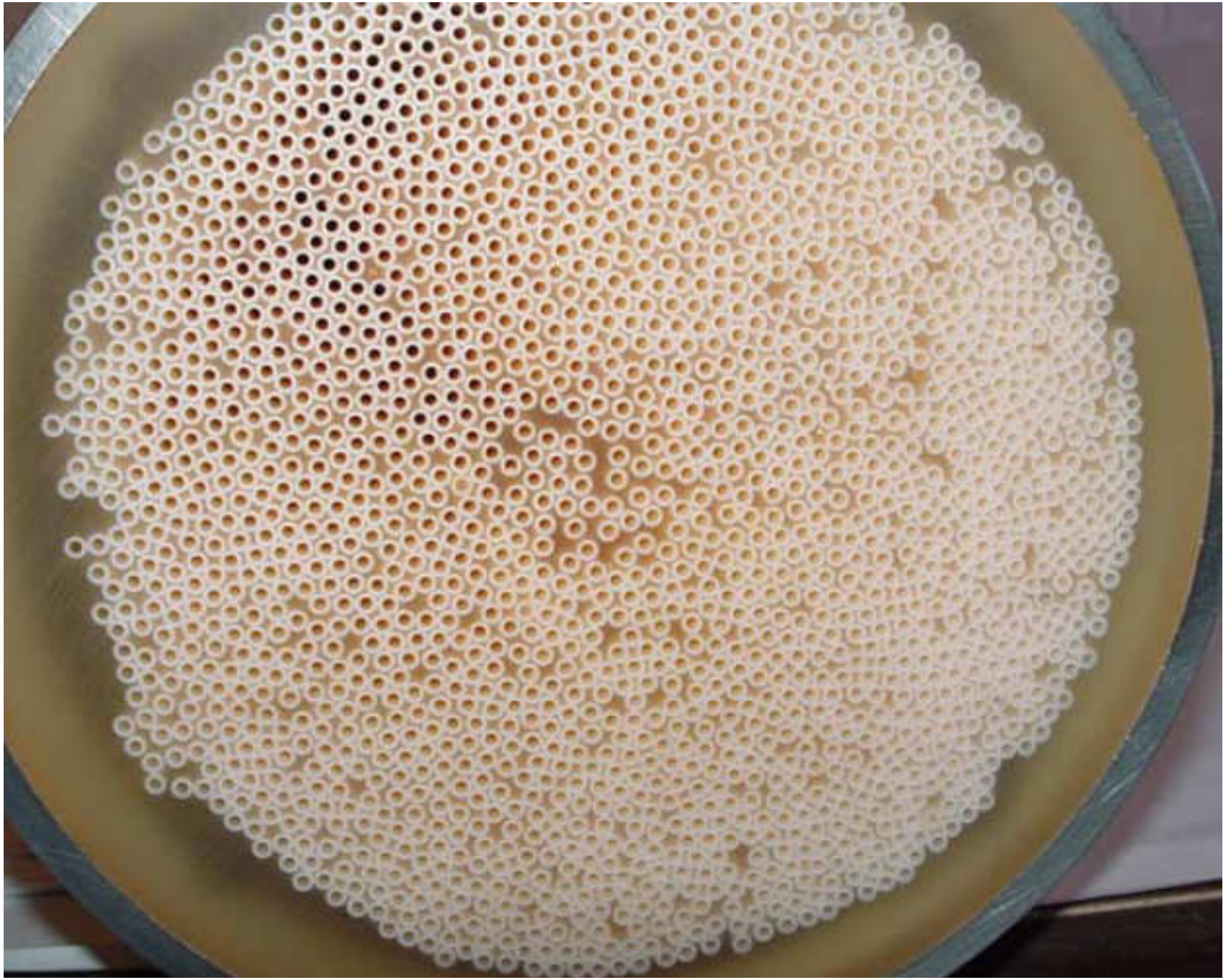
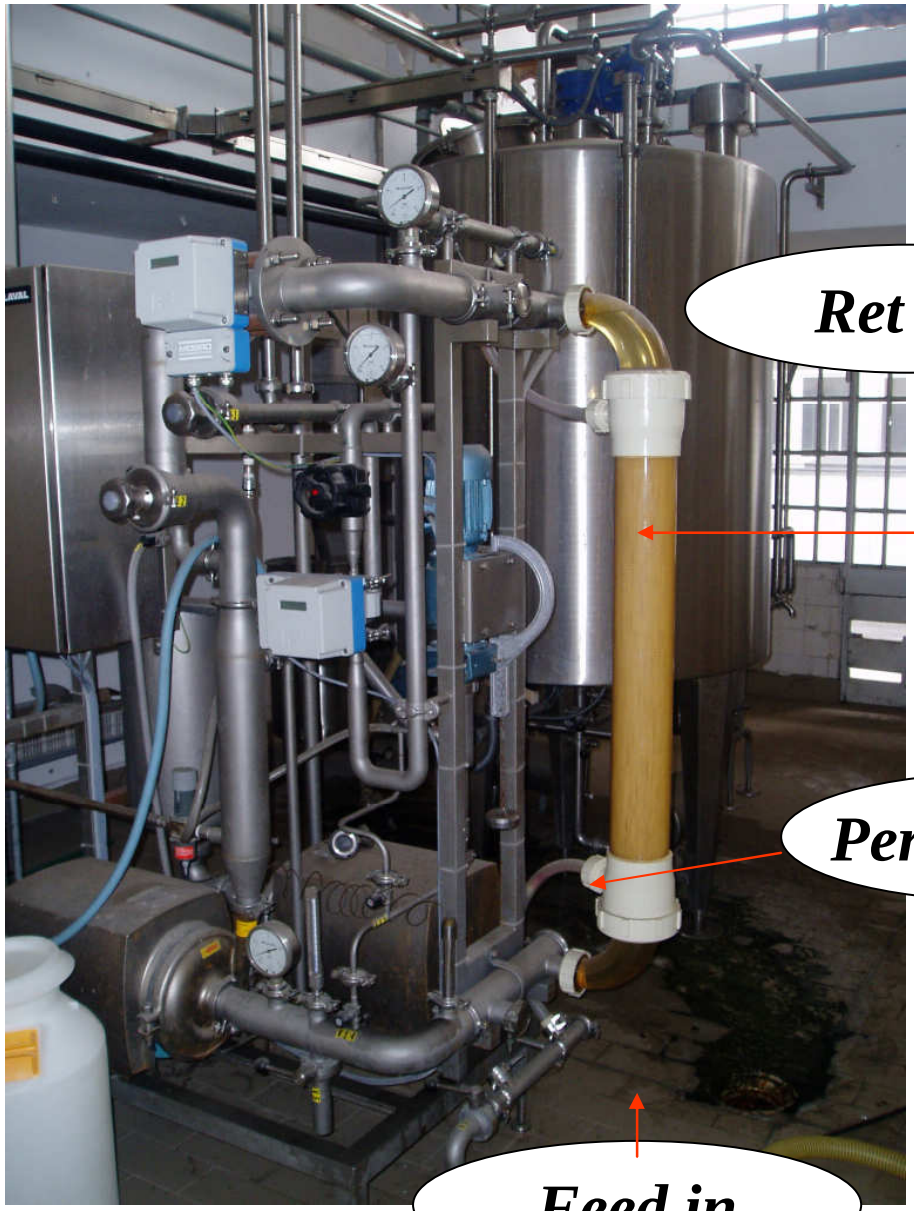


Figure 3.13: Feed stream on inside of UF hollow fiber.



Impianto a fibre cave



Ret out

Modulo filtrante

Permeate out

Feed in

Il modulo a fibre cave

Vantaggi

- elevato rapporto area/volume
- facilità di pulizia, anche per “back flushing” del permeato
- possibilità di escludere dal modulo una singola fibra eventualmente rotta

ridotti consumi energetici

Svantaggi

- la pressione massima di esercizio è di 1,8 atm nei moduli industriali
- rischio di intasamento delle fibre, soprattutto in presenza di fluidi con particelle

inadatte a prodotti viscosi

Elementi per la valutazione di un processo di filtrazione: il flusso di permeazione

- Il flusso di permeazione indica il volume di permeato che ha attraversato la membrana per unità di superficie e di tempo (l/m^2 h). Talvolta messo anche in relazione con la pressione (l/m^2 h bar)
- Il flusso di permeazione dell'acqua in definite condizioni operative (°C, PTM, v) è un **parametro caratteristico della membrana nuova**, e serve per valutare anche l'efficacia delle procedure di lavaggio della membrana dopo l'uso.

il flusso di permeazione: modelli predittivi per fluidi e membrane ideali

Modello secondo la legge di Hagen Poiseuille

$$J = \varepsilon r^2 P / 8\eta\Delta x$$

con: J= flusso (volume/area, tempo); ε= porosità; r=il raggio della sezione del canale ove scorre il fluido; P= $\Delta P^* - \Delta\pi^{**}$; η= viscosità del fluido che permea la membrana; Δx = spessore della "pelle" della membrana

* ΔP=(P feed in + P conc out/2)/ P permeato)]

**$\Delta\pi$ = differenza di pressione osmotica attraverso la membrana → importante soprattutto per membrane NF ed OI in cui sono ritenute le molecole di minori dimensioni

il flusso di permeazione: modelli predittivi per fluidi e membrane ideali

Modello "Resistenze"

- **J= A ΔP /η**
  con A=coefficiente di permeabilità della membrana
  A/η=1/Rm
  con Rm=resistenza intrinseca della membrana

J= ΔP / Rm

Elementi per la valutazione di un processo di filtrazione: il fattore di concentrazione

Il fattore di concentrazione indica il rapporto tra il volume (o la massa) del fluido da trattare e quello del prodotto concentrato. E' un numero adimensionale.

