

# Appunti di Ingegneria Sanitaria Ambientale

(Corso Laurea Triennale 2014/2015)

Prof. Pirozzi

Anna Berrino

N.B.: Si dice sempre tubazioni, non tubature.

Obiettivo dell'ingegneria sanitaria ambientale è da un lato quello di depurare le acque di scarico al fine di non inquinare le falde, dall'altro quello di potabilizzare l'acqua prima dell'invio all'utenza.

## Distribuzione dell'acqua sul pianeta

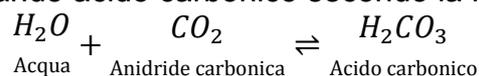
L'acqua è il composto maggiormente presente sul nostro pianeta. In particolare sulla Terra vi sono circa  $13.600.000.000 \text{ Km}^3$  d'acqua, tuttavia non tutta è della stessa qualità.

- Il mare contiene il 97% del totale d'acqua, ma presenta un'eccessiva quantità di sale e non è utilizzabile né per uso potabile né per l'irrigazione;
- I ghiacciai costituiscono il 2,2% dell'acqua, ma anch'essa non è utilizzabile. Tale acqua è ferma perché i ghiacciai hanno un ricambio in un tempo dell'ordine di migliaia di anni;
- L'aliquota restante, seppur in percentuale molto bassa, è l'acqua potabile.

## Ciclo idrologico naturale

Il ciclo idrologico naturale è il processo compiuto dalle particelle d'acqua per effetto di fenomeni naturali, all'interno dell'idrosfera terrestre.

Consideriamo le particelle d'acqua in sospensione costituenti una nuvola. In questa circostanza l' $H_2O$  è pura. Quando le gocce d'acqua sospese unendosi tra loro diventano sufficientemente pesanti, l'acqua precipita sulla superficie terrestre sotto forma di pioggia, neve o grandine. Precipitando, l'acqua si arricchisce di sostanze costituenti l'atmosfera, come  $O_2$  ed  $N_2$ . Scendendo verso gli strati più bassi si arricchisce anche di  $CO_2$ , con il quale l'acqua reagisce formando acido carbonico secondo la reazione di equilibrio



Quindi l'acqua piovana, cadendo, si arricchisce in  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ , acido carbonico e anche microorganismi. A questo punto l'acqua può giungere in mare, su terreno montuoso o su terreno pianeggiante. Se la pioggia cade su di un terreno montuoso calcareo, come ad esempio quello degli appennini, l'acqua, che contiene  $CO_2$ , reagisce con il carbonato di calcio secondo la reazione



Il bicarbonato di calcio è molto solubile in acqua e si muove con essa. Dunque l'acqua si arricchisce in  $Ca^{2+}$  ed  $HCO_3^-$  mentre la montagna si erode. Questo fenomeno è detto del *carsismo*.

Se la pioggia cade sul suolo pianeggiante, in parte ruscella e in parte si infiltra alimentando le falde acquifere. Queste piogge, già ricche delle sostanze atmosferiche, tendono a reagire anche con le sostanze presenti nel suolo con le quali vengono a contatto. In particolare in questa fase l'acqua delle nostre zone si arricchisce di *Fe*, *Mn* e *As* (ferro, magnesio e arsenio) in quanto il terreno è vulcanico.

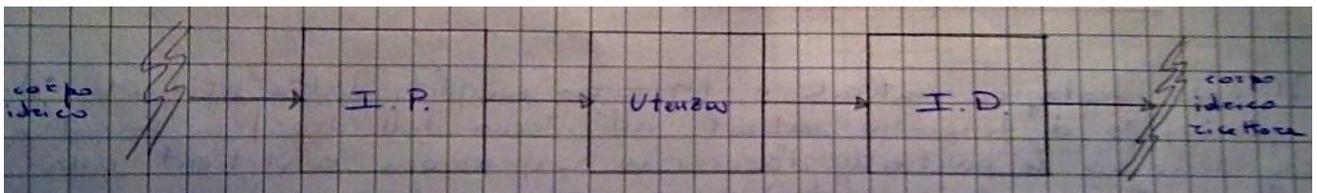
In ogni caso, ruscellando o infiltrandosi, l'acqua giunge infine in mare. Il mare, i laghi e i fiumi sono dei serbatoi d'acqua dai quali l' $H_2O$  può evaporare e ricondensare nell'atmosfera, dando nuovamente vita al ciclo.

## Ciclo dell'acqua sottoposta a trattamenti antropologici

Per poter utilizzare l'acqua per fini antropologici (ad esempio nei centri urbani, nelle industrie, ecc.), questa va quasi sempre trattata, in quanto non idonea allo scopo. Quindi si individua un corpo idrico da cui prelevarla e, prima di inviarla all'utenza, si interviene con un impianto in cui se ne modificano le caratteristiche. Tali impianti sono detti impianti di trattamento delle acque di approvvigionamento o, nel caso particolare in cui l'utenza sia un sito urbano e quindi l'acqua deve essere resa potabile, si parla di impianti di potabilizzazione (I.P.).

