

CRISTALLIZZAZIONE

4.1 Cristallizzazione

È una **operazione unitaria** che ha lo scopo di recuperare un solido cristallino da una soluzione concentrata. Grazie alla selettività di questa operazione è possibile ottenere un prodotto solido con una **elevata purezza** partendo da soluzioni contenenti impurezze che, nelle condizioni del processo, non cristallizzano e rimangono in soluzione.

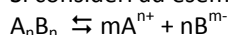
In un processo produttivo la cristallizzazione si colloca di solito dopo l'operazione di concentrazione (evaporazione) e prima della operazione di filtrazione/centrifugazione, come indicato nel seguente schema:



La cristallizzazione viene di solito effettuata a bassa temperatura e quindi è una operazione che richiede poca energia.

Il principio della cristallizzazione è quello di raggiungere la **sovrasaturazione della soluzione** in modo da provocare la **precipitazione** del soluto per superamento della solubilità. La **solubilità** è la massima quantità/concentrazione di soluto che può essere presente in una soluzione senza avere la presenza del precipitato, ovvero del corpo di fondo.

Si consideri ad esempio un soluto ionico poco solubile parzialmente dissociato in soluzione:



$$K_{ps} = [A^{n+}]^m \cdot [B^{m-}]^n \quad \text{prodotto di solubilità, costante a temperatura costante e tabellato}$$

$$PI = [A^{n+}]^m \cdot [B^{m-}]^n \quad \text{prodotto ionico}$$

Il prodotto ionico PI è definito come il prodotto delle concentrazioni degli ioni in soluzione satura (in presenza del corpo di fondo). Il PI permette di definire le condizioni di saturazione o meno della soluzione; infatti in determinate condizioni si ha che:

- se $PI < K_{ps}$ la soluzione è **insatura**
- se $PI = K_{ps}$ la soluzione è **satura**
- se $PI > K_{ps}$ la soluzione è **sovrasatura** (presenza del corpo di fondo)

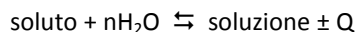
Per ottenere la cristallizzazione del soluto occorrerà trovare le condizioni in cui il PI è maggiore del prodotto di solubilità del soluto che si vuole recuperare.

Per ottenere la condizione di sovrasaturazione vi sono varie modalità operative e quindi altrettanti **metodi di cristallizzazione**:

- per raffreddamento
- per evaporazione del solvente
- per evaporazione e raffreddamento adiabatico

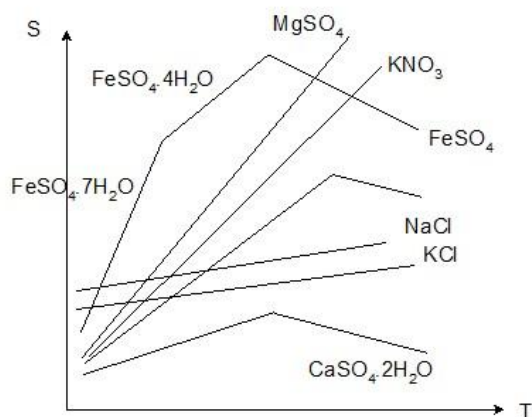
4.2 Solubilità e temperatura

La solubilizzazione di un soluto ad esempio in una soluzione acquosa si può rappresentare nel modo seguente:



dove Q è il calore (ovvero l'entalpia) associata al processo di dissoluzione. Nella maggior parte dei casi lo scioglimento del soluto è un processo **endotermico** ($-Q, +\Delta H$) in quanto viene assorbita energia sotto forma di calore per distruggere il reticolo cristallino del solido. Se si è in presenza di questo caso allora la solubilità del soluto aumenta con l'aumentare della temperatura. Se invece le particelle di soluto in soluzione si idratano (cioè si associano a molecole di acqua) con legami più forti rispetto a quelli presenti nel reticolo cristallino del solido, allora la dissoluzione è **esotermica** ($+Q, -\Delta H$) e in questo caso la solubilità diminuisce all'aumentare della temperatura. Quindi il calore assorbito o ceduto dal sistema soluto-solvente dipende dal prevalere di uno dei due processi: distruzione del reticolo cristallino, idratazione (solvatazione) delle particelle di soluto in soluzione. In alcuni casi (come ad esempio l'NaCl) il processo di dissoluzione è pressoché **atermico**.