Può anche essere riferito ad un singolo componente del fluido da trattare (soprattutto quando questo è completamento ritenuto: es grasso in UF)

Elementi per la valutazione di un processo di filtrazione: il coefficiente di reiezione

Misura l'efficacia di separazione da parte di una membrana, ovvero quanto una membrana blocca o permette la permeazione di una molecola.

La reiezione/ritenzione σ di un componente i è calcolata:

$$\sigma = 1 - Cpi/Cfi$$

con Cpi e Cfi che indicano le concentrazioni di i rispettivamente nel permeato e nel fluido

Osmosi inversa: retenzione sali

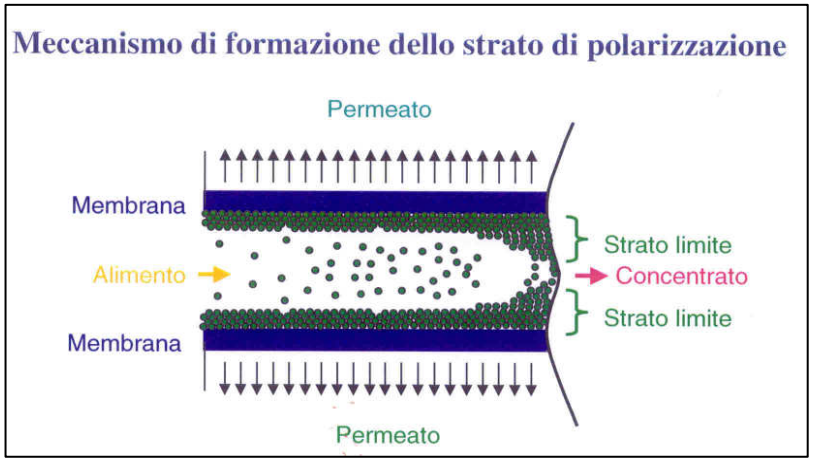
Il meccanismo di ritenzione di una membrana di osmosi è meglio descrivibile con il modello della solubilizzazione-diffusione attraverso la membrana, piuttosto che con quello dell'effetto barriera dovuto alla struttura porosa tipica delle membrane di MF ed UF. Il flusso di acqua e sali attraverso la membrana è disaccoppiato, per cui incrementando la pressione, la permeazione dell'acqua aumenta, mentre quella dei minerali no. In questo modo aumenta di fatto la ritenzione/reiezione dei sali in quanto risultano più diluiti nella frazione permeato

Elementi per la valutazione di un processo di filtrazione: la velocità di scorrimento tangenziale

- Indica il rapporto tra la portata Q di alimentazione del fluido (espressa come volume/tempo) che scorre in parallelo alla membrana e l'area della sezione di passaggio del fluido (es. diametro del canale).
- V si esprime come m/sec
- Per un prodotto ed una membrana dati, esiste una velocità tangenziale ottimale che permette di limitare la polarizzazione della concentrazione sulla "pelle" della membrana.
- L'aumento di v riduce la colmatazione della membrana, agendo sulla polarizzazione.

Elementi per la valutazione di un processo di filtrazione: la polarizzazione della concentrazione

- Durante il trasporto di materia attraverso una membrana, in prossimità della "pelle" della membrana si crea uno strato in cui si crea un gradiente di concentrazione.



Elementi per la valutazione di un processo di filtrazione: la polarizzazione della concentrazione

La polarizzazione della concentrazione, e l'adsorbimento di molecole sulla membrana, creano una resistenza supplementare al trasporto di materia e quindi fa diminuire il flusso di permeazione

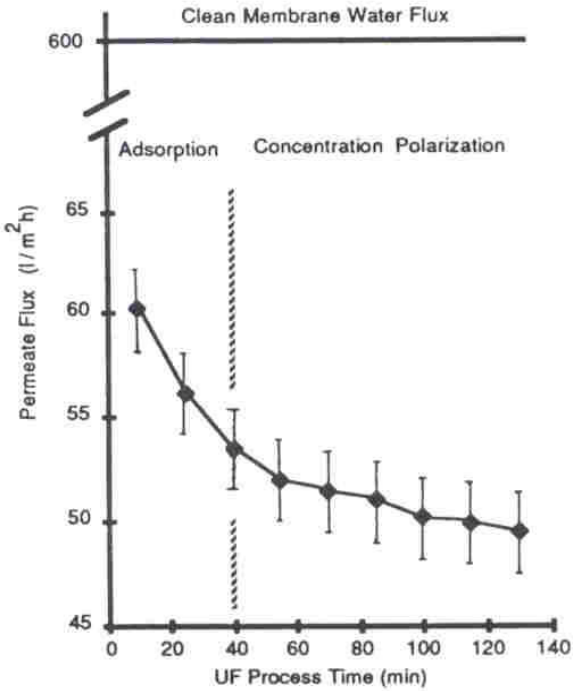


Figure 2. Time-dependent flux decline during whole milk ultrafiltration. (n = 4, brackets are 95% confidence intervals.)

Journal of Dairy Science Vol. 71, No. 3, 1988

Il flusso di permeazione: effetto di PTM in funzione di Q, T e concentrazione soluti

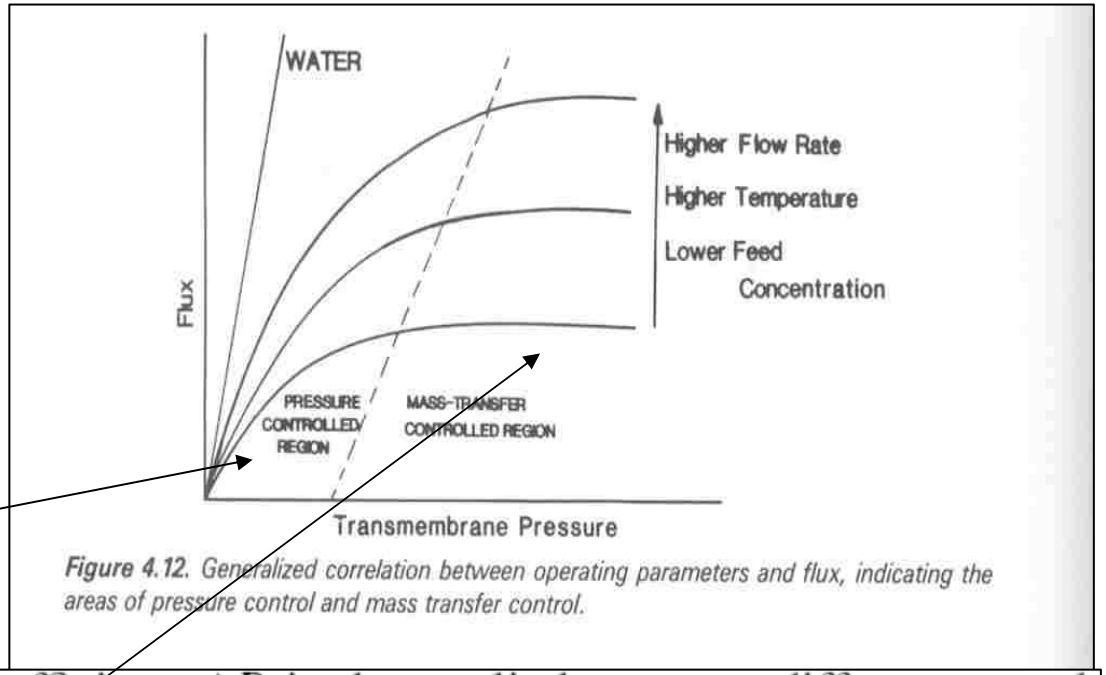


Figure 4.12. Generalized correlation between operating parameters and flux, indicating the areas of pressure control and mass transfer control.

$$J = \frac{p\Delta P}{\mu}$$

where p is the permeability coefficient, ΔP is the applied pressure difference, and μ is the viscosity.

$$J = k \ln\left(\frac{C_G}{C_B}\right)$$

where k is a mass transfer coefficient, and C_G and C_B are the concentration in the gel and in the bulk.