Dall'utenza l'acqua viene poi restituita all'ambiente in un corpo idrico ricettore. Tuttavia non deve accadere che l'acqua, che si è contaminata, vada ad alterare gli equilibri che sussistono in esso. Per questo motivo si utilizzano degli impianti detti impianti di trattamento delle acque reflue o, più sinteticamente, impianti di depurazione (I.D.).

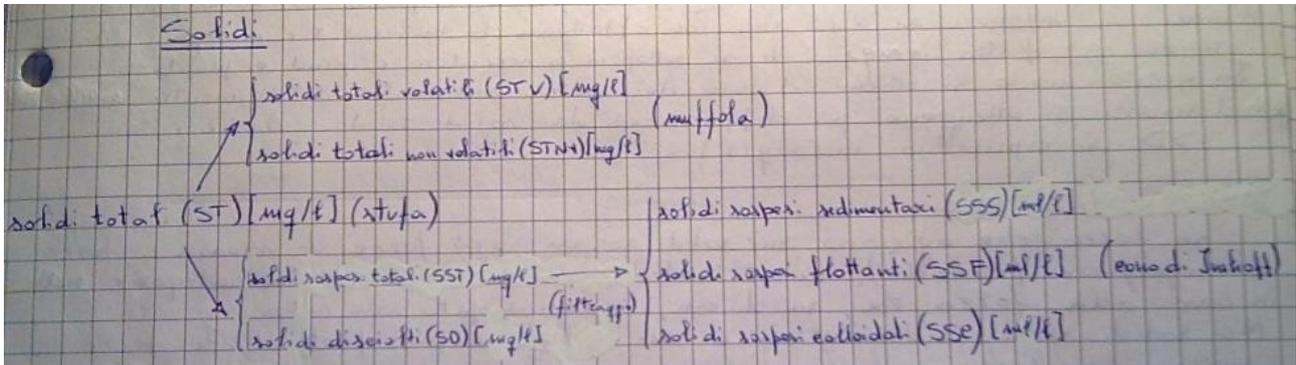
Schematicamente



## Metodi di misura della qualità dell'acqua

Da un punto di vista tecnico è possibile misurare tutti i composti presenti nell'acqua, eseguendo dunque un'analisi rigorosa. Questo metodo, tuttavia, presenta evidenti controindicazioni di costi e di tempo necessari. Per risolvere il problema sono stati introdotti una serie di parametri che permettono di classificare la qualità dell'acqua. Questi conferiscono informazioni certamente meno precise rispetto all'analisi rigorosa, però sono abbastanza esaustivi e sono i più utilizzati. I parametri di misura si suddividono in tre categorie: parametri fisici, parametri chimici e parametri biologici/microbiologici.

## Parametri fisici



### ST

La prima misura che si effettua per valutare la qualità di un'acqua è quella dei solidi totali in essa contenuti.

Per misurare tale parametro si raccoglie un campione e si lascia evaporare completamente l'acqua, riscaldandola fino ad una temperatura di 105 °C.

L'apparecchiatura in cui si esegue il processo è la *stufa* e l'acqua vi rimane per circa 2h.

Una volta evaporata l'acqua si pesano i solidi residui per differenza tra il peso del contenitore e quello dello stesso quando è vuoto. Poiché, chiaramente, la massa dei solidi residui è funzione del volume del campione considerato, i ST si esprimono come una concentrazione, ossia come rapporto tra la massa dei solidi e il volume del campione [mg/l].

Nel campo delle acque potabili il parametro viene definito *residuo fisso a 180°* e si esprime sempre in [mg/l].

Poiché i solidi totali non danno alcuna informazione in merito alla natura dei solidi presenti nell'acqua, esistono altri parametri più specifici.

### STV e STNV

Tali parametri servono ad indicare il contenuto di solidi organici e inorganici contenuti nell'acqua. Questa distinzione è fondamentale in quanto gran parte delle sostanze organiche sono biodegradabili, ovvero danno luogo in maniera spontanea ad una serie di processi di trasformazione.

Per effettuare la misura si sfrutta la differenza di volatilità tra le sostanze organiche e inorganiche. Raccolti quindi i solidi totali dalla *stufa*, questi vengono trattati in un'altra apparecchiatura, detta *muffola*, dove subiscono un riscaldamento fino alla temperatura di 600-700°C, alla quale la parte organica brucia e passa alla fase areiforme, ottenendo la divisione desiderata. La parte inorganica, infatti, subirebbe la stessa trasformazione a temperature più alte, circa 900-1000°C. Si effettua quindi la pesatura dei solidi inorganici residui alla stregua di quanto visto per i solidi totali. Si ottiene in questo modo la concentrazione dei STNV, che si esprime sempre in [mg/l]. Quella dei STV si ricava per differenza dai ST.