La **solubilità dipende dalla temperatura** in vari modi:



S: solubilità (g soluto/100 g H₂O)

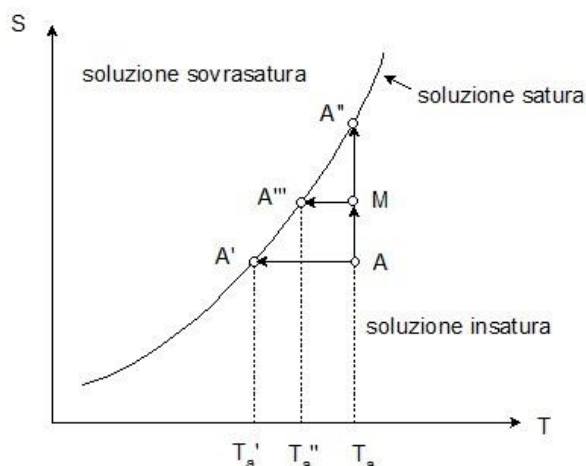
T: temperatura (°C)

Nel grafico sono riportate varie **curve di solubilità** (approssimate a rette per semplicità), che rappresentano come varia la saturazione della soluzione in funzione della temperatura. I punti della curva rappresentano la condizione di saturazione, cioè la massima solubilità del soluto ad una certa temperatura.

Sono possibili vari andamenti:

- per alcune sostanze (NaCl, KCl) la solubilità varia in modo trascurabile con la temperatura perché la solubilizzazione è pressoché atermica
- per altre sostanze (MgSO₄, KNO₃) la solubilità aumenta nettamente con la temperatura perché la solubilizzazione è endotermica
- in altri casi (vari sali idrati) la solubilità aumenta o diminuisce a seconda del campo di temperatura considerato o alla forma idrata del cristallo, in base alla esotermicità o endotermicità del processo di solubilizzazione

4.3 Tecniche di cristallizzazione



Si consideri una generica **curva di solubilità**, ottenuta riportando in grafico la solubilità del soluto (% peso) in funzione della temperatura. Nell'esempio si ipotizza che la solubilità aumenti in modo significativo con la temperatura e quindi la curva di solubilità è inclinata in senso positivo.

La curva rappresenta la soluzione satura, la zona a destra la soluzione insatura, la zona a sinistra la soluzione sovrasatura, nella quale si potrà avere la separazione del soluto in forma cristallina.

Per ottenere il soluto disciolto mediante cristallizzazione sono possibili tre diverse tecniche:

1. **Cristallizzazione per raffreddamento:** dal punto iniziale A alla temperatura T_A in cui la soluzione è insatura, si raffredda fino al punto A' alla temperatura T_{A'}: quando si raggiunge la curva di solubilità la soluzione diventa satura e oltrepassando tale punto si entra nella zona di soluzione sovrasatura, con conseguente cristallizzazione del soluto. Il tratto AA' rappresenta la tecnica di **cristallizzazione per raffreddamento**
2. **Cristallizzazione per evaporazione:** dal punto iniziale A alla temperatura T_A si evapora il solvente a temperatura costante. Poiché la soluzione si concentra aumenta la % di soluto e quindi ci si sposta nel grafico in verticale fino al punto A'', dove la soluzione diventa satura. Oltrepassando tale punto si ha la cristallizzazione del soluto. Il tratto AA'' rappresenta la tecnica di **cristallizzazione per evaporazione**
3. **Cristallizzazione per evaporazione e raffreddamento:** è una combinazione delle due tecniche precedenti. Dal punto iniziale A si evapora il solvente a temperatura costante T_A fino a raggiungere il punto M, in cui la soluzione è ancora insatura. Quindi si raffredda da T_A fino a T_{A''} raggiungendo il punto A'' in cui la soluzione diviene satura. Oltrepassando tale punto si ha la cristallizzazione conseguente precipitazione del soluto. I tratti AM e MA'' rappresentano questa tecnica di evaporazione, che viene attuata sottoponendo la soluzione ad un opportuno grado di vuoto: in tal modo il solvente evapora sottraendo il suo calore latente

alla soluzione, raffreddandola senza scambio di calore con l'esterno. Di conseguenza questa tecnica è denominata **crystallizzazione adiabatica**

4.4 Formazione e crescita dei cristalli

La cristallizzazione di un soluto da una soluzione sovrasatura avviene secondo due successivi meccanismi di formazione dei cristalli:

