

SECONDA EDIZIONE
riveduta e corretta

Eugenio Stocchi

CHIMICA INDUSTRIALE

INORGANICA

volume I



edisco

EUGENIO STOCCHI

CHIMICA INDUSTRIALE

VOLUME PRIMO

CHIMICA INDUSTRIALE INORGANICA

SECONDA EDIZIONE
riveduta e corretta

edisco

Presentazione

L'opera si compone in due volumi e si caratterizza per l'esemplare chiarezza organizzativa e strutturale del testo che è assicurata:

- dal punto di vista descrittivo da una ricca, chiara e pertinente espressione di linguaggio, nonché da ampie e frequenti note e da numerosi problemi risolti;
- dal punto di vista espositivo dall'utilizzo preminente nella trattazione di schemi, tabelle e grafici. Le tavole grafiche hanno, infatti, lo scopo non solo di chiarire i concetti ma anche di svilupparli ulteriormente. Ad esempio, l'uso frequente di tabelle come promozione di calcoli chimici di interesse industriale e la compresenza, non rara, negli schemi di impianto, anche delle figurazioni di apparecchiature e viceversa;
- dal punto di vista grafico da numerosi caratteri di stampa che distinguono i diversi livelli di lettura e approfondimento.

Ancora, l'opera risulta particolarmente curata nelle parti relative alla processistica e alla impiantistica chimica, tra loro interdipendenti. Nel promuovere lo studio delle norme che regolano l'impostazione e la gestione dei processi di produzione considerati, il manuale introduce lo studente nello spirito degli argomenti affrontati, arrivando a capire il perché dei processi adottati, delle scelte impiantistiche fatte dall'industria e assimilando via via una cultura che gli consentirà di esprimere autonomi giudizi di operatività.

Infine, la trattazione dei temi fondamentali è completa e dettagliata, senza attardarsi in sterili elencazioni di prodotti industriali e processi tecnologici, e non trascura i temi dalle implicazioni ecologiche, quali l'inquinamento idrico, gli scarichi al mercurio, le contaminazioni dell'atmosfera, dei composti solforati e cianuri tossici e dei metabolici inorganici cancerogeni. Temi che trovano una sobria e seria puntualizzazione unitaria e contestuale prospettiva di possibili e realistici rimedi.

Notevoli l'approfondimento e la vastità di contenuti. In particolare:

- il *primo volume* di 736 pagine, è dedicato alla **CHIMICA INORGANICA** e presenta: 23 problemi risolti, 508 tavole grafiche, 7 ampie appendici e un indice analitico di più di 1500 voci;
- il *secondo volume* di 864 pagine, è dedicato alla **CHIMICA ORGANICA** e propone: 66 problemi risolti, 544 tavole grafiche, 6 ampie appendici e un indice analitico di quasi 1700 voci.

INDICE SISTEMATICO

PRESENTAZIONE	Pag.	5
INDICE DEI CAPITOLI	»	7

1 | ESSENZIALITÀ E PROBLEMATICHE DELLA CHIMICA INDUSTRIALE..... Pag. 9

1.1	Il campo della chimica industriale	»	9
2.1	Chimica industriale e materie prime	»	11
	Materie prime della litosfera	»	11
	Materie prime dall'idrosfera, dall'atmosfera e dalla biosfera ...	»	12
3.1	Il problema dell'energia nell'industria chimica	»	12
	Perché e come gestire l'energia per migliorare i bilanci economici	»	12
	Tipi d'energie e fonti energetiche per l'industria chimica	»	13
4.1	La ricerca nell'industria chimica	»	14
	La ricerca innovativa	»	15
	La ricerca di miglioramento	»	16
	La ricerca d'applicazione	»	17
5.1	Effetti tossici dei prodotti chimici	»	18
	Contaminazione ambientale da prodotti chimici	»	18
	Classificazione degli effetti tossici	»	19
	Natura degli effetti tossici	»	20
	Fattori che influenzano la tossicità	»	21
	Vie di contaminazione	»	22
	Esposizioni multiple	»	22
	Indici di inquinamento atmosferico negli ambienti di lavoro ...	»	23
	Sorte dei prodotti chimici tossici assorbiti	»	24
6.1	Primi detenuti e pericoli derivanti dalle attività della chimica industriale inorganica	»	27