### SST e SD

Un solido sospeso è un solido che conserva la propria identità in acqua (ad esempio la sabbia), mentre un solido disciolto vi si disperde a livello molecolare (ad esempio il sale). Per misurare questo parametro si esegue il filtraggio. Si prende un

campione d'acqua e lo si versa in un contenitore con collo di dimensioni standardizzate. Sul collo è sistemato un filtro: nello scorrere dell'acqua all'interno del contenitore rimangono intrappolati nel filtro i solidi con dimensioni superiori a quelle dei fori. La dimensione dei fori del filtro è anch'essa standardizzata ed è pari a  $0.45 \mu m$ . Per prassi, si ritiene che tutti i solidi rimasti sul filtro sono sospesi, mentre quelli all'interno del contenitore sono disciolti. In realtà si tratta semplicemente di una convenzione in quanto esistono solidi sospesi con dimensioni inferiori ai  $0.45 \mu m$ . Per effettuare la misura si raccolgono i solidi residui sul filtro, li si sottopone a seccatura e quindi a pesatura. In questo modo si ottiene il peso dei solidi sospesi totali, mentre i disciolti si ottengono per differenza dai solidi totali. Anche i SST e i SD si esprimono in [mg/l].

### SSS, SSF e SSC

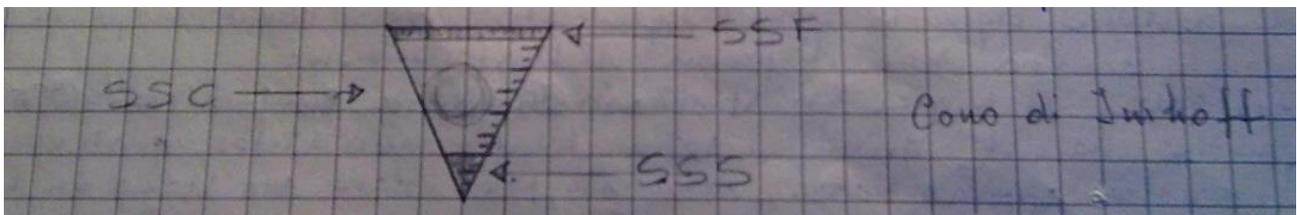
Le forze che agiscono sui solidi sospesi sono forze di massa e forze di superficie (elettriche). Questi solidi sono suddivisi in tre categorie in base alla forza che, su di essi, prevale rispetto alle altre.

Nei solidi sospesi sedimentabili e nei solidi sospesi flottanti le forze di massa prevalgono su quelle di superficie. In particolare i SSS hanno un peso specifico superiore a quello dell'acqua, dunque la forza peso è maggiore di quella di Archimede e, dopo un certo tempo in cui l'acqua è lasciata in quiete, questi solidi si depositano sul fondo, ossia sedimentano. Viceversa accade per i SSF, che flottano e vengono a galla. I solidi sospesi colloidali, invece, hanno dimensioni sufficientemente piccole da subire principalmente forze di superficie e rimangono in sospensione: non flottano né sedimentano.

Per misurare questi parametri si utilizza un cono con capacità di 1l, detto *cono di Imhoff* dal nome del medico che lo ha inventato. Tale cono viene riempito con il campione d'acqua che si vuole analizzare, preventivamente sottoposto a filtrazione per rimuovere i SD, e si aspettano convenzionalmente 2h. I solidi sospesi sedimentari occuperanno il volume sul fondo del cono, e si esprimono come rapporto tra il volume da essi occupato e quello dell'acqua iniziale [ml/l].

I solidi sospesi flottanti rimangono invece in superficie, e si misurano con lo stesso metodo visto per i SSS [ml/l].

Per misurare i solidi sospesi colloidali si preleva l'acqua dalla zona centrale del cono, che contiene quindi esclusivamente questo tipo di solidi, e viene messo in una stufa, utilizzando lo stesso metodo visto per i ST. I SSC si esprimono quindi come una concentrazione [mg/l].



### Colore

L'acqua di approvvigionamento destinata alla potabilizzazione deve essere incolore, ma principalmente per questioni psicologiche. Infatti, se ad esempio l'acqua contiene del ferro, che è bene per l'uomo assumere, questa si colora di rosso e non viene bevuta.

Per misurare il colore dell'acqua questa viene confrontata con una serie di soluzioni acquose di platino e cobalto di composizione nota. Tali metalli, infatti, colorano l'acqua in funzione della loro concentrazione.

## Odore e sapore

Tali parametri hanno significato nel caso in cui l'acqua sia destinata ad impianti di potabilizzazione. L'acqua potabile deve risultare infatti insapore e inodore.

Un campione d'acqua viene fatto valutare da persone esperte. Nel caso in cui l'acqua abbia odore e sapore, questa viene miscelata con un volume equivalente di acqua distillata, e quindi si esegue nuovamente la valutazione. Il procedimento viene iterato fintantoché l'acqua può essere considerata inodore e insapore. Questi parametri si esprimono mediante il *tasso di diluizione*, definito come

$$T. D. = \frac{V_{finale}}{V_{iniziale}}$$

## Torbidezza

La torbidezza è un'ulteriore misura del contenuto dei solidi sospesi. Questa si valuta facilmente e fornisce informazioni supplementari, ovvero è un indice non solo del contenuto dei solidi sospesi, ma anche del loro grado di frazionamento.