- **nucleazione**: inizialmente si formano dei **microcristalli**, detti germi cristallini, con una velocità di formazione detta velocità di nucleazione (v_{nucl})
- **accrescimento**: successivamente i germi cristallini aumentano le loro dimensioni formando dei **macrocrystalli**, in seguito a deposizione di strati successivi di soluto sui microcristalli iniziali, con una velocità di formazione detta velocità di accrescimento (v_{accr})

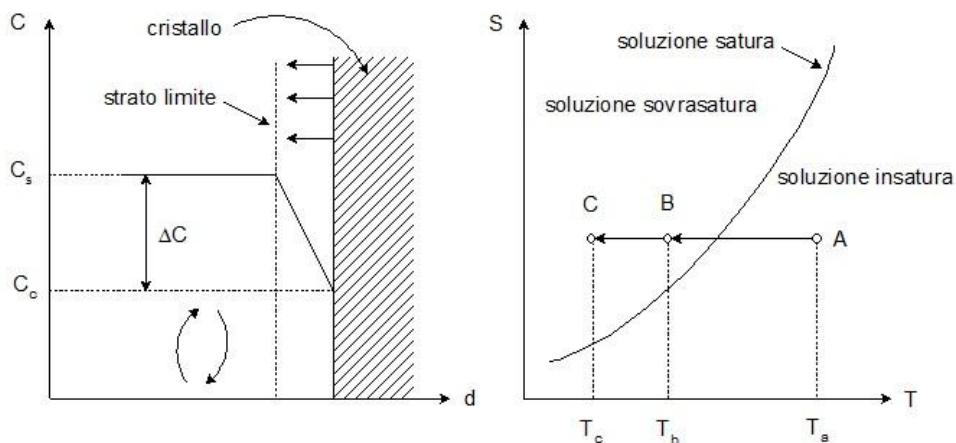
Il risultato finale è determinato dal rapporto delle due velocità: per ottenere **cristalli facilmente lavabili e filtrabili o centrifugabili** è necessario formare inizialmente pochi germi cristallini che abbiano tempo per crescere in modo rilevante. Formando al contrario molti germi cristallini la loro crescita sarebbe minima e quindi si avrebbe un gran numero di piccoli cristalli, che formerebbero un precipitato colloidale difficile da filtrare e lavare per eliminare le impurezze. Infatti in questo caso i piccoli cristalli avrebbero una grande superficie (elevata possibilità di adsorbire impurezze) con cariche elettriche identiche che tendono a respingere i microcristalli e quindi ne impediscono la crescita.

Pertanto:

- se $v_{nucl} > v_{accr}$ allora si forma un elevato numero di microcristalli che in seguito non riescono a crescere in modo soddisfacente
- se $v_{accr} > v_{nucl}$ allora si formano pochi microcristalli che hanno in seguito il tempo di crescere formando i macrocristalli

Pertanto la cristallizzazione va condotta nelle condizioni in cui il rapporto $v_{accr}/v_{nucl} > 1$ nettamente. Per ottenere questo risultato si può agire sulle singole velocità.

La **crescita** dei cristalli è un **fenomeno diffusivo**: la velocità di accrescimento v_{accr} è determinata dal gradiente di concentrazione ΔC che si stabilisce tra il corpo della soluzione, dove i moti convettivi dovuti al rimescolamento mantengono la concentrazione C_s del soluto costante e la superficie del cristallo in accrescimento, dove il deposito delle particelle di soluto all'interno dello strato limite, in cui non avvengono moti di rimescolamento a causa dell'attrito, diminuisce la concentrazione del soluto da C_s a C_c . Per effetto del gradiente di concentrazione, il soluto diffonde dal corpo della soluzione alla superficie del cristallo, dove si deposita rimpiazzando il soluto già depositato e accrescendo il cristallo. Pertanto è opportuno agitare la soluzione per favorire la crescita incrementando la diffusione del soluto, aumentando v_{accr} rispetto a v_{nucl} .