Il flusso di permeazione: effetto di PTM in funzione di concentrazione e velocità

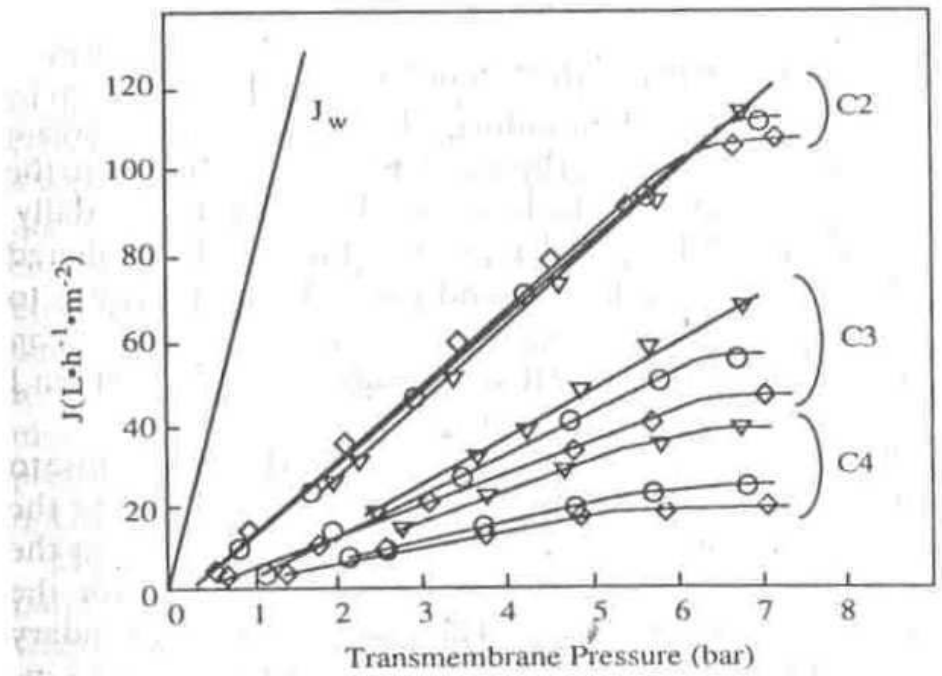


Fig. 4. **Flux (J) *vs.* transmembrane pressure for water (Jw) and concentrates of the 2nd, 3rd and 4th UF stages (C2,C3,C4) at different tangential flow rates (m s^{-1}).**

▽ **8.0**

○ **5.5**

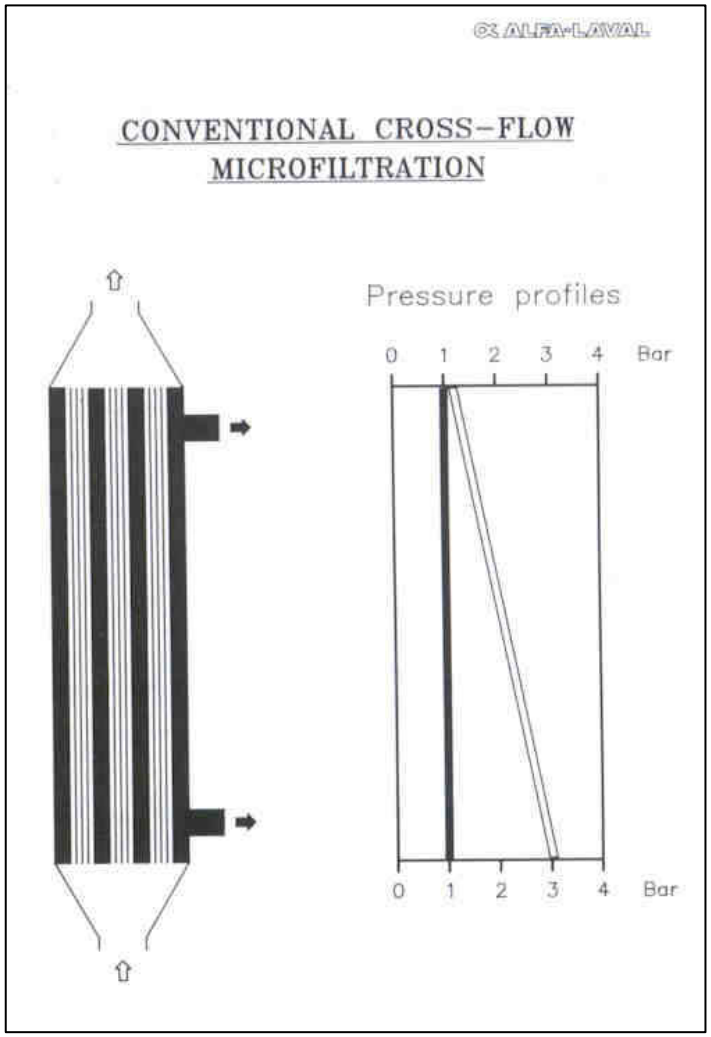
◇ **4.5**

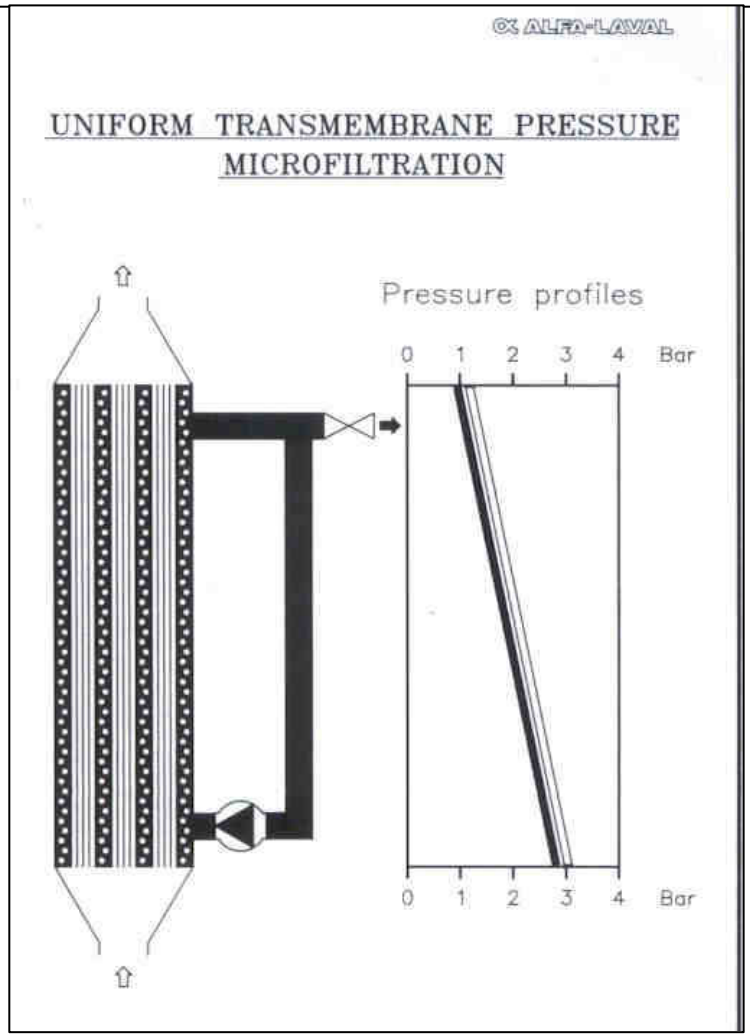
—— **Water (Jw)**

Il flusso di permeazione: effetto su PTM della contropressione del permeato nella MF del latte.

Ricircolando il permeato sotto pressione si ha PTM<, ma **uniforme** lungo tutta l'unità filtrante: si **ritarda la colmatazione** della membrana, fenomeno classico dei processi convenzionali di MF, dovuto alle elevate pressioni idrauliche generate dalla alta velocità di scorrimento tangenziale richiesta e fornita dalle pompe di alimentazione e ricircolo.

Il flusso di permeazione: effetto su PTM della contropressione del permeato nella MF del latte.





Il flusso di permeazione: effetto della concentrazione progressiva del fluido da trattare

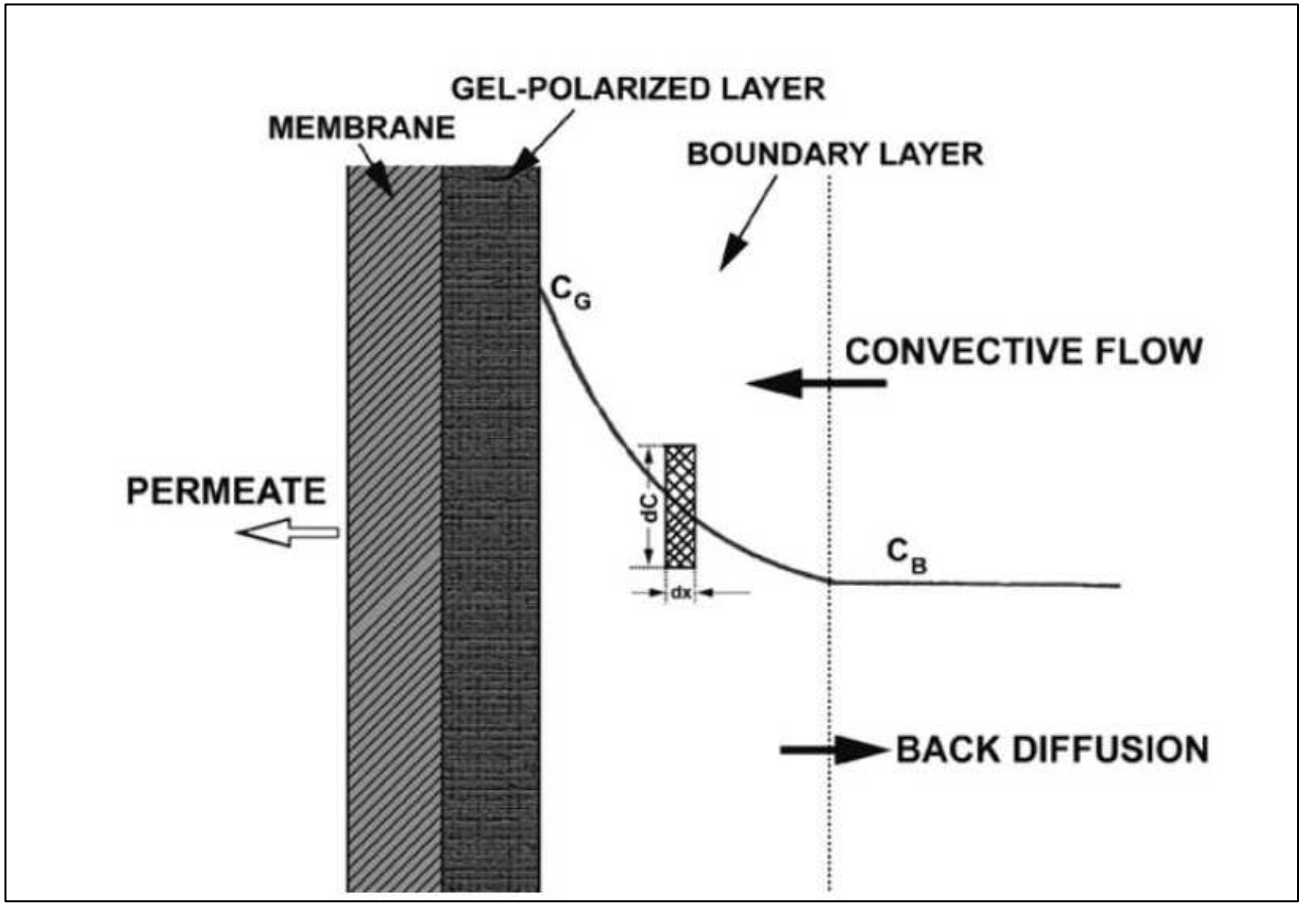
Durante la filtrazione si realizza un gradiente di concentrazione tra la massa del fluido che scorre e il cosiddetto “boundary layer”, ovvero lo strato in prossimità della “pelle” della membrana, dovuto alla rimozione progressiva del solvente (il permeato). Le molecole concentrate nel “boundary layer” per un fenomeno di retrodiffusione tendono tuttavia a riportarsi nella massa del fluido. La **retrodiffusione è correlata negativamente alla pressione applicata.**