2 | COSTANTI D'EQUILIBRIO E RENDIMENTO DI REAZIONI Pag. 29

1.2	Dai reattivi ai prodotti di reazione e viceversa	»	29
2.2	Le reazioni chimiche arrivano a stabilire un equilibrio tra reattivi e prodotti	»	30

3.2	L'equilibrio teorico è condizione ideale per una reazione	Pag.	31
4.2	Rendimento d'una reazione giunta all'equilibrio teorico	»	31
5.2	«Resa massima» e sue espressioni generali di calcolo	»	32
	Espressione generale della resa massima in funzione dei pesi ...	»	33
	Espressione generale della resa in funzione delle moli	»	34
6.2	Calcolo delle rese massime dalla costante d'equilibrio	»	35
	Caso di reazione che avviene senza variazione del numero di moli	»	35
	Caso di reazione a numero di moli variabili ed a pressione P ..	»	38
	<i>Costante d'equilibrio in funzione d'unica frazione molare - Resa massima in funzione d'unica frazione molare.</i>		
7.2	Le rese di reazione e i fattori tempo e temperatura	»	43
	Cosa sono le isoterme di reazione	»	43
	Isoterme di reazione e tonalità termiche	»	44
8.2	Influenza delle rispettive concentrazioni dei reattivi e della pressione d'esercizio sulle rese di reazioni tra gas	»	46
	Problema sulla variazione delle rese di sintesi col variare della composizione dei reattivi nelle reazioni tra gas	»	46
	Variazione delle rese di sintesi con la pressione nelle reazioni tra gas	»	47

3 | TEORIE E PRATICHE ESSENZIALI NELLA CONDOTTA DEI PROCESSI DELLA CHIMICA INDUSTRIALE Pag. 49

1.3	I compiti della chimica industriale	»	49
2.3	Chimica industriale ed impiantistica chimica	»	50

PARTE PRIMA

PREMESSE TEORICHE ALLA GESTIONE DEI PRECIPUI COMPITI DELLA CHIMICA INDUSTRIALE

3.3	Fenomeni chimicofisici sfruttati dall'attività della chimica industriale	Pag.	50
	L'equilibrio chimico è stato dinamico: implicazioni e conseguenze	»	51
	<i>Natura del dinamismo dell'equilibrio chimico e suo significato - L'effetto fisico d'«azione e reazione» si applica all'equilibrio chimico - La dinamicità dell'equilibrio chimico consegue alla sua inerzia. Vicarianza applicativa dei due aspetti.</i>		
	Attivazione molecolare e reattività	»	52
4.3	Come influenzando l'equilibrio chimico si migliorano le rese ..	»	52
	Influenze sull'equilibrio delle variazioni di concentrazione	»	53

	Influenze sull'equilibrio delle variazioni di pressione	Pag.	53
	Influenze sull'equilibrio delle variazioni di temperatura	»	56
5.3	Il problema dell'attivazione molecolare	»	58
	Natura del fenomeno reattivo	»	58
	Come si incrementano gli urti tra molecole o tra superfici attivate	»	59
	<i>Caso di reattivi liquidi e gassosi - Caso di reattivi solidi.</i>		
	Influenza cinetica e modifica dello stato energetico molecolare	»	60
	<i>Il nodo dell'energia d'attivazione - Reattività e temperatura - Reattività e catalisi.</i>		

PARTE SECONDA

OPERAZIONI DI RICICLO E DI SPURGO IN CHIMICA INDUSTRIALE

6.3	Concetto e funzione dei ricicli	Pag.	67
	Aumento delle rese percentuali globali	»	67
	Concentrazione di soluzioni	»	68
	Ricicli nei processi di rettifica	»	68
	Ricicli per riutilizzare solventi	»	69
	Ricupero e dispersione di calore per riciclo	»	69
7.3	Calcoli sulla gestione d'impianto comportante ricicli	»	69
8.3	Accumulo d'inerti e inquinamento di reattivi nei ricicli	»	74
9.3	Influenza dell'aggiunta di gas inerti su equilibri in fase gassosa	»	75
10.3	Esempi di calcolo sulle operazioni di spurgo	»	76