Il rapporto tra le due velocità di formazione dei cristalli dipende inoltre dalla **entità della sovrasaturazione** della soluzione, come mostrato nel grafico precedente. Supponendo di provocare la cristallizzazione per raffreddamento dal punto iniziale A alla temperatura T_A è opportuno raffreddare fino al punto B a T_B . Poiché il punto è vicino alla curva di solubilità la sovrasaturazione è bassa: si formeranno pochi germi cristallini, ovvero si avrà una bassa v_{nucl} . I pochi germi cristallini formati cresceranno, formando macrocristalli facilmente lavabili e separabili dal solvente mediante filtrazione/centrifugazione. Se invece si raffredda fino al punto C a T_C si ha una grande sovrasaturazione e quindi una elevata v_{nucl} dato che il punto è lontano dalla curva di solubilità: in

questo caso si produce un precipitato colloidale, formato da numerosi microcristalli che non riescono a crescere e quindi sono difficilmente lavabili e recuperabili.

Un **esempio** è la produzione di NaHCO_3 mediante il processo Solvay: la reazione di formazione di NaHCO_3 si attua a 60°C , massima temperatura compatibile con la solubilità del precipitato. A tale temperatura la solubilità di NaHCO_3 è piuttosto elevata e quindi si ha una piccola sovrassaturazione della soluzione. In seguito si raffredda a 25°C , minima temperatura compatibile con una elevata velocità di accrescimento dei germi cristallini formati in precedenza. In tal modo si ottengono dei cristalli di elevate dimensioni, con adeguate caratteristiche per il lavaggio e la filtrazione successivi.

Per **migliorare il processo di cristallizzazione** è possibile:

- introdurre nella soluzione germi cristallini che facciano da centri di nucleazione e si accrescano successivamente
- agitare la soluzione, in modo da ridurre lo strato limite attorno ai microcristalli: le particelle che attraversano lo strato per diffusione arriveranno più facilmente sulla superficie in crescita e quindi si avrà una velocità di accrescimento più elevata

Durante la cristallizzazione bisogna fare attenzione alla presenza di **impurezze**, che possono introdursi nel cristallo in crescita, modificare il reticolo cristallino e quindi rendere più difficoltosa la successiva fase di recupero del precipitato.

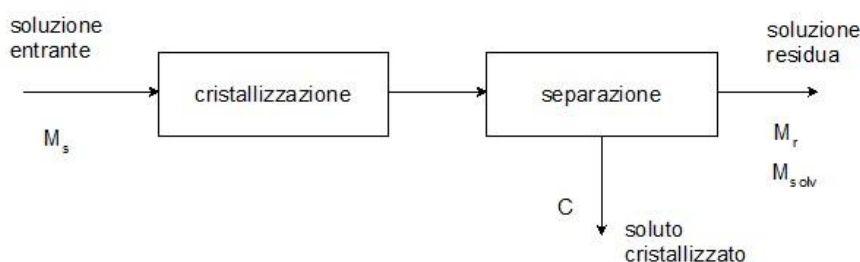
4.5 Resa di cristallizzazione

Il **rendimento o resa di cristallizzazione** η (espresso come %) è il rapporto tra la quantità di solido cristallino ottenuto e la quantità iniziale di soluto presente in soluzione, moltiplicato per 100:

$$\eta = \frac{C}{M_s} \cdot 100$$

dove C è la massa di soluto cristallizzato e M_s la massa di soluto iniziale.

Il rendimento di cristallizzazione si determina mediante il **bilancio di materia** dello stadio di cristallizzazione, tenendo presente in tale bilancio che i cristalli possono essere **anidri** o **idrati**, cioè contenere delle molecole di H_2O di cristallizzazione. L'eventuale acqua presente nel reticolo cristallino ne cambia il tipo e le proprietà: ad esempio il CuSO_4 anidro è bianco mentre il $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (pentaidrato) è azzurro.



Cristalli anidri

Indicando con S la solubilità (g soluto/100 g solvente) alla temperatura alla quale si effettua la cristallizzazione, M_r la massa di soluto residuo ancora in soluzione (cioè non presente nel solido cristallizzato) e con M_{solv} la massa di solvente residua dopo la cristallizzazione si può scrivere:

$$M_r = \frac{S \cdot M_{solv}}{100} \quad \text{sostituendo nell'equazione di bilancio di massa del soluto: } M_s = C + M_r \quad \text{si ottiene:}$$

$$M_s = C + \frac{S \cdot M_{solv}}{100} \quad C = M_s - \frac{S \cdot M_{solv}}{100} \quad C = \frac{100 \cdot M_s - S \cdot M_{solv}}{100}$$

se **non vi è stata evaporazione di solvente** perché la cristallizzazione è stata effettuata mediante raffreddamento.