Per misurare la torbidezza si utilizza il *nefelometro*, un'apparecchiatura costituita da tre parti: una sorgente luminosa di lunghezza d'onda e intensità note, un vano trasparente per accogliere il campione d'acqua da analizzare e un rilevatore d'intensità di raggi luminosi. Mediante il nefelometro, quindi, è possibile misurare l'assorbimento della luce che passa attraverso il campione; tanto più l'acqua è torbida, tanto maggiore è l'assorbimento. L'unità di misura della torbidezza è l'unità equivalente di formazina, una soluzione acquosa torbida. Si preparano vari campioni in diverse concentrazioni e se ne misura l'assorbimento della luce. In questo modo si ottiene una scala di taratura con la quale confrontare il valore di assorbimento del campione analizzato.

## Conducibilità

La conducibilità di un'acqua, ossia la sua capacità di condurre corrente elettrica, è tanto maggiore quanto più alta è la concentrazione di specie ioniche disciolte.

La conducibilità si misura tramite una sonda da inserire nel campione d'acqua e si esprime in  $\mu S/cm$  ( $S$  = Siemens). Il legame tra conducibilità e concentrazione di specie ioniche disciolte è dato dal rapporto

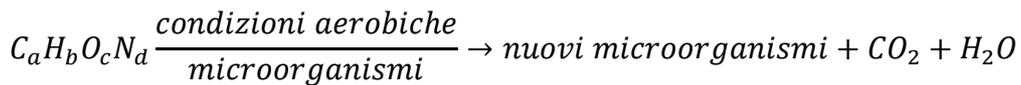
$$\frac{\text{conducibilità}}{\text{concentrazione specie ioniche}} \frac{[\mu S/cm]}{[mg/l]} \sim 1 \div 2$$

## Parametri chimici

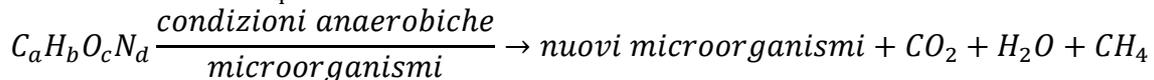
### BOD<sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand)

La maggior parte delle sostanze organiche, in presenza di microrganismi, dà vita spontaneamente a trasformazioni chimiche. Queste sostanze sono dette biodegradabili, mentre le specie organiche che non si trasformano si dicono non biodegradabili.

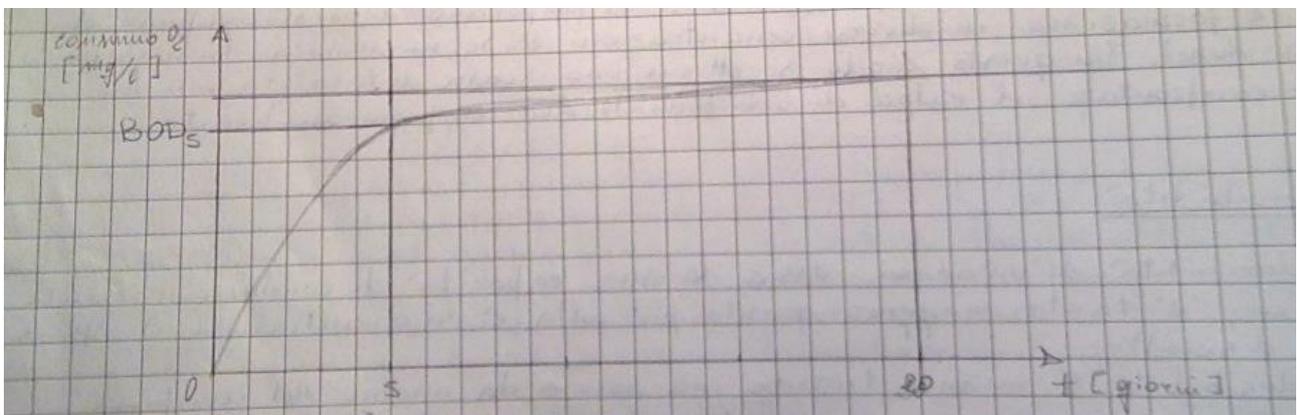
Le reazioni cui danno luogo le sostanze biodegradabili sono catalizzate da microrganismi, in quanto questi ultimi traggono nutrimento da tali sostanze scomponendone gli elementi che le costituiscono, quindi si riproducono. I prodotti di queste reazioni sono pertanto nuovi microrganismi e specie organiche più semplici. Questi processi, di tipo biochimico, possono avvenire in due modalità: in *condizioni aerobiche* o in *condizioni anaerobiche*. Nel primo caso le trasformazioni decorrono con disponibilità illimitata di ossigeno e sono del tipo