4 | CHIMICA ED IMPIANTISTICA CHIMICA INDUSTRIALI

Pag. 81

1.4	Il processo e l'impianto chimici industriali	»	81
2.4	Scelta d'una produzione chimica industriale e dei processi che la servono	»	82
3.4	La realizzazione degli impianti	»	84
4.4	Criteri sul come dimensionare gli impianti	»	85
5.4	Principali apparecchiature. Elementi di reattoristica chimica ...	»	85
	I reattori: tipi, funzioni e criteri di scelta	»	85
	Classificazione dei reattori	»	86
	Rassegna ed esempi di reattori delle varie classi	»	86
	<i>Reattori di classe A - Reattori di classe B - Reattori di classe C.</i>		
6.4	Dove situare gli impianti	»	92
7.4	Avviamento e collaudo degli impianti	»	92
8.4	Controllo di marcia degli impianti	»	94
	Controllo di marcia di normali impianti	»	94
	Controllo di marcia nei grandi impianti	»	95

5 | PROBLEMATICA DELLE ACQUE Pag. 97

1.5	Il ciclo terrestre dell'acqua e come sorgono i problemi dell'acqua	»	97
2.5	Requisiti delle acque in rapporto agli usi	»	98
3.5	Stato delle acque praticamente disponibili	»	100
	Acque di primo impiego ed acque di reimpiego	»	100
	Durezza delle acque	»	100
	Acque salse	»	102
	Acque inquinate	»	103
	<i>I livelli d'inquinamento d'acque e le loro cause - La richiesta d'ossigeno come indice d'inquinamento idrico.</i>		
4.5	Eliminazione di sospensioni dalle acque	»	106
	Grigliatura	»	107
	Sedimentazione	»	107
	Filtrazione	»	110
	Coagulazione e flocculazione. Chiaroflocculazione	»	112
5.5	Il deindurimento delle acque	»	114
	Processo calce-soda	»	114
	<i>Chimismo ed impianto - Conseguenze e rimedi.</i>		
	Processi a scambio ionico	»	116
	<i>Azione e rigenerazione di uno scambiatore di ioni - Meccanismi di scambio ionico - Cinetica delle reazioni di scambio - Natura ed azione degli scambiatori minerali di cationi - Fattura, stato di fornitura e durata degli scambiatori organici di ioni - Uso di resine scambianti ioni per deindurire con vario effetto acque.</i>		
6.5	Decationizzazione e demineralizzazione di acque	»	126
	Decationizzazione	»	126
	Deionizzazione («demineralizzazione»)	»	126
7.5	Dissalazione delle acque	»	128
	Distillazione	»	129
	Congelamento	»	132
	Osmosi inversa	»	133
	Elettrodialisi	»	135
	<i>Principio del metodo - Celle da elettrodialisi industriali - Struttura delle membrane ed applicazioni dell'elettrodialisi.</i>		
8.5	Processi di condizionamento delle acque	»	137
	Refrigerazione delle acque	»	138
	Degasaggio	»	139
	Adsorbimento	»	139
	<i>Uso dei carboni - Uso dei polimeri macroporosi.</i>		
	Neutralizzazione	»	141
	Ossidazioni e riduzioni	»	142
	<i>Natura ed azione d'agenti ossidanti - Agenti riducenti e processi di riduzione.</i>		
	Deferrizzazione e demanganizzazione	»	145