Se invece **vi è stata evaporazione di solvente** allora l'equazione precedente diventa:

$$C = \frac{100 \cdot M_s - S \cdot M_f}{100}$$

dove M_f è la massa di solvente finale espressa da: $M_f = (M_{solv \text{ iniziale}} - M_s \text{ evaporata})$

Tali equazioni consentono il calcolo di C, cioè della quantità di soluto cristallizzato prodotto. Dopo il calcolo di C è si calcola il rendimento (resa) di cristallizzazione η espresso come %:

$$\eta = \frac{C}{M_s} \cdot 100$$

dove M_s è la massa di soluto iniziale presente in soluzione

Cristalli idrati

In questo caso occorre tenere presente che il soluto cristallizzato C è idrato, cioè contiene molecole di H₂O di cristallizzazione e quindi una parte del solvente (ovviamente si discute il caso di soluzioni acquose!). Ne consegue che nel bilancio totale di materia si deve inserire M_f e non M_{solv} dato che una parte di solvente viene trattenuto dal solido cristallizzato C:

$$M_s = C + M_r \quad M_s = C + \frac{S \cdot M_f}{100}$$

in tale bilancio C rappresenta la massa di soluto anidro, ovvero senza H₂O di cristallizzazione. Si può scrivere che:

$$C = C_i \cdot \frac{P_{an}}{P_i}$$

dove: C_i è la massa di soluto cristallizzato idrato, P_{an} il peso molecolare del precipitato anidro, P_i il peso molecolare del precipitato idrato. Si ha inoltre che:

$$A = (C_i - C)$$

dove A è la massa di H₂O di cristallizzazione. Sostituendo nell'ultima equazione la relazione precedente si ottiene:

$$A = (C_i - C) \quad A = C_i - C_i \cdot \frac{P_{an}}{P_i} \quad A = C_i \cdot \left(1 - \frac{P_{an}}{P_i}\right)$$

L'acqua di cristallizzazione A va sottratta alla massa di solvente residua M_{solv} per ottenere M_f ovvero la massa effettiva di solvente che rimane come residuo al termine della cristallizzazione:

$$M_f = M_{solv} - A \quad \text{e sostituendo la precedente espressione di A si ricava infine;}$$

$$M_f = M_{solv} - C_i \cdot \left(1 - \frac{P_{an}}{P_i}\right)$$

Si ritorna a questo punto al bilancio di materia iniziale, sostituendo le espressioni di C e di M_f:

$$M_s = C + \frac{S \cdot M_f}{100}$$

$$M_s = C_i \cdot \frac{P_{an}}{P_i} + \frac{S \cdot [M_{solv} - C_i \cdot (1 - \frac{P_{an}}{P_i})]}{100}$$

Si risolve rispetto a C_i e si indica con K il rapporto: K = P_i/P_{an} ottenendo, dopo una serie di passaggi:

$$C_i = \frac{100 \cdot M_s - S \cdot M_{solv}}{100 - S \cdot (K - 1)} \cdot K$$

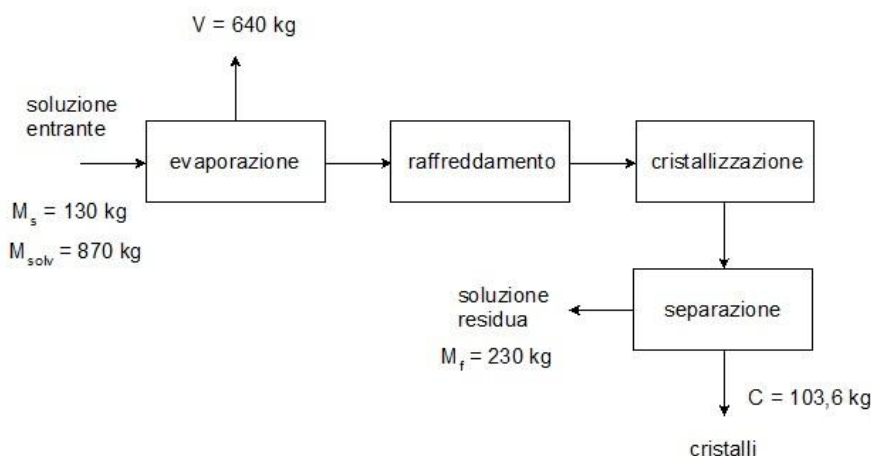
Questa equazione permette di calcolare C_i. Noto C_i si calcola C e quindi è possibile calcolare anche in questo caso il rendimento (resa) di cristallizzazione η espresso come %:

$$\eta = \frac{C}{M_s} \cdot 100$$

Vengono ora proposti due **esercizi di calcolo** sulla cristallizzazione.