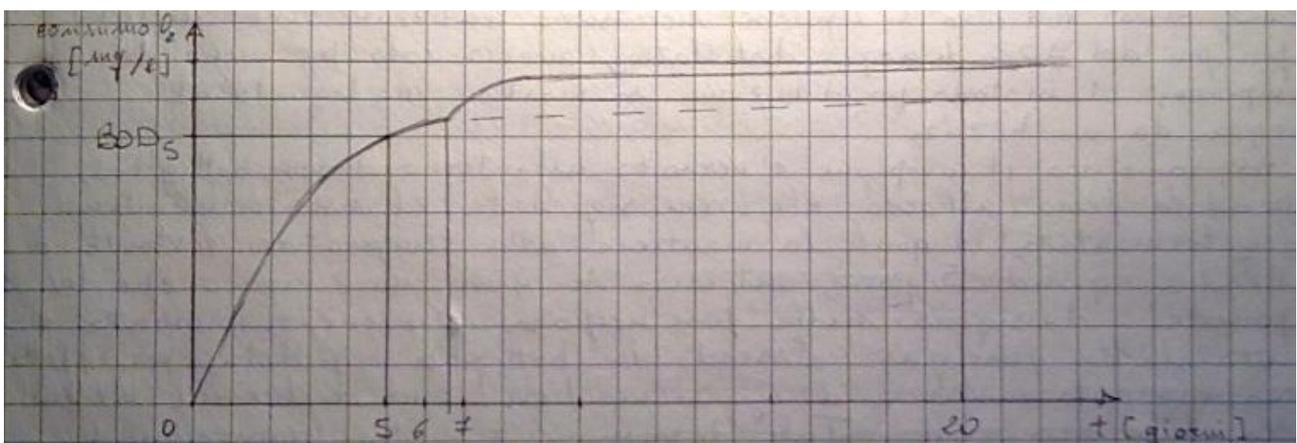
Nel secondo caso l' $O_2$  presente non è sufficiente ad ossidare tutti i prodotti si ha la formazione anche di  $CH_4$



Il BOD<sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand) è un parametro che rappresenta una misura indiretta del contenuto di specie organiche biodegradabili in acqua, attraverso il consumo di ossigeno dovuto alle stesse per via biochimica condotto in condizioni aerobiche. La reazione aerobica non è istantanea, decorre con una certa velocità dipendente dalla concentrazione dei reagenti e dalla temperatura. A T=20°C il tempo di esaurimento della reazione è di circa 20 giorni. Attendere un tempo così lungo è sconsigliato, anche perché la quasi totalità dei reagenti viene consumata nei primi giorni, dopodiché la velocità del processo si riduce drasticamente.



Va considerato poi che nelle acque reflue urbane vi sono, oltre a specie organiche biodegradabili, anche sostanze inorganiche in grado di reagire con l'ossigeno, come ad esempio i composti a base azotata contenuti nelle urine. Le reazioni di ossidazione di queste specie, tuttavia, sono molto più lente e si innescano dopo circa 6-7 giorni.



Per questi motivi si è scelto convenzionalmente di indicare il contenuto di solidi organici biodegradabili in riferimento al consumo di ossigeno nei primi 5 giorni dall'inizio del processo reattivo, da cui il nome BOD<sub>5</sub>. Quest'ultimo si esprime in [mg/l] di  $O_2$  consumato.

Esistono tre metodi di misura del BOD<sub>5</sub>, e la scelta va effettuata in base al tipo di acqua da analizzare, ossia all'ordine di grandezza che si prevede per il BOD<sub>5</sub>:

- il metodo diretto è adatto ad acque di buona qualità, aventi presumibilmente  $BOD_5$  inferiore ai 10 mg/l;
- il metodo per diluizione è utilizzato per acque meno pure, con  $BOD_5$  di ordine 10;
- il metodo respirometrico è indicato per le acque reflue, e può misurare  $10^2 \leq BOD_5 \leq 10^5$ .

Nel metodo diretto si riempie fino all'orlo un contenitore con l'acqua da analizzare, portata a 20°C e in condizioni di saturazione di ossigeno. L' $O_2$  disciolto infatti, e non in fase gas, è quello consumato dalla reazione aerobica. Il contenitore viene quindi sigillato e disposto all'interno di un'apparecchiatura, detta *frigotermostato*, in grado di mantenere la temperatura dell'acqua costante e pari a 20°C, e si attendono i 5 giorni necessari all'esaurimento quasi completo della reazione. Il  $BOD_5$  si misura per differenza tra la concentrazione di ossigeno disciolto all'istante iniziale e all'istante finale.

$$BOD_5 = [O_2]_{t=0} - [O_2]_{t=5 \text{ giorni}}$$

La concentrazione di  $O_2$  si misura tramite l'*ossimetro*, che consiste in una sonda in grado di leggerne il valore.

Il motivo per il quale il contenitore deve essere riempito fino all'orlo, quindi, è che l'acqua non deve essere a contatto con l'aria, in quanto ulteriore ossigeno passerebbe alla fase acquosa nel corso del processo, falsificando il risultato.

Potrebbe accadere che  $[O_2]_{t=5 \text{ giorni}} = 0$ , ovvero l'ossigeno inizialmente disciolto in acqua, seppur pari alla quantità di saturazione, non è stato sufficiente a condurre la reazione in condizioni aerobiche per tutto l'arco di tempo necessario. Il motivo risiede evidentemente nel fatto che la concentrazione di specie biodegradabili nell'acqua analizzata era superiore a un certo valore, oltre il quale il metodo diretto risulta inadatto.