	Defosfatazione	Pag. 147
	Demetallizzazione	» 148
9.5	Trattamento biologico delle acque	» 149
	Attività microbiologiche nei trattamenti depuranti le acque	» 149
	Condizioni operative e risultati pratici	» 151
	Metodi di sfruttamento di microrganismi aerobici	» 152
	<i>Tecnologie e strutture operative - Campi di applicazione ed efficienza dei metodi.</i>	
	Metodi di sfruttamento di microrganismi anaerobici	» 158
	Processi bionitrificanti e biodenitrificanti	» 160
10.5	I trattamenti dei fanghi	» 161
	Ispessimento dei fanghi	» 162
	Stabilizzazione dei fanghi	» 162
	Portata a secco dei fanghi	» 163
	Smaltimento dei fanghi	» 165
11.5	Trattamenti finalizzati delle acque	» 166
	Potabilizzazione di acque gregge	» 167
	Trattamento d'effluenti di stabilimenti petrolchimici	» 168
	Adattamento all'alimentazione di caldaie d'acque potabili	» 169
	Depurazione degli scarichi urbani	» 170
	<i>Processi di depurazione a piccola scala - Processi di depurazione a media scala - Processi di depurazione su grande scala.</i>	
	Trattamento d'acque reflue formaldeidiche	» 173

6 | ZOLFO E SUOI PRINCIPALI COMPOSTI Pag. 175

1.6	Generalità sullo zolfo	» 175
	Stato naturale e sue fonti	» 175
	Proprietà dello zolfo	» 176
	<i>Zolfo cristallino - Zolfo fuso - Vapori di zolfo - Zolfo plastico e zolfo colloidale.</i>	
2.6	Estrazione dello zolfo naturale	» 177
3.6	Produzione di zolfo da gas solfiferi, da solfuri e da solfati	» 179
	Gas solfurici e loro sfruttamento	» 179
	<i>Processi che portano direttamente a zolfo - Processi che portano ad alti tenori di H₂S - Metodo generale di ossidazione di H₂S a zolfo.</i>	
	Produzione di zolfo da piriti	» 184
	Produzione di zolfo da anidrite e da gesso	» 184
4.6	Raffinazione, portata a varietà commerciali e usi dello zolfo ..	» 185
5.6	Anidride solforosa	» 186
	Proprietà e usi della SO ₂	» 186
	Preparazione dell'anidride solforosa	» 187
	<i>Anidride solforosa da zolfo - Anidride solforosa da solfuri metallici - Anidride solforosa da solfuro d'idrogeno - Anidride solforosa da solfato di calcio.</i>	

	Depurazione dei fumi solforosi	Pag. 194
	Produzione d'anidride solforosa pura	» 195
	I principali composti dell'anidride solforosa	» 196
	<i>Biosolfiti e solfiti - Pirosoolfiti - Idrosolfiti - Tiosolfati.</i>	
6.6	Anidride solforica	» 198
7.6	Acido solforico	» 199
	Proprietà, composti con H ₂ O ed SO ₃ e forme commerciali	» 199
	Preparazione dell'acido solforico per catalisi eterogenea	» 201
	<i>Effetti della temperatura, della pressione e della concentrazione di O₂ sull'equilibrio 2SO₂ + O₂ ⇌ 2SO₃ - Problema cinetico della sintesi dell'anidride solforica - Catalizzatori di sintesi - Funzionamento di reattore a più strati catalitici di conversione della SO₂ in SO₃ - Il processo d'assorbimento dell'anidride solforica - Varietà di tecnologie impiantistiche di produzione industriale di acido solforico per catalisi eterogenea - Materiali impiantistici occorrenti.</i>	
	Preparazione dell'acido solforico per catalisi omogenea	» 211
	<i>Fasi della produzione d'acido solforico per catalisi omogenea - Tecnica e ambiente di miscelazione gas-nitrosa - Reazioni chimiche, variamente localizzate, comportate dal processo - Apparecchiature impiantistiche di massima catalisi - Apparecchiature impiantistiche di ricupero gas nitrosi.</i>	
	Gli usi ed il commercio dell'acido solforico	» 215
8.6	I principali solfati d'importanza industriale	» 216
	Produzione di bisolfato e di solfato sodici	» 216
	Produzione industriale dei solfati d'alluminio	» 218
	Preparazione industriale dell'allume di cromo	» 219
	Metodi industriali di produrre il solfato ammonico	» 219
	<i>Processi all'acido solforico - Processi a gas solforosi - Processi ai solfati di calcio.</i>	
	Produzione industriale del solfato di rame	» 222
9.6	Produzione dei solfuri di sodio	» 224
10.6	Produzione del solfuro di bario e dei suoi derivati principali ...	» 226
11.6	L'industria del solfuro di carbonio	» 226
12.6	Produzione ed usi di alogenuri di zolfo e di solfoalogenuri	» 228
13.6	Acido solfamminico e solfammati	» 232
14.6	Note tossicologiche ed antinfortunistiche sui principali composti industriali dello zolfo	» 233