Il flusso di permeazione: effetto della concentrazione progressiva del fluido da trattare

All'aumentare della concentrazione del fluido, il flusso di permeazione diminuisce fino ad azzerarsi nel momento in cui la concentrazione della massa del fluido diventa uguale a quella cosiddetta di gel (Cgel) e non si ha più gradiente di concentrazione nel e tra **boundary layer e massa del fluido.**

Inoltre via via che aumenta la concentrazione del fluido, alla resistenza propria della membrana alla permeazione si aggiungono **resistenze supplementari** dovute ai fenomeni di adsorbimento sulla membrana, di polarizzazione della concentrazione nonchè di **colmatazione** della medesima.

Il flusso di permeazione: effetto della concentrazione progressiva del fluido da trattare



CG= concentrazione di gel; CB=concentrazione del fluido - bulk

Valori di Cgel per alcuni sistemi

Fluido da trattare	Cgel (%proteine)
Latte magro	20-25
Latte intero	9-11
Siero	20-30
Albume d'uovo	40
Estratti sgrassati di farina di soia	20-25

Il flusso di permeazione: effetto della concentrazione progressiva del fluido da trattare

Flusso *vs* concentrazione in proteine del latte

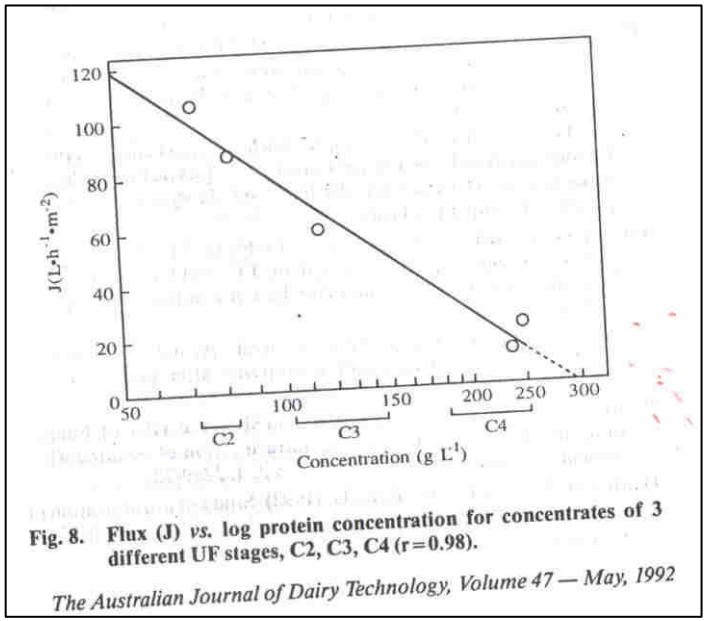
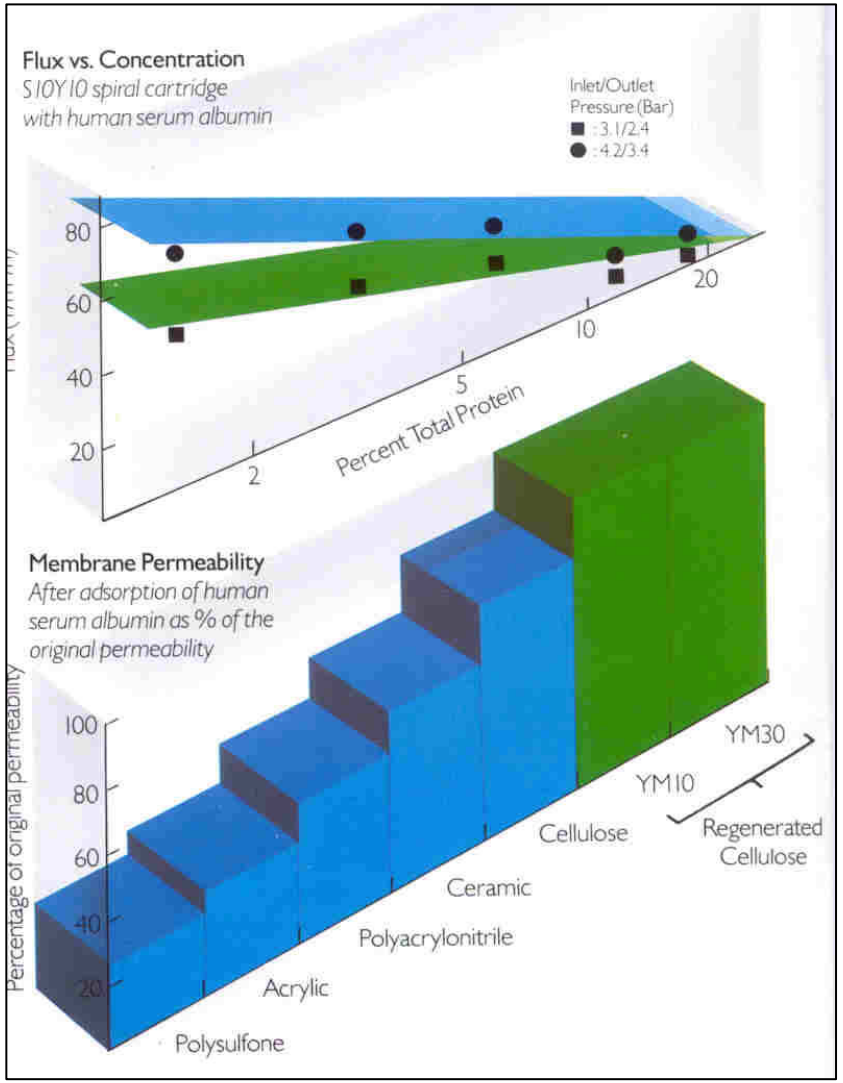


Fig. 8. **Flux (J) *vs.* log protein concentration for concentrates of 3 different UF stages, C2, C3, C4 (r=0.98).**

The Australian Journal of Dairy Technology, Volume 47 — May, 1992



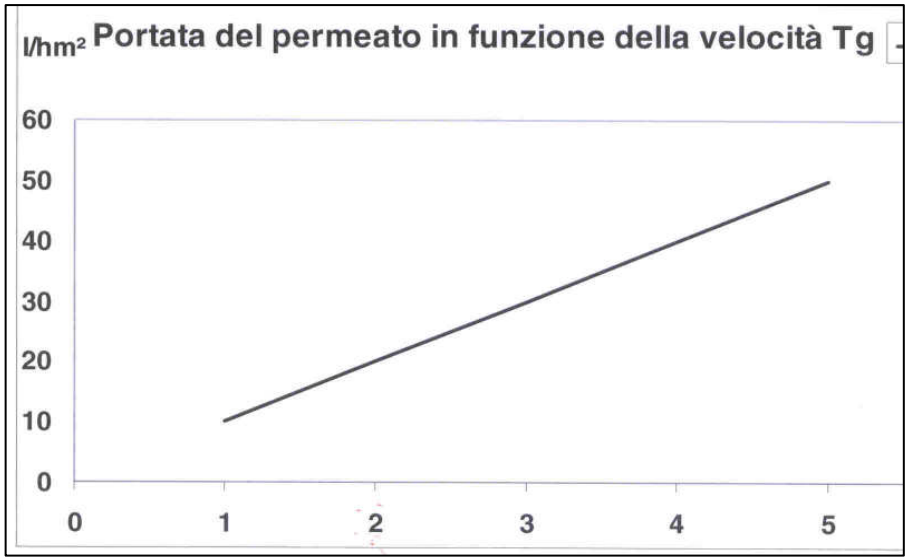
Il flusso di permeazione: effetto della velocità di scorrimento tangenziale

L'aumento della portata del fluido alimentato ne fa aumentare la velocità di scorrimento e con essa il flusso di permeazione J.

Tuttavia questo è valido fin tanto che J si trova nella regione controllata dalla pressione.