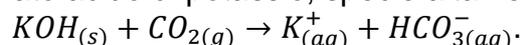
Il metodo per diluizione consiste nell'eseguire il metodo diretto ma preceduto dalla miscelazione del campione con un certo volume di acqua distillata, volume tale da garantire una riduzione della concentrazione delle specie biodegradabili sufficiente a condurre il processo in condizioni aerobiche. Chiaramente, il valore di  $BOD_5$  ottenuto come nel metodo descritto in precedenza va, in questo caso, moltiplicato per il tasso di diluizione

$$BOD_5 = ([O_2]_{t=0} - [O_2]_{t=5 \text{ giorni}}) \cdot T.D.$$

Per  $T.D. > 10$ , ossia nel caso si rendesse necessario realizzare una miscela composta per più del 90% di acqua distillata, ovvero solo per meno del 10% dal campione, il metodo per diluizione si mostra inadeguato al tipo di acqua da analizzare.

Nel metodo respirometrico il campione è versato all'interno di una bottiglia, non riempiendola fino all'orlo, che viene sigillata ed inserita all'interno di un frigotermostato, il quale la mantiene alla temperatura costante di 20°C. Si attendono quindi 5 giorni, nel corso dei quali man mano che la reazione procede l'ossigeno nella fase acquosa viene consumato e quindi riattinto dalla fase gas. Essendo la bottiglia sigillata, per effetto di questo trasferimento continuo di  $O_2$  si verifica una riduzione della pressione nella fase areiforme. Tale depressione risulta proporzionale all'ossigeno disciolto nel corso del processo, ossia a quello consumato. L' $O_2$  già presente inizialmente in acqua è infatti trascurabile, data la scarsa solubilità dello stesso e gli elevati valori di  $BOD_5$  delle acque analizzate con il metodo respirometrico.

Per evitare che la  $CO_2$ , prodotto di reazione, contribuisca alla variazione di pressione falsificando la misura, sulla faccia del tappo interna alla bottiglia è presente una pastiglia di potassa caustica KOH (idrossido di potassio), sostanza che reagisce con l'anidride carbonica formando carbonato acido di potassio, specie altamente solubile in acqua



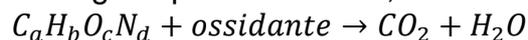
La depressione, dovuta quindi esclusivamente al consumo di ossigeno, si misura tramite un manometro a pressione. Esistono anche dei tappi in grado di riportare direttamente il valore di  $BOD_5$ .

E' importante, nel metodo respirometrico, assicurarsi che il volume d'aria rispetto a quello del campione d'acqua all'interno della bottiglia sia sufficiente a garantire la condizione aerobica. Per far ciò va eseguita la misura del BOD<sub>5</sub> in più bottiglie, ciascuna con un differente rapporto tra i due volumi suddetti. Il valore del BOD<sub>5</sub> risultante da più bottiglie rappresenterà quello corretto, mentre da un certo volume d'aria a scendere risulteranno valori sempre più piccoli, in quanto l'ossigeno consumato risulterà pari a quello disponibile, inferiore al necessario.

Inoltre, talvolta può accadere che per un'acqua reflua si misuri un valore di BOD<sub>5</sub> nullo. Ciò non vuol dire che siano assenti sostanze biodegradabili, trattandosi di una circostanza impossibile in uno scarico, ma piuttosto che nell'acqua siano presenti sostanze che inibiscono l'attività biologica, poiché tossiche per i microorganismi, quali ad esempio metalli pesanti, antibiotici, ecc. Se nelle fogne sono presenti tali sostanze, certamente non scaricate dalle abitazioni, significa che una qualche industria le sta scaricando illegalmente. Le industrie, infatti, possono scaricare nelle fogne, ma non senza aver preventivamente eliminato tutte le specie tossiche inibenti i processi spontanei che avvengono nell'acqua.

### COD (Chemical Oxygen Demand)

Il COD è una misura indiretta di tutte le sostanze organiche, sia biodegradabili che non, mediante il consumo di ossigeno per via chimica, secondo la reazione



L'ossidante generalmente utilizzato è il bicromato di potassio  $K_2Cr_2O_7$ . Per effettuare la misura si versa l'acqua da analizzare in un contenitore, che viene disposto su una fiamma in modo tale da portare l'acqua alla temperatura di ebollizione, 100°C, e si aspettano convenzionalmente 2h. Il contenitore è chiuso ed è dotato di un sistema di refrigerazione che costantemente ricondensa il vapore appena formatosi. Per accelerare il processo si utilizza un catalizzatore, in particolare solfato di argento, avendo cura che sia sempre in eccesso.