Esercizio 1 - 1000 kg di una soluzione al 13% di K₂Cr₂O₇ sono sottoposti a cristallizzazione per evaporazione. Vengono allontanati 640 kg di solvente e la soluzione risultante viene raffreddata a 20°C. A questa temperatura la solubilità del sale è: S = 0,39 moli/100 g di acqua, cioè 11,46 g/100 g di solvente. Determinare la resa di cristallizzazione.

Si costruisce lo schema dell'operazione:



Calcolo massa solvente residua

$$M_s = 1000 \cdot \frac{13}{100} = 130 \text{ kg} \quad \text{massa soluto iniziale}$$

$$M_{solv} = (1000 - 130) = 870 \text{ kg} \quad \text{massa solvente iniziale}$$

$$M_{s \text{ evaporata}} = 640 \text{ kg} \quad \text{massa solvente evaporata}$$

$$M_f = (M_{\text{solv iniziale}} - M_s \text{ evaporata}) \quad M_f = (870 - 640) = 230 \text{ kg} \quad \text{massa solvente residua}$$

Calcolo massa prodotto cristallizzato

Si considera il bilancio di materia con evaporazione del solvente:

$$C = \frac{100 \cdot M_s - S \cdot M_f}{100}$$

$$C = \frac{100 \cdot 130 - 11,46 \cdot 230}{100} = 103,6 \text{ kg} \quad \text{massa di } K_2Cr_2O_7 \text{ cristallizzata}$$

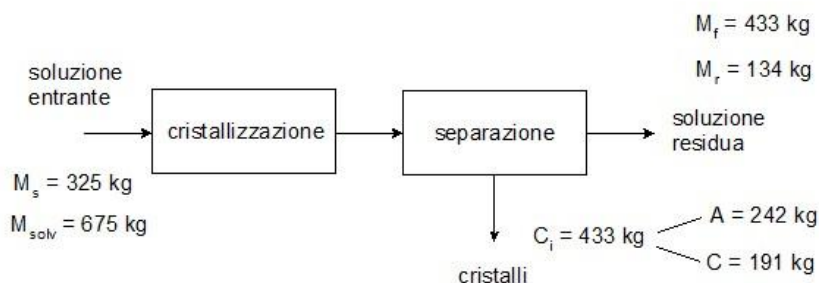
Calcolo resa di cristallizzazione

$$\eta = \frac{C}{M_s} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{103,6}{130} \cdot 100 = 79,7\% \quad \text{resa di cristallizzazione}$$

Esercizio 2 - 1000 kg di una soluzione acquosa al 32,5% in peso di Na_2SO_4 vengono cristallizzati per raffreddamento alla temperatura di 27°C. Il prodotto cristallizzato è costituito da $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ($PM_{\text{anidro}} = 142 \text{ g/mole}$, $PM_{\text{decaidrato}} = 322 \text{ g/mole}$) con una solubilità di 31 kg/100 kg di acqua. Determinare la massa e la composizione delle correnti in uscita e la resa di cristallizzazione.

Si costruisce lo schema dell'operazione:



Calcolo massa soluto e solvente iniziali

$$M_s = 1000 \cdot \frac{32,5}{100} = 325 \text{ kg} \quad \text{massa soluto iniziale}$$

$$M_{\text{solv}} = (1000 - 325) = 675 \text{ kg} \quad \text{massa solvente iniziale}$$

Calcolo massa soluto cristallizzato

Si considera che la cristallizzazione avviene per raffreddamento e si ottiene un cristallizzato idrato

$$C_i = \frac{100 \cdot M_s - S \cdot M_{\text{solv}} \cdot K}{100 - S \cdot (K - 1)}$$

$$K = \frac{P_i}{P_{an}} \quad K = \frac{322}{142} = 2,27 \quad \text{rapporto tra i pesi molecolari}$$

$$C_i = \frac{(100 \cdot 325 - 31 \cdot 675)}{100 - 31 \cdot (2,27 - 1)} \cdot 2,27 = 433 \text{ kg} \quad \text{massa soluto cristallizzato}$$