7 | SFRUTTAMENTO INDUSTRIALE DELL'ARIA Pag. 237

1.7	Composizione e proprietà dell'aria	» 237
2.7	Premesse allo studio dei processi Linde che portano a far condensare l'aria	» 238

3.7	I procedimenti Linde di liquefare l'aria	Pag. 239
	1° metodo Linde	» 239
	2° metodo Linde	» 242
4.7	Premesse teoriche al metodo Claude di liquefare l'aria	» 243
5.7	L'impianto del processo Claude di liquefazione dell'aria	» 244
6.7	Proprietà ed usi dell'aria liquida	» 246
7.7	Generalità sul frazionare l'aria liquida	» 246
	Funzionamento d'una colonna di rettifica	» 247
	Perché non è agevole frazionare l'aria liquida	» 249
	Come, ricorrendo ad una torre di frazionamento a due corpi, è possibile scomporre l'aria liquida	» 249
8.7	Caratteristiche strutturali delle torri di frazionamento dell'aria dopo liquefazione	» 250
9.7	Gli impianti Linde di frazionamento dell'aria	» 250
10.7	Gli impianti Claude ed altri di frazionamento dell'aria	» 252
11.7	I rigeneratori Fränkl	» 253
	Schema d'impianto di frazionamento dell'aria liquida includente rigeneratori Fränkl	» 255
12.7	La produzione dei gas nobili dall'aria	» 256
	Produzione industriale di elio e neo	» 257
	Produzione industriale dell'argo	» 257
	Produzione di cripto e xeno	» 258
	Separazione dei gas nobili mediante setacci molecolari	» 258
13.7	Proprietà ed usi dei gas dell'aria	» 259
14.7	Inquinamento dell'aria	» 260

8 | COMPOSTI INDUSTRIALI DELL'AZOTO Pag. 261

AMMONIACA

1.8	Struttura e proprietà dell'ammoniaca	» 261
2.8	La sintesi dell'ammoniaca	» 262
	La contrastante influenza della temperatura sulla sintesi dell'ammoniaca	» 263
	Influenza della pressione sulla sintesi dell'ammoniaca	» 263
	Pressioni, temperatura e percentuali d'ammoniaca all'equilibrio .	» 264
	La catalisi nella sintesi dell'ammoniaca	» 265
	<i>Presupposti alla catalisi e meccanismo d'azione dei catalizzatori</i>	
	<i>- Costituzione del catalizzatore in esercizio ed all'origine -</i>	
	<i>Struttura fisica del catalizzatore e ruolo specifico di protettori ed attivatori - Il fattore «velocità spaziale» nella sintesi dell'ammoniaca -</i>	
	<i>Veleni, inibitori e invecchiamento del catalizzatore - Rigenerazione o sostituzione del catalizzatore. Riciclo alla metanazione.</i>	