Il bicromato consumato si misura per titolazione. Al termine del processo si aggiunge al campione la ferroina, una sostanza che funge da indicatore in quanto colora l'acqua di rosso se in essa è presente il bicromato, di verde scuro se è assente. Quindi si aggiunge ferrammonio solfato che reagisce istantaneamente con il bicromato di potassio, fin quando l'acqua non si colora di verde scuro. Dal ferrammonio solfato che è stato necessario si ricava la concentrazione finale di bicromato, che sottratta a quella iniziale fornisce la quantità di ossidante consumato, da cui il COD. Anche quest'ultimo parametro si esprime come concentrazione, in particolare come [mg/l] di O<sub>2</sub> consumato. In formule:

$$\begin{aligned} COD &= ([K_2Cr_2O_7]_{t=0} - [K_2Cr_2O_7]_{t=2h}) \cdot 7/2 = \\ &= ([K_2Cr_2O_7]_{t=0} - [ferrammonio\ solfato]_{necessario\ per\ rendere\ l'acqua\ verde} \cdot \\ &\cdot \text{eventuale coefficiente stechiometrico della reazione tra ferrammonio e bicromato}) \cdot \\ &7/2. \end{aligned}$$

Nella misura del COD va tenuto presente che in acqua possono essere presenti anche sostanze inorganiche in grado di reagire con l'ossigeno, come cloruri o Fe<sub>2</sub>, e potrebbe esserci una sovrastima.

### COD e BOD

Dalla misura di COD e BOD è possibile determinare la concentrazione di:

- sostanze rapidamente biodegradabili  $RB\ COD \sim BOD_5$ ;
- sostanze lentamente biodegradabili  $SB\ COD \sim BOD_{20} - BOD_5$ ;
- sostanze non biodegradabili  $NB\ COD \sim COD - BOD_{20}$ .

## TOC (Total Organic Carbon)

Il TOC indica la quantità totale di carbonio presente in acqua con le specie organiche. E' più preciso di COD e BOD ma non è incluso nelle normative, in quanto più recente, pertanto è meno utilizzato.

Poiché la presenza del carbonio in acqua è dovuto quasi esclusivamente alle sostanze organiche, per effettuarne la misura si riscalda l'acqua fino ad una temperatura di circa 900°C, alla quale l' $H_2O$  è vapore e tutte le sostanze organiche volatilizzano, in particolare tali sostanze passano alla fase gas sotto forma di  $H_2O$  e  $CO_2$ . Dalla misura della quantità di  $CO_2$  si ricava quella di  $C$  appartenente alle sostanze organiche sia biodegradabili che non. Il TOC è dunque assimilabile al COD, e si esprime in [mg/l] di  $C$ .

## Durezza

La durezza rappresenta la concentrazione di ioni con valenza 2+ provenienti dai sali solubili in acqua, ed è un parametro che ha senso solo per le acque di approvvigionamento. La durezza è dovuta sostanzialmente alla presenza degli ioni  $Ca^{2+}$  ed  $Mg^{2+}$ .

I sali di calcio e magnesio disciolti in acqua sono 8:

- 1)  $CaCO_3$  carbonato di calcio;
- 2)  $Ca(HCO_3)_2$  bicarbonato di calcio;
- 3)  $CaCl_2$  cloruro di calcio;
- 4)  $CaSO_4$  solfato di calcio;
- 5)  $MgCO_3$  carbonato di magnesio;
- 6)  $Mg(HCO_3)_2$  bicarbonato di magnesio;
- 7)  $MgCl_2$  cloruro di magnesio;
- 8)  $MgSO_4$  solfato di magnesio;

La gran parte della durezza è data dai bicarbonati, in quanto i carbonati, in particolare  $CaCO_3$ , sono molto poco solubili.

L'unità di misura della durezza è la concentrazione di  $CaCO_3$  equivalente.

L'acqua può essere classificata in funzione della durezza:

- acqua molle, se ha una durezza  $D < 50 \text{ mg/l}$  di  $CaCO_3$ ;
- acqua poco dura, se ha una durezza  $50 \text{ mg/l} < D < 150 \text{ mg/l}$  di  $CaCO_3$ ;
- acqua dura, se ha una durezza  $150 \text{ mg/l} < D < 350 \text{ mg/l}$  di  $CaCO_3$ ;
- acqua molto dura, se ha una durezza  $D > 350 \text{ mg/l}$  di  $CaCO_3$ .

Inoltre esistono diverse classificazioni della durezza:

- durezza calcica, dovuta alla presenza degli ioni calcio (dai sali 1, 2, 3, 4);
- durezza magnesiaca, dovuta alla presenza degli ioni magnesio (dai sali 5, 6, 7, 8).

Questa classificazione è importante, in quanto  $Ca^{2+}$  ed  $Mg^{2+}$  in acqua vengono trattati diversamente.

- durezza carbonica (dai sali 1, 2, 5, 6);
- durezza non carbonica (dai sali 3, 4, 7, 8).

Anche in questo caso i trattamenti sono diversi per le due tipologie di sali.

- durezza temporanea (dai sali 1, 2, 5, 6);
- durezza permanente (dai sali 3, 4, 7, 8).