Allorché J dipende solo dai meccanismi di diffusione associati al trasporto di materia, per incrementare J occorre promuovere la turbolenza che riduce lo spessore del boundary layer e quindi controlla gli effetti della polarizzazione della concentrazione. *(vedi grafico su slide precedenti)*

Il flusso di permeazione: effetto della velocità di scorrimento tangenziale



Flusso di permeazione vs velocità e concentrazione

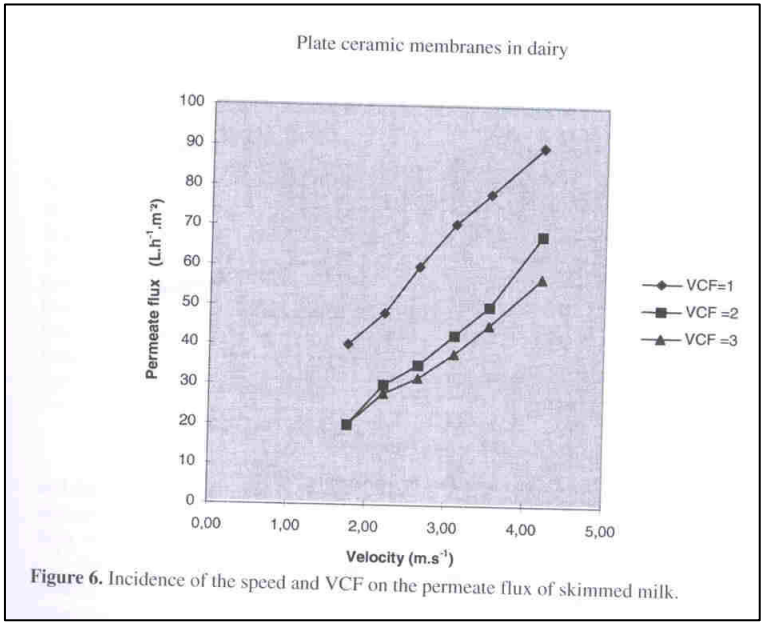


Figure 6. Incidence of the speed and VCF on the permeate flux of skimmed milk.

Il flusso di permeazione ed il fouling delle membrane

- E' un fenomeno per cui la membrana interagisce con alcuni costituenti del fluido e tale interazione porta ad un cambiamento delle prestazioni della membrana:
- Minor flusso di permeazione
- Aumento della capacità di reiezione (non sempre positivo).
- Il fouling è un fenomeno irreversibile e tempo-dipendente e solo parzialmente dipendente dalla concentrazione del fluido, a differenza della polarizzazione della concentrazione che dipende dai parametri operativi (V, PTM,°C, conc dl fluido).
- Per eliminare gli effetti del fouling occorre il lavaggio chimico della membrana.

Componenti di latte o siero che contribuiscono al fouling delle membrane e pretrattamenti per ridurlo.

- **Componenti**
- fini di caseina
- fosfolipidi
- caseinomacropeptide
- caglio
- microrganismi
- sali di calcio e fosforo

- **Pretrattamenti**
- prefiltrazione
- chiarificazione centrifuga
- trattamenti al calore
- modificazioni pH
- agenti chelanti

Strategie per la riduzione del fouling delle membrane

- prevedere la **natura dei componenti** del fluido che possono interagire con la membrana (particelle, proteine, sali, lipidi)
- introdurre opportuni **pretrattamenti** al fluido di processo
- scegliere le **condizioni operative** che minimizzando la polarizzazione della concentrazione ritardino la comparsa degli effetti del fouling
- scegliere **geometrie di membrana** e quindi moduli di filtrazione in accordo con le esigenze di **turbolenza** utili per minimizzare il fouling
- individuare **opportune strategie di lavaggio**, onde ripristinare correttamente le condizioni originarie delle membrane
- backfllushing

Effetti del backflushing sulla permeazione

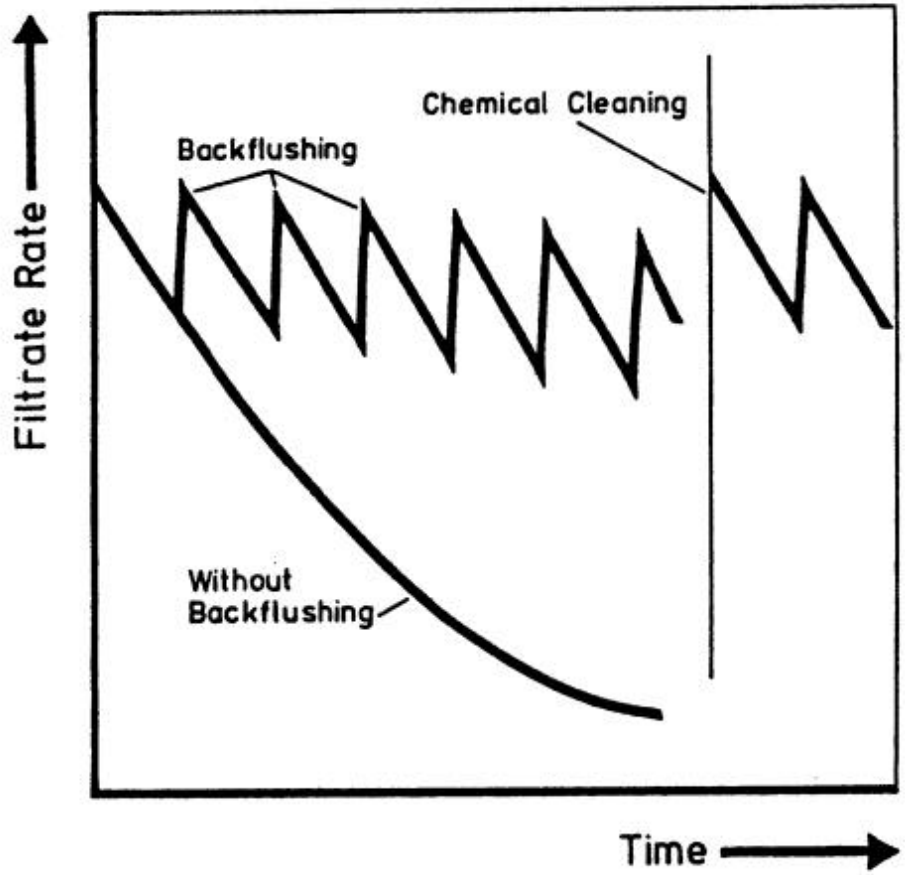


Figure 2.43: Restoration of CFF flux by backflushing and chemical cleaning.

Il lavaggio delle membrane (nel settore caseario)

1. **risciacquo con acqua** (di rete o demineralizzata – UF/OI)
2. **lavaggio chimico** (alcalino)
3. **risciacquo per rimuovere il detergente**
4. **lavaggio chimico** (acido)
5. **risciacquo per rimuovere il detergente**
6. **lavaggio chimico** (alcalino per ripristinare proprietà membrana)
7. **risciacquo per rimuovere il detergente**
8. **sanificazione con agenti ossidanti (es cloro; acido peracetico) compatibili con la membrana ed i moduli**
9. **risciacquo (oppure punti 8-9 per le membrane minerali: sterilizzazione a vapore)**

Condizioni operative di lavaggio di un impianto a membrana

In generale: alta velocità, e bassa pressione (per evitare di comprimere ulteriormente il materiale contro/dentro la membrana.

Back flushing

Temperature e pH compatibili con l'elemento più "debole" del sistema (es. lo spacer di polipropilene o poliestere nei moduli a spirale)

Considerare normative sugli scarichi → no acido fosforico

Backwashing

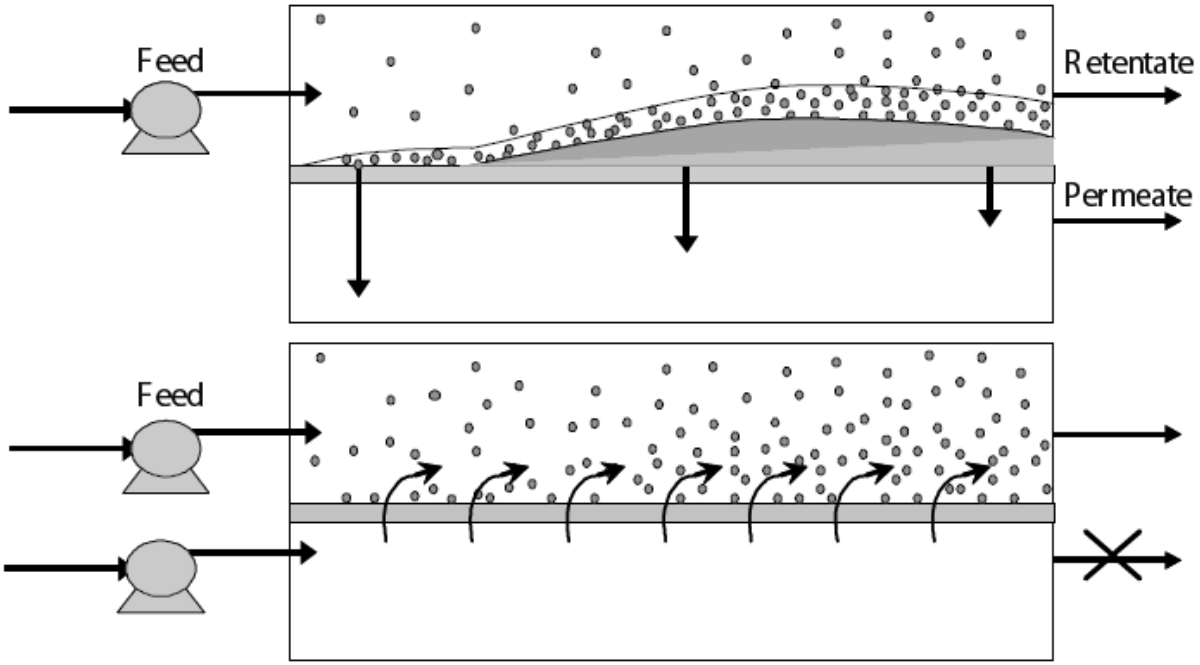


FIGURE 6.22A Backwashing of membrane.