Produzione della miscela di sintesi $N_2 + 3H_2$	Pag. 271
<i>Preparazione di «grezzo da sintesi» da carbone - Preparazione di «grezzo da sintesi» da idrocarburi - Passaggio dai «grezzi di sintesi» ai «puri di sintesi» - Preparazione della miscela pura $N_2 + 3H_2$ da idrocarburi e dai prodotti di frazionamento dell'aria liquida.</i>	
Condizioni impiantistiche di sintesi: fattori che le determinano	» 280
Condizioni interne ed esterne ai reattori per migliorare le rese di sintesi	» 282
Problemi strutturali dei circuiti di sintesi	» 286
Ricostruzione ciclica della miscela di sintesi e separazione dell' NH_3	» 287
<i>Separazione monostadio prima di comprimere per riciclare - Separazione monostadio dopo compressione per il riciclo - Separazione bistadio con compressione per il riciclo tra gli stadi.</i>	
3.8 Commercio ed usi dell'ammoniaca	» 290
4.8 Pericoli da ammoniaca e rimedi	» 291

ACIDO NITRICO

5.8 Proprietà fisico-chimiche dell'acido nitrico	» 292
6.8 Preparazione industriale dell'acido nitrico	» 294
<i>Ricerca di favorevoli condizioni operative d'ossidazione di NH_3 ad NO</i>	
La temperatura d'esercizio dell'ossidazione di NH_3 ad NO	» 295
Il catalizzatore dell'ossidazione di NH_3 ad NO: struttura ed azione	» 296
Veleni e prodotti abrasivi del catalizzatore. Ricuperi	» 296
Velocità d'efflusso dei gas e influenza della pressione sulla (14 ₈)	» 297
Tecnologia del processo d'ossidazione di NH_3 ad NO	» 298
<i>Teoria dei processi chimici che consentono di passare dall'ossido d'azoto all'acido nitrico</i>	
<i>Ossidazione dell'ossido d'azoto [reaz. (18₈)] - Idratazione dell'ipozotite [reaz. (19₈)] - Dismutazione finale dell'acido nitroso [reaz. (20₈)].</i>	» 300
Gli impianti di trasformazione dell'ossido d'azoto in acido nitrico	» 302
<i>Impianto di trasformazione a pressione normale di NO in HNO_3. Concentrazione dell'acido - Impianti per trasformare sotto pressione NO in HNO_3 - Produzione diretta d'acido nitrico concentrato.</i>	
7.8 Forme commerciali, trasporto ed usi dell'acido nitrico	» 310
8.8 Nocività dell'acido nitrico e degli ossidi d'azoto. Antidoti	» 311
9.8 Disinquinamento dei gas di sfato delle tecnologie impiantistiche riguardanti l'acido nitrico	» 311

ACIDO CIANIDRICO E CIANURI

10.8	Proprietà ed usi dell'acido cianidrico	Pag. 312
11.8	Produzione industriale di HCN	» 313
12.8	Produzione industriale di cianuri	» 315

IDRAZINA

13.8	Proprietà ed importanza tecnologica dell'idrazina	» 316
14.8	Produzione industriale dell'idrazina	» 317

9 | GLI ALOGENI NELL'OTTICA DELLA CHIMICA INDUSTRIALE INORGANICA

Pag. 319

1.9	Le proprietà degli alogeni	» 319
2.9	L'industria inorganica del fluoro	» 321
	Acido fluoridrico	» 321
	Il fluoro	» 322
	Fluoruri inorganici d'interesse industriale	» 323
	<i>Generale rassegna di fluoruri tecnicamente importanti - Fluoruri di boro e dall'alluminio.</i>	
3.9	Cloro e suoi composti industriali inorganici	» 325
	Cloro	» 325
	<i>Produzione e purificazione della salamoia per produrre cloro - Celle a diaframma - Celle a catodo di mercurio.</i>	
	Celle a membrana	» 335
	<i>Commercio ed usi del cloro.</i>	
	Acido cloridrico	» 337
	<i>Produzione per sintesi di HCl - Produzione di HCl per clorurazione e per deidroclorurazione - Acido cloridrico anidro - Commercio ed usi dell'acido cloridrico.</i>	
	Alcuni cloruri di spiccato interesse	» 341
	<i>Cloruro d'alluminio - Cloruri di ferro - Cloruri di metalli del secondo gruppo.</i>	
	Prodotti industriali a base di composti ossigenati di cloro	» 343
	<i>Soluzioni «a cloro attivo» e ipocloriti alcalini - Cloruro di calce ed ipoclorito di calcio - Composti di cloro ad alto numero d'ossidazione.</i>	
4.9	I minori alogeni	» 348
	Bromo	» 348
	<i>Produzione ed usi - Produzione di composti inorganici di bromo.</i>	
	Iodio	» 351
5.9	Azione e prevenzione degli effetti dei principali tossici industriali inorganici d'alogeni	» 353
	Cloro	» 353