I sali che danno durezza temporanea precipitano al crescere della temperatura, e i sali sospesi e non disciolti non contribuiscono alla durezza, che è legata alla presenza di specie ioniche. In particolare, la durezza temporanea si annulla alla  $T$  di ebollizione.

Alla durezza sono dovuti tutta una serie di problemi.

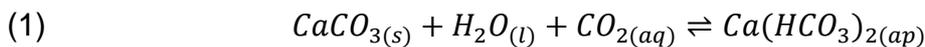
- La presenza del bicarbonato di calcio, infatti, è legata alla reazione di equilibrio  $CaCO_{3(s)} + H_2O_{(l)} + CO_{2(aq)} \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$ . Al crescere della temperatura la reazione si sposta verso sinistra, con formazione di  $CaCO_3$  che, in quanto molto poco solubile, precipita e sedimenta, formando incrostazioni di calcare. Queste possono

quindi, con il passare del tempo, otturare tutte le tubazioni nelle quali vi è il passaggio di acqua dura soggetta a un aumento di temperatura, come ad esempio le tubazioni domestiche, industriali o degli acquedotti. Il calcare offre resistenza allo scambio termico, pertanto un tubo incrostato scambia peggio il calore, inoltre il tubo ha una sezione di passaggio minore e quindi aumentano le perdite di carico.

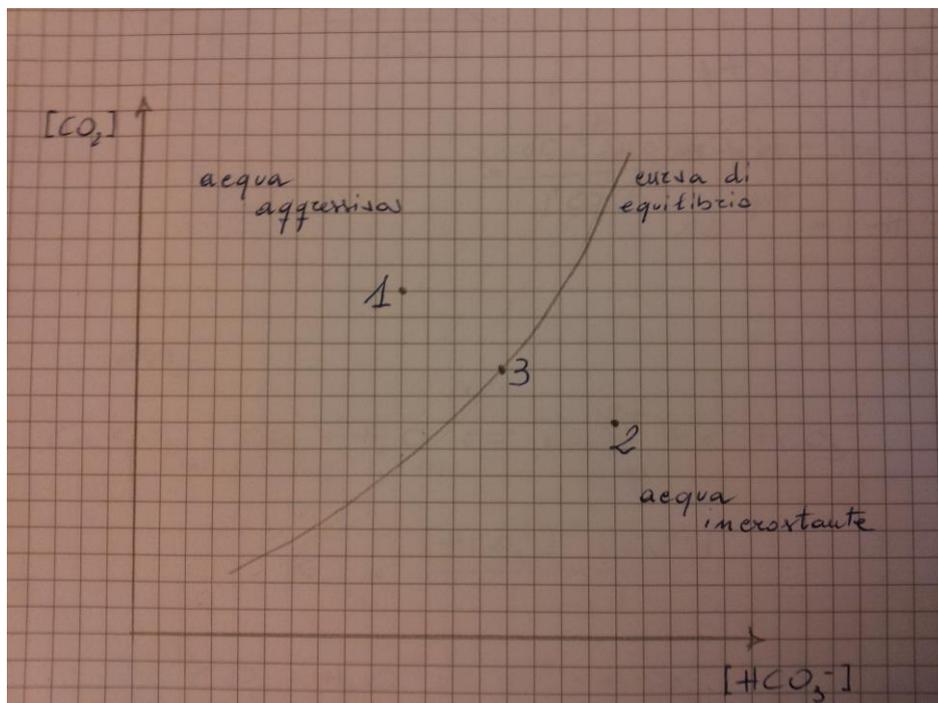
- L'acqua con durezza, inoltre, ha un punto di ebollizione più alto rispetto all'acqua molle, e ciò comporta un aumento del dispendio di energia.
- In acque dure è poi necessario utilizzare quantità maggiori di detersivi, poiché questi ultimi reagiscono con i sali.
- In lavatrice, i precipitati potrebbero essere trattenuti dai tessuti, indurendoli.
- I sali che danno durezza hanno effetto lassativo, e possono provocare calcoli renali.

La durezza non va eliminata completamente nelle acque destinate all'uso potabile, le quali devono contenere una certa quantità di sali in quanto utili all'organismo, mentre l'acqua di processo destinata agli stabilimenti industriali non deve avere durezza, poiché è continuamente soggetta a variazioni di temperatura, con conseguente formazione di incrostazioni e incrementi di dispendi energetici per le ragioni suddette.

Diagramma di Tillmann (o degli equilibri carbonatici)



$$\frac{[Ca(HCO_3)_2]_{eq}}{[CO_2]_{eq}} = K_{eq}$$



$$1. \quad \frac{[Ca(HCO_3)_2]}{[CO_2]} < K_{eq}$$

Accade se l'acqua piovana, ricca di  $CO_2$ , non è venuta a contatto con carbonato di calcio. In tal caso l'acqua risulta acida ed ha un'azione corrosiva sulle tubazioni, venendo pertanto detta acqua aggressiva. Un'acqua di questo tipo va preventivamente sottoposta a stripping di  $CO_2$ , ossia un processo che consiste nell'agitazione dell'acqua per permettere il rilascio dei gas.