Condizioni operative di lavaggio di un impianto a membrana e non a confronto

impianto non a membrana

- effetti meccanici (turbolenza)
- tempo
- temperatura
- energia chimica

impianto a membrana

- effetti meccanici (turbolenza)
- tempo
- temperatura
- energia chimica
- materiale della membrana
- qualità dell'acqua
- geometria del modulo
- tipo di "sporco"

Il lavaggio delle membrane

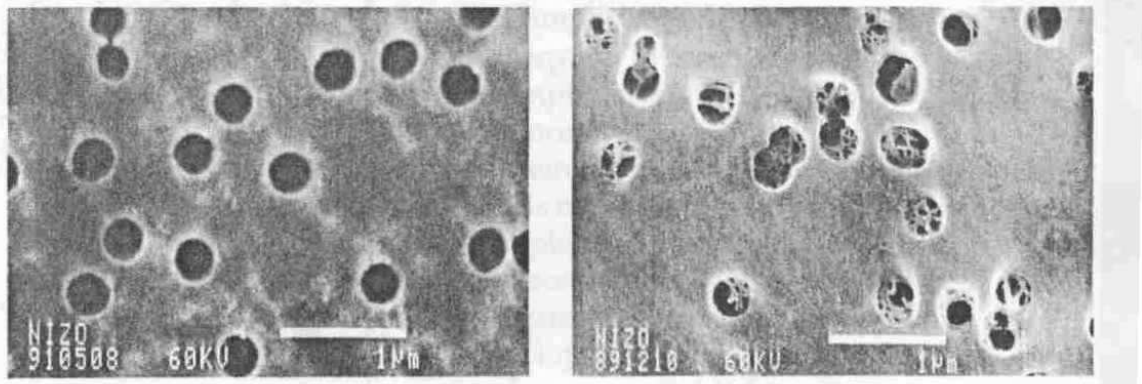
- **L'efficacia del ciclo di lavaggio è verificata misurando il flusso di permeazione di acqua in condizioni standard e paragonando tale valore rispetto a quello della membrana nuova.**

- **Il lavaggio influenza la vita media delle membrane e quindi le condizioni di lavaggio devono essere individuate specificatamente per ogni processo, in quanto non è in gioco solo il costo energetico ed il consumo di detergenti (e relativi costi di depurazione), ma anche la durata delle membrane e quindi la frequenza con la quale interverranno i costi di sostituzione del "pacco membrane".**

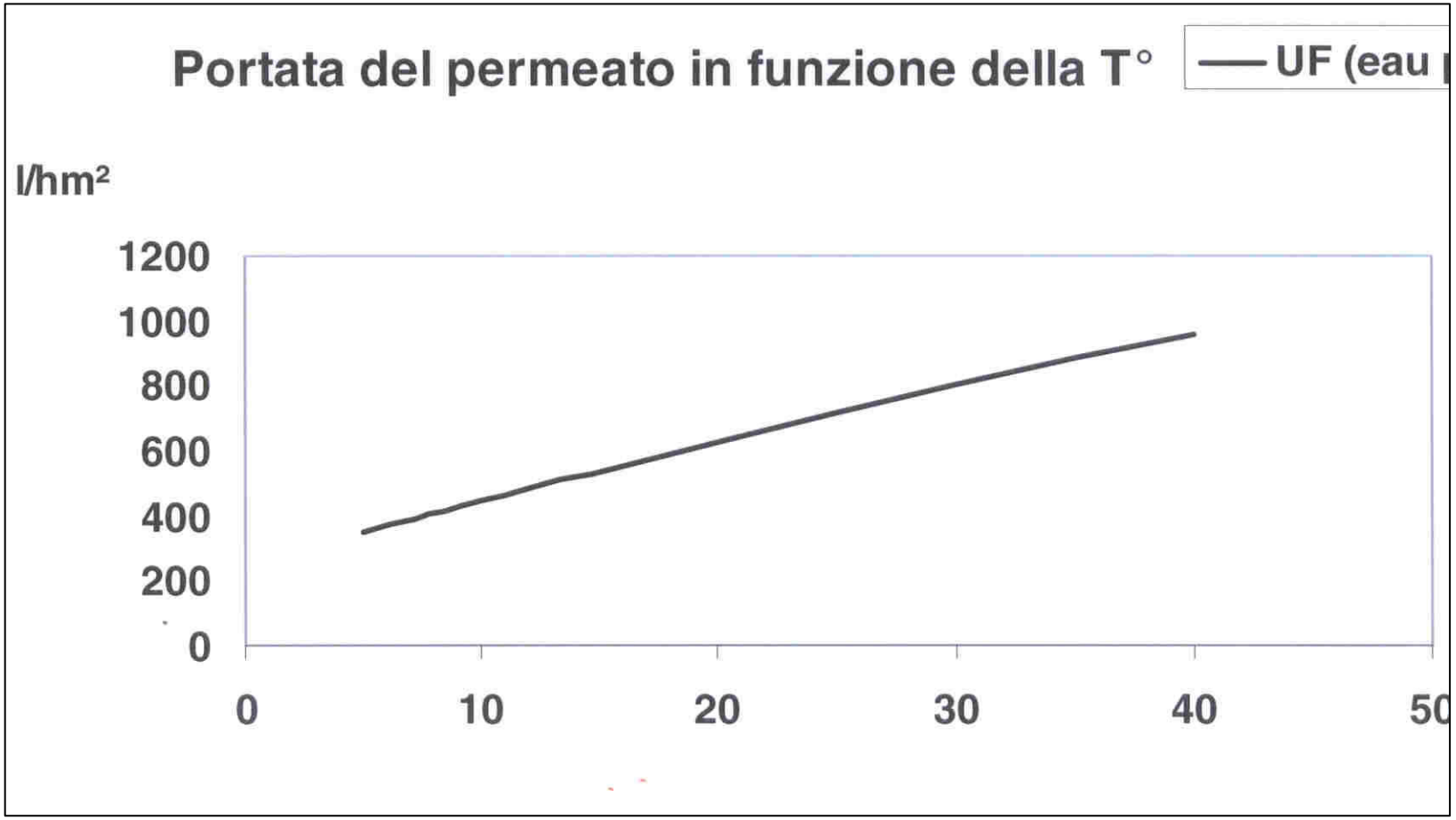
Il flusso di permeazione: effetto della temperatura

- **Il flusso di permeazione J aumenta all'aumentare della temperatura, in quanto diminuisce la viscosità dei fluidi.**
- **Un incremento di temperatura di 30-45°C può portare al raddoppio di J.**
- **La temperatura massima utilizzabile dipende dalle caratteristiche del sistema di filtrazione e del fluido: occorre evitare infatti denaturazioni proteiche o precipitazioni di minerali sia perchè si danneggerebbe il prodotto sia perchè si rischia di incrementare il fouling delle membrane.**

b: pore blocking of a 400 nm membrane (left: clean, right: fouled by bovine serum albumin).



Il flusso di permeazione: effetto della temperatura



Modi operativi con cui condurre un'operazione di filtrazione tangenziale

Processi discontinui monostadio

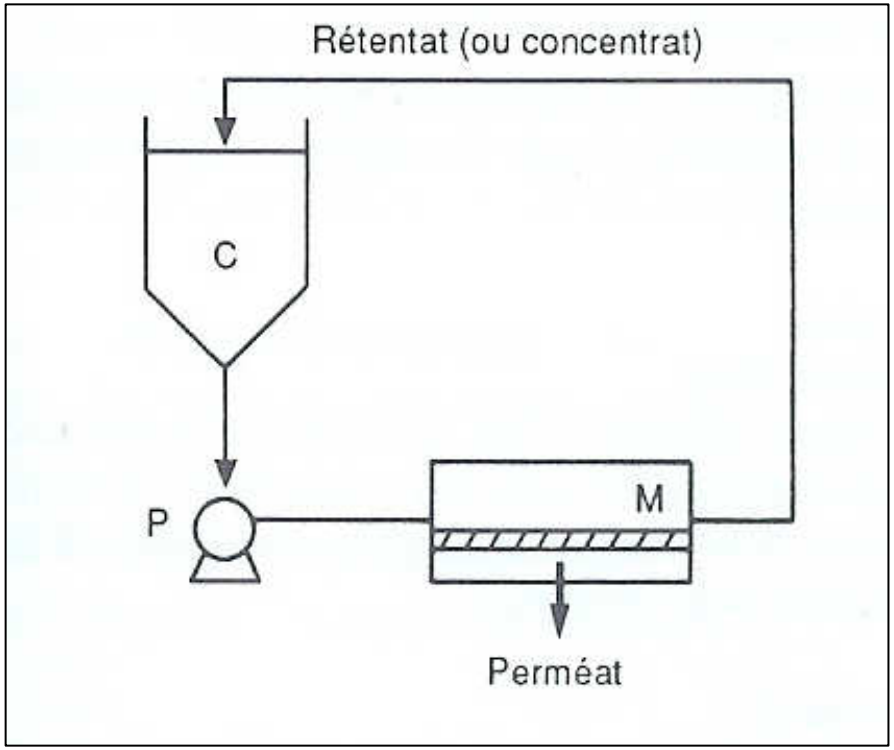
1. **operazioni in batch con ricircolo totale del retentato**
2. **operazioni in batch con parziale ricircolo del retentato**