Acido cloridrico	Pag. 354
<i>Acidi fluoridrico e fluoruri</i>	
Bromo	» 355

10 | INDUSTRIA DEL FOSFORO E DEL BORO Pag. 357

PARTE PRIMA

FOSFORO E DERIVATI NON FERTILIZZANTI

1.10 Minerali fosfatici	Pag. 357
2.10 Preparazione del fosforo e suo commercio	» 358
Premesse e andamento della preparazione	» 358
Ricupero del prodotto e dei sottoprodotti	» 359
Forme commerciali ed usi del fosforo	» 361
3.10 Industria dell'acido fosforico	» 361
Produzione di H_3PO_4 per via termica	» 362
Produzione di H_3PO_4 per via umida	» 362
<i>Generalità - Tecnologie dei processi correnti di produzione - Depurazione dell'acido fosforico prodotto per via umida.</i>	
Ricupero di composti fluorurati da prodotti di reazione di fluo- roapatiti	» 368
<i>Forme in cui si libera il fluoro - Modi di ricupero, ove convie- ne, di composti fluorurati.</i>	
Composizione, comportamento ed usi dell'acido fosforico	» 370
4.10 Composti derivati dal fosforo elementare	» 373
Produzione di cloruri di fosforo e di loro derivati	» 373
<i>Tricloruro di fosforo ed alogenuri analoghi - Ossicloruro e pen- tacloruro di fosforo - Esteri fosforici e cloridrina solforica.</i>	
Produzione e derivati dei solfuri di fosforo	» 376
<i>Preparazione degli esteri tiofosforici - Preparazione dei fiammi- feri.</i>	
5.10 Composti salini derivati dall'acido fosforico	» 378
Tipi industriali, preparazione ed usi di fosfati	» 378
Tipi industriali, produzione ed usi di polifosfati	» 380
6.10 Il problema del fosforo nella biosfera	» 383
7.10 Note tossicologiche su fosforo e certi suoi composti	» 384

PARTE SECONDA

BORO E COMPOSTI

8.10 Dai giacimenti naturali agli usi del boro e composti	Pag. 384
9.10 I soffioni boriferi («boraciferi»)	» 385
Generalità	» 385
Lo sfruttamento dei soffioni	» 386

10.10	Acido borico e composti del boro d'interesse industriale	Pag. 388
	Boraci	» 388
	Perborato e perborace	» 389
	Composti binari del boro	» 389
	Borani	» 390
	Alogenuri di boro e borazoli	» 391

11 | INDUSTRIA DEI CONCIMI CHIMICI Pag. 393

1.11	Ruolo ed aspetti della concimazione minerale	» 393
2.11	Componenti ed azione dei fertilizzanti	» 394
	Megaelementi ed oligoelementi della fertilità del suolo	» 394
	Funzioni ed efficacia d'uso degli elementi fertilizzanti	» 395
3.11	Classificazione, titolo e forme commerciali dei fertilizzanti	» 396
4.11	Fertilizzanti azotati	» 397
	Concimi ammoniaci	» 397
	<i>Ammoniaca - Cloruro d'ammonio - Solfato ammonico.</i>	
	Concimi nitrici	» 406
	<i>Nitrato d'ammonio - Nitrato di calcio - Nitrato di sodio.</i>	
5.11	Fertilizzanti fosfatici	» 410
	Superfosfato semplice	» 411
	Superfosfati doppi e tripli	» 413
6.11	Fertilizzanti potassici	» 414
	Cloruro di potassio	» 414
	Solfato di potassio	» 416
7.11	Fertilizzanti misti	» 418
	Fertilizzanti composti	» 418
	<i>Nitrato di potassio - Fosfati e polifosfati ammoniaci - Fosfati potassici.</i>	
	Fertilizzanti complessi	» 423
	<i>Mescolanze di concimi semplici - Prodotti di reazioni incrociate.</i>	