Calcolo massa acqua di cristallizzazione

$$C = C_i \cdot \frac{P_{an}}{P_i}$$

$$C = 433 \cdot \frac{142}{322} = 191 \text{ kg} \quad \text{massa soluto cristallizzato anidro}$$

$$A = (C_i - C) \quad A = (433 - 191) = 242 \text{ kg} \quad \text{massa acqua di cristallizzazione}$$

Calcolo masse correnti in uscita

Si calcolano le correnti in uscita dal sistema di cristallizzazione

$$M_f = (M_{\text{solv}} - A) \quad M_f = (675 - 242) = 433 \text{ kg} \quad \text{massa solvente residua dopo la cristallizzazione}$$

$$M_r = (M_s - C) \quad M_r = (325 - 191) = 134 \text{ kg} \quad \text{massa soluto residua non cristallizzato (in soluzione)}$$

Calcolo resa di cristallizzazione

$$\eta = \frac{C}{M_s} \cdot 100$$

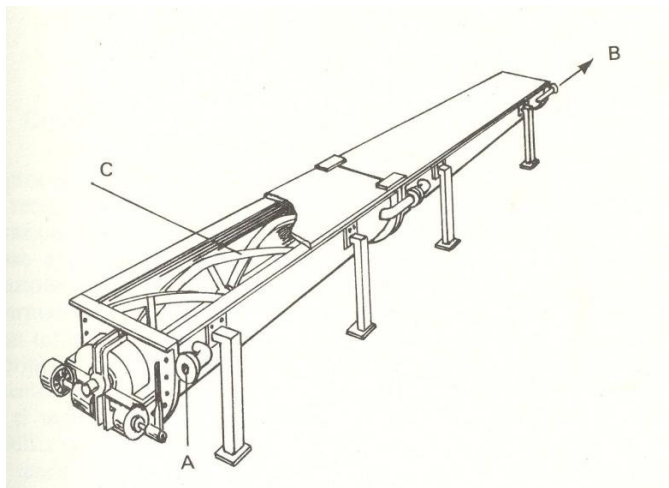
$$\eta = \frac{191}{325} \cdot 100 = 58,8\% \quad \text{resa di cristallizzazione}$$

In conclusione:

- entrano nel sistema di cristallizzazione 1000 kg di soluzione al 32,5% di Na_2SO_4 costituiti da: 325 kg di soluto e 675 kg di solvente (acqua)
- vengono cristallizzati per raffreddamento a 27°C in modo da ottenere un cristallizzato decaidrato cioè $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- al termine della operazione si ottengono in uscita dal sistema di cristallizzazione e di separazione: 433 kg di prodotto solido cristallizzato (191 kg di prodotto anidro e 242 kg di acqua di cristallizzazione) e 567 kg di soluzione residua (134 kg di soluto non cristallizzato e 433 kg di acqua). Ovviamente vale il bilancio di massa complessivo: $(433 + 567) = 1000$ kg
- la resa di cristallizzazione risulta pertanto del 58,8%

4.6 Apparecchi per la cristallizzazione

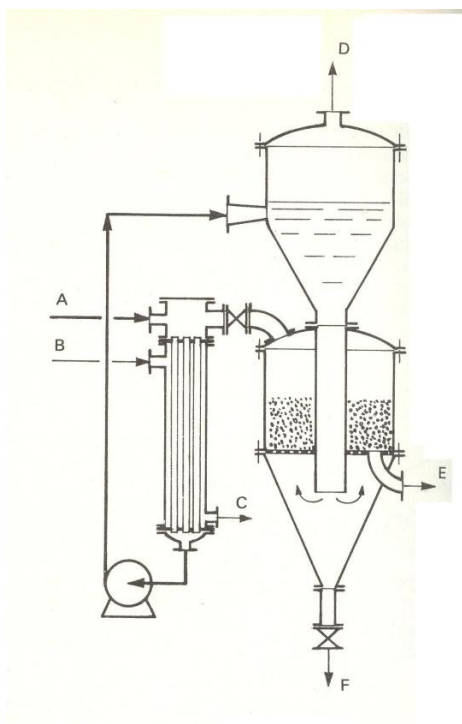
4.6.1 Cristallizzatori a raffreddamento



Il più comune è il **cristallizzatore Swenson-Walker**. E' un cristallizzatore continuo, costituito da un canale semicilindrico largo 70 cm e lungo 3 m in unità modulari che possono essere collegate in serie (nella figura vi sono 2 unità). Una doppia parete forma una intercapedine in cui scorre una corrente di acqua di raffreddamento (A ingresso acqua, B uscita acqua), che permette di mantenere temperature diverse nei diversi punti. La soluzione da cristallizzare viene introdotta nel canale, di solito in controcorrente rispetto all'acqua e, per raffreddamento, si ha la separazione dei cristalli.