Processi continui → Tempo ridotto di permanenza del prodotto nell'impianto. Il retentato esce dall'impianto alla concentrazione finale

- **Monostadio per singolo passaggio**
- **Monostadio con ricircolo del retentato (feed and bleed)**

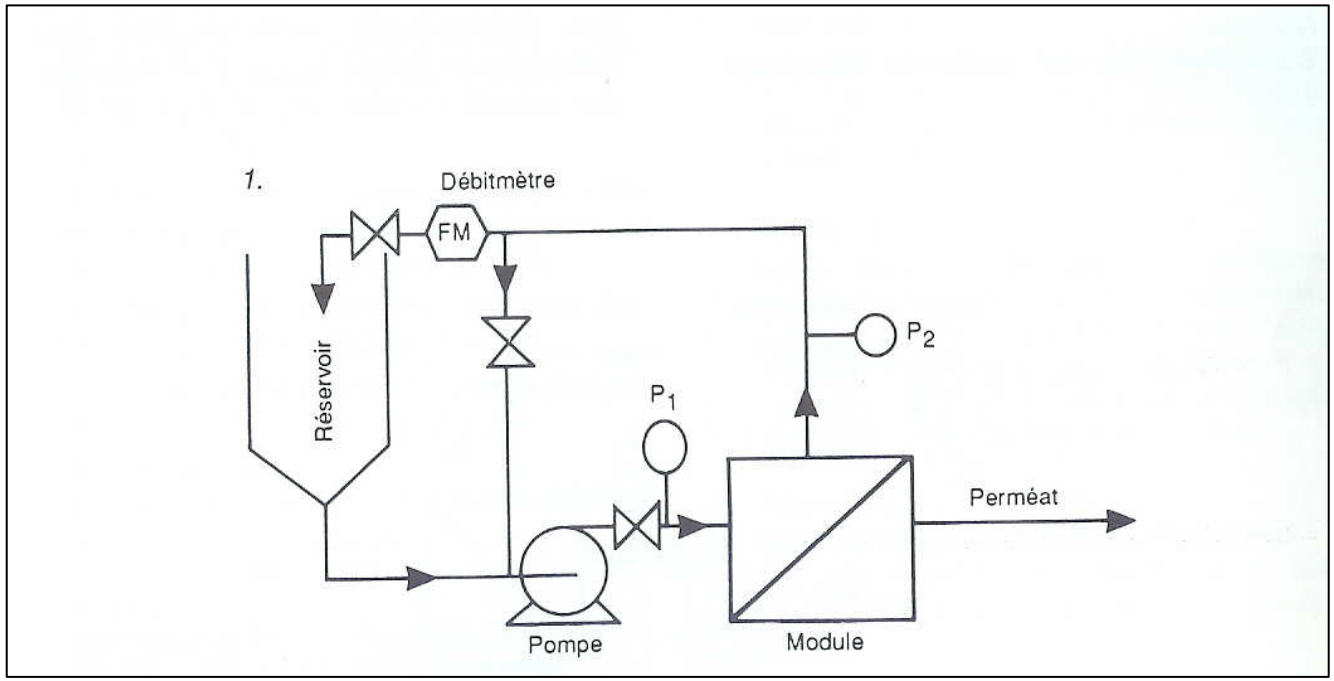
Processi a più stadi o Multistadio (in serie)

Processi discontinui in batch



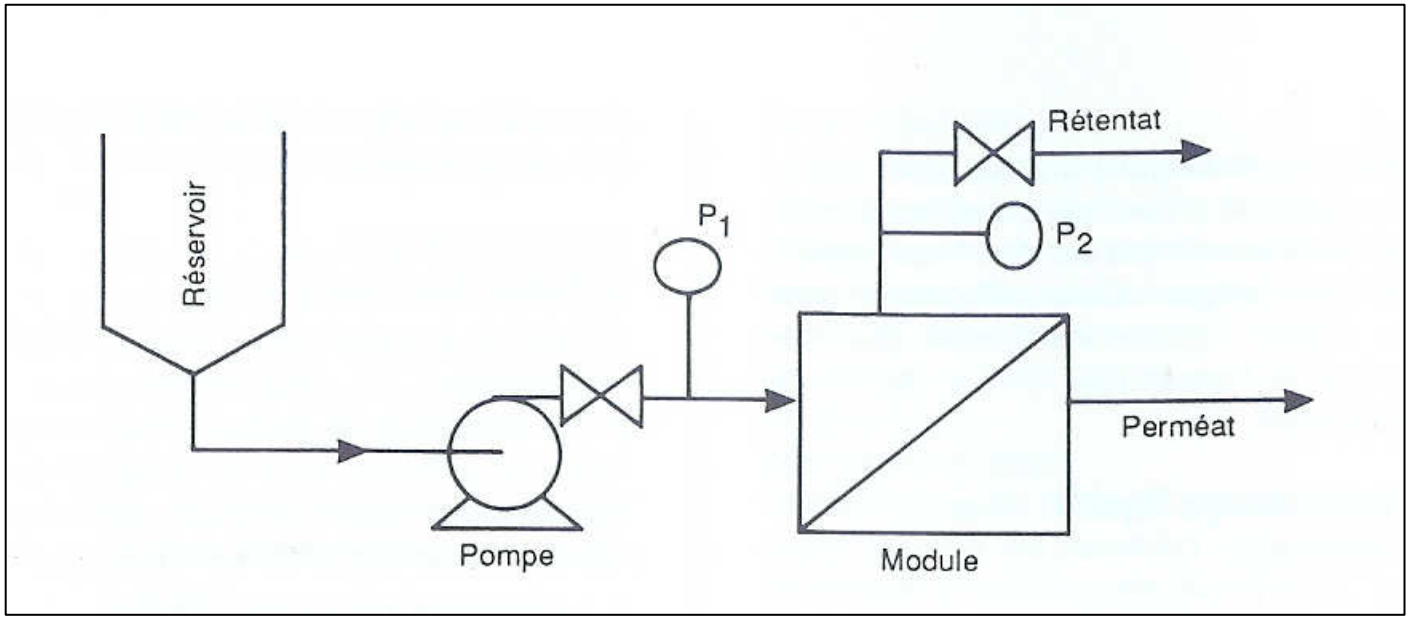
E’ il processo più semplice per concentrare un volume dato con il minimo di superficie di membrana. La totalità del retentato è miscelata con il prodotto da concentrare fin tanto che non è stata raggiunta la concentrazione prevista. Tempo di residenza nell’impianto e compatibilità con il prodotto

Processi discontinui per ricircolazione parziale su pompa



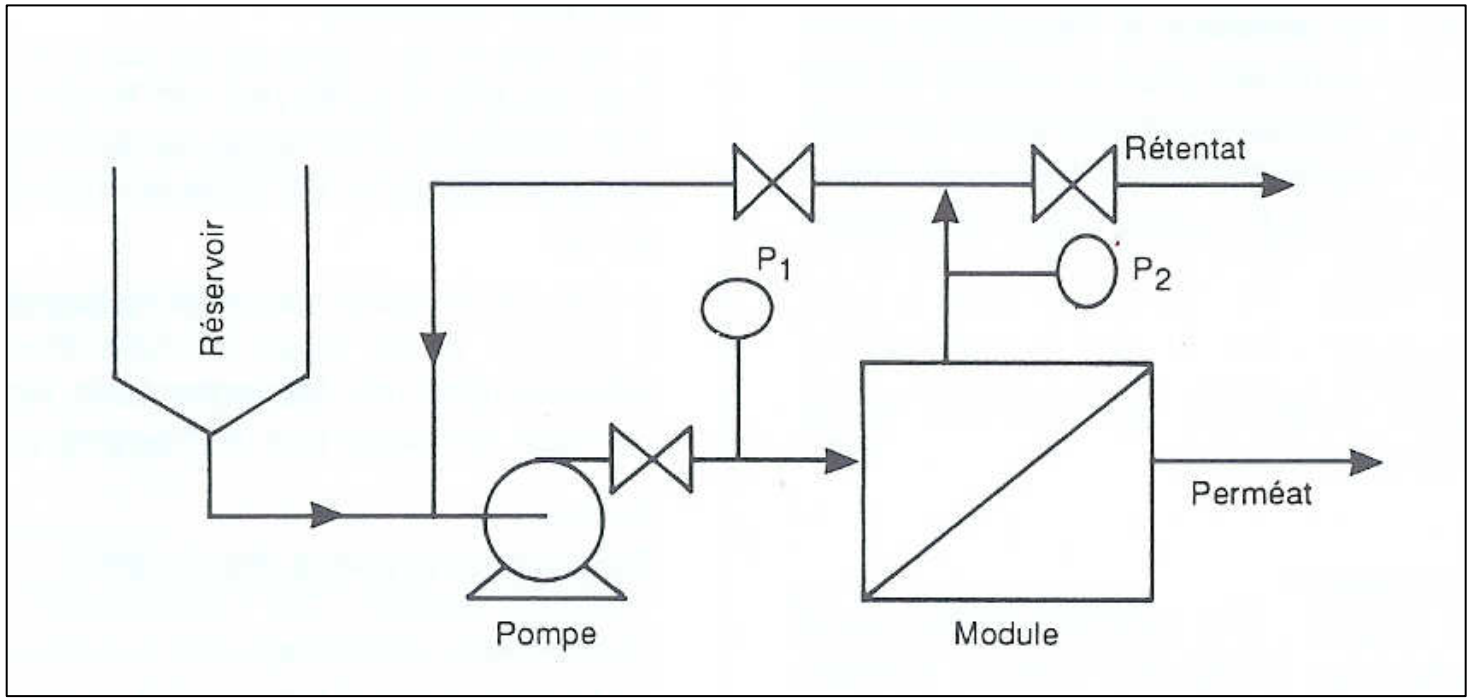
Il procedimento, che invia parte del retentato direttamente sulla pompa di ricircolazione anziché nel serbatoio, ha l'obiettivo di aumentare la velocità di passaggio del fluido sulla membrana

Processo continuo semplice



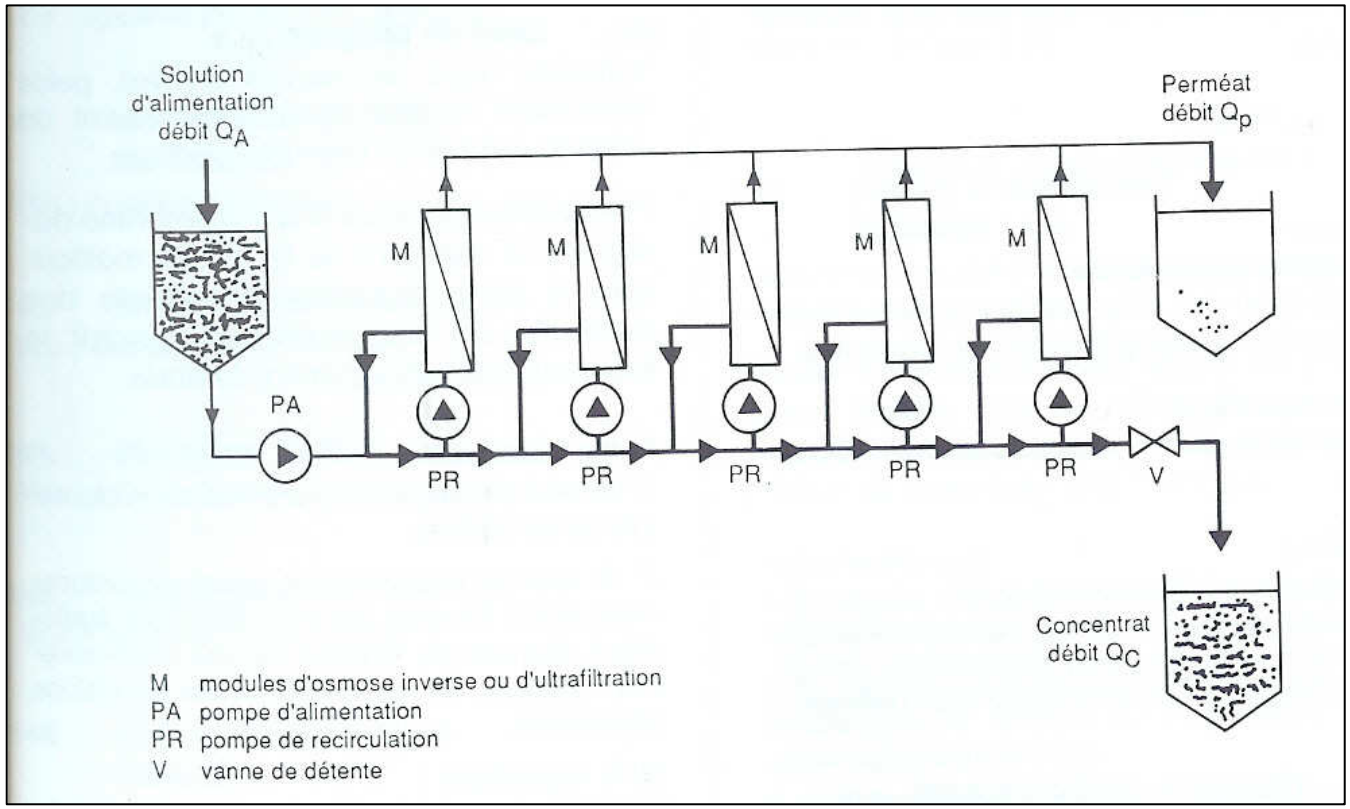
Processo continuo semplice o a singolo passaggio.

Processo continuo a ricircolazione



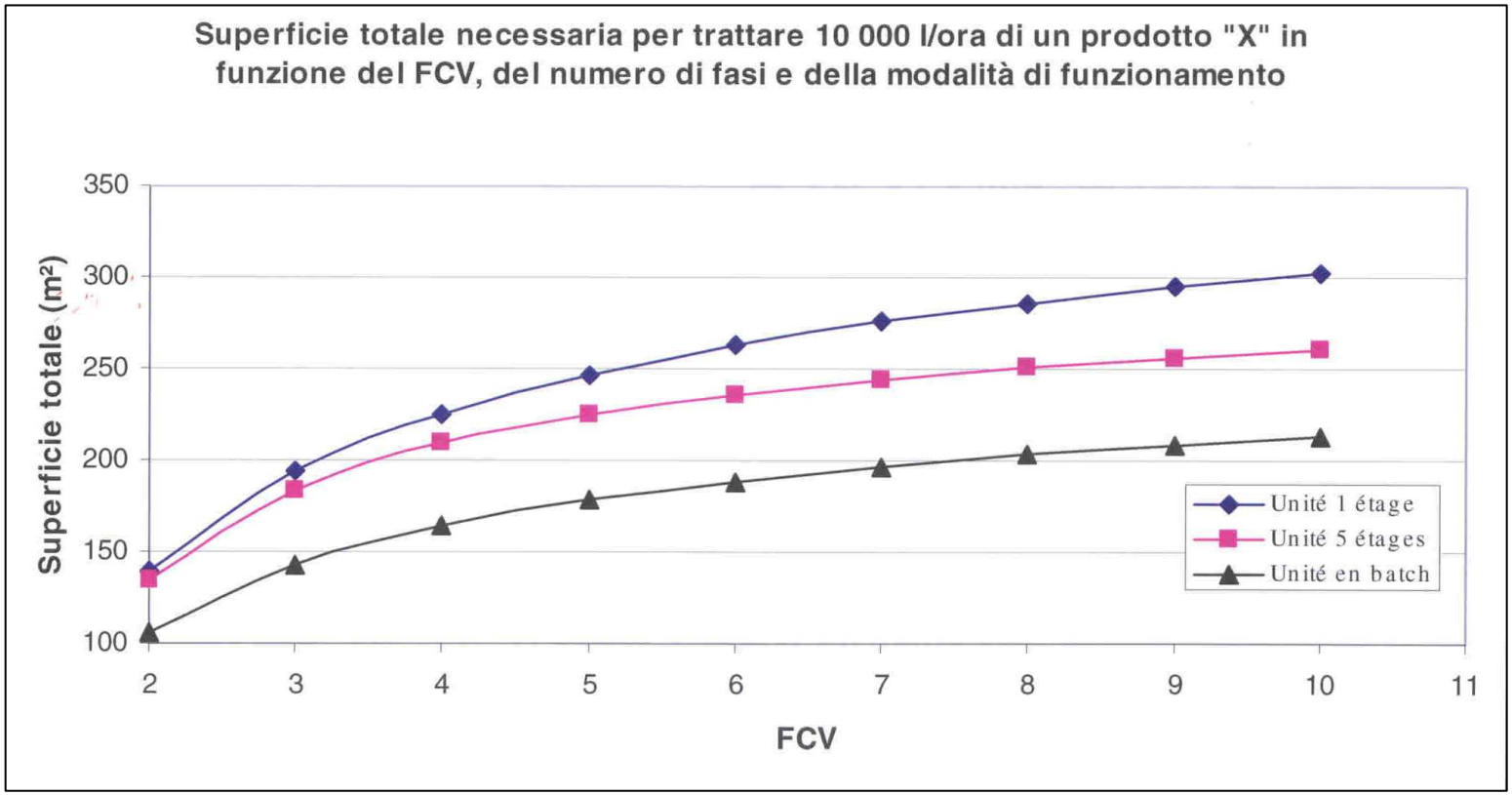
In inglese detto anche “feed and bleed”: parte del retentato è ricircolato sulla pompa per ottenere la concentrazione finale

Processo continuo multistadio



Il concentrato in uscita dal modulo 1 alimenta il successivo etc.
L'assemblaggio dei moduli può essere in serie o in parallelo

Superficie filtrante richiesta da un sistema monostadio in batch o continuo comparato ad uno multistadio



Applicazioni della filtrazione tangenziale:industria alimentare

- **Debatterizzazione, concentrazione e frazionamento del latte**
- **Produzione di Quark**
- **Siero demineralizzazione**
- **Sieroproteine**
- **Rigenerazione salamoie**
- **Chiarificazione di succhi e bevande**
- **Chiarificazione e decolorazione dello zucchero**
- **Stabilizzazione vino e birra**
- **Recupero acque di processo**
- **Recupero detergenti dalle soluzioni di lavaggio**
- **Trattamento reflui**

Applicazioni della filtrazione tangenziale: altri settori

Biotecnologie

- Produzione acqua e soluzioni apirogene
- Reattori a membrana per la produzione di molecole di interesse farmacologico
- Enzimi
- Concentrazione microrganismi (starter, uso probiotico)

Industria meccanica

- Riciclaggio bagni di sgrassaggio
- UF vernici per elettroforesi
- Recupero vernici dalle acque delle cabine di verniciatura

Altre industrie

- riciclaggio coloranti tessili
- Trattamento acque industriali nel settore chimico e nucleare