All'interno del canale vi è un agitatore-raschiatore a coclea (C), che rimescola la soluzione, favorendo l'accrescimento dei cristalli e li spinge lentamente verso l'uscita, dove è presente una coclea ortogonale al canale, che li preleva e li invia a successive lavorazioni. Con questo apparecchio si ha la produzione di cristalli con dimensioni uniformi ma il movimento del raschiatore tende a spezzarli in frammenti più piccoli.

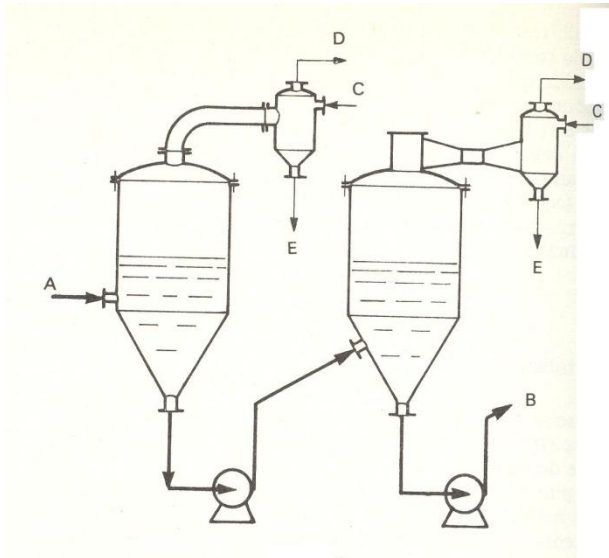
4.6.2 Cristallizzatori a evaporazione



Il più comune è il **cristallizzatore tipo Oslo o Kristal**. Si tratta di un apparecchio continuo verticale a raffreddamento adiabatico, con grandi potenzialità, costituito da due corpi sovrapposti.

La soluzione da cristallizzare viene riscaldata in uno scambiatore a fascio tubiero eterno (A ingresso), alimentato con vapore di rete (B ingresso, C uscita condensa) e quindi passa nel corpo superiore del cristallizzatore, collegato a un sistema a vuoto, dove il solvente evapora parzialmente ed esce come vapore da D. L'evaporazione, che avviene in modo adiabatico, sottrae calore alla soluzione concentrata, che si raffredda e passa nel corpo inferiore, dove risale attraverso una griglia di sostegno e, essendo ora sovrassatura, deposita una parte del soluto, formando un letto di cristalli. La soluzione residua viene riciclata nello scambiatore, dove viene nuovamente riscaldata e quindi ritorna nel cristallizzatore per un ciclo successivo di raffreddamento e deposito di cristalli. Pertanto il letto di cristalli cresce e ad un certo punto viene estratto da E, mentre la soluzione esausta viene scaricata da F.

4.6.3 Cristallizzatori adiabatici



Sfruttano il principio dell'**evaporazione flash**. Una soluzione satura al punto di ebollizione viene inviata nel cristallizzatore (A), dove si lavora in depressione grazie ad un sistema a vuoto, ad esempio un eiettore, alimentato con vapore a media-alta pressione (C). Il solvente evapora istantaneamente in modo adiabatico, sottraendo il suo calore latente di evaporazione alla soluzione, che si raffredda e quindi diventa sovrasatura, causando la precipitazione del soluto. Il vapore viene aspirato dall'eiettore ed esce in E mentre gli incondensabili escono in D.

I cristalli si depositano sul fondo e da lì possono essere estratti. E' possibile collegare più cristallizzatori in serie, inviando la sospensione dei cristalli nell'apparecchio successivo, dove aumenta il grado di vuoto.

Nella figura è rappresentato un sistema di cristallizzazione adiabatico con 2 apparecchi di cristallizzazione: la soluzione iniziale entra in A mentre la sospensione dei cristalli ottenuti e delle acque madri residue esce in B dal sistema e viene inviato al sistema di separazione (filtrazione o centrifugazione).