12 | SODIO, POTASSIO E COMPOSTI CORRELATIVI Pag. 429

1.12	I maggiori composti naturali del sodio e del potassio	» 429
	Cloruro di sodio	» 429
	Cloruro di potassio	» 431
2.12	Sodio e potassio metallici	» 432
	Proprietà e preparazioni	» 432
	Usi di sodio e potassio	» 433
3.12	Perossidi di sodio e di potassio	» 433
4.12	I carbonati di sodio e di potassio	» 434
	Carbonato di sodio («soda»)	» 434

	<i>Preparazione della soda - Statistiche di produzione ed usi della soda.</i>	
	Carbonato di potassio («potassa»)	Pag. 440
5.12	Gli idrossidi di sodio e di potassio	» 441
	Idrossido di sodio («soda caustica»)	» 441
	<i>Caustificazione del carbonato sodico - Concentrazione della soda caustica - Idrossido di potassio («potassa caustica»).</i>	
6.12	I minori composti industriali del sodio	» 447
7.12	Altri composti industriali del potassio	» 448
8.12	L'industria dell'acqua ossigenata	» 449
9.12	Pericoli da alcali e rimedi contro gli alcali	» 451

13 | ASPETTI CHIMICI DELLA METALLURGIA INDUSTRIALE ... Pag. 453

1.13	La chimica non disciplina tutta la metallurgia	» 453
------	--	-------

PARTE PRIMA

STRUTTURA DEI METALLI E COSTITUZIONE DI LEGHE

2.13	Lo stato metallico	Pag. 454
	Proprietà fisiche dei metalli	» 454
	Il legame metallico	» 454
	Struttura cristallina metallica	» 456
	Giustificazione delle proprietà fisiche dei metalli	» 457
3.13	Proprietà chimiche dei metalli	» 458
	Corrodibilità dei materiali metallici	» 459
	Passività dei metalli	» 459
	Alligabilità dei metalli	» 460
4.13	Leghe metalliche	» 460
	Composizione e proprietà fondamentali delle leghe	» 461
	Struttura delle leghe	» 461
	<i>Soluzioni solide - Composti intermetallici - Imperfezioni e difetti dei reticoli cristallini.</i>	
	Formazioni di leghe per azione di reattivi su superfici metalliche	» 468

PARTE SECONDA

METALLURGIA GENERALE

5.13	Risorse naturali dei metalli. Prospettive	Pag. 470
6.13	Arricchimento dei minerali metallici	» 471
7.13	Trattamenti premetallurgici	» 474

	Lisciviazione	Pag. 474
	Processi d'arrostimento	» 474
	Processi d'agglomerazione	» 475
	<i>Pelletizzazione - Arrostimento agglomerante.</i>	
8.13	Natura dei trattamenti metallurgici	» 477
	Processi di riduzione	» 477
	<i>Teoria ed agenti della riduzione - Apparecchiature per la riduzione.</i>	
	Scorificazione	» 481
	Processi galvanici («cementazioni»)	» 481
	Processi elettrolitici	» 481
	Affinazione dei metalli	» 482
9.13	Coordinamento e chimica dei processi metallurgici	» 484

PARTE TERZA

SIDERURGIA

10.13	Materie prime per siderurgia	Pag. 486
	Carica minerale per altoforno	» 486
	Coke siderurgico	» 488
	Aria comburente	» 488
	I fondenti («scorificanti») per altoforno	» 488
11.13	Produzione della ghisa in altoforno	» 489
	La struttura e il meccanismo di funzionamento dell'altoforno .	» 489
	Il regime termico e chimico dell'altoforno	» 489
	I prodotti dell'altoforno e le sue apparecchiature ausiliarie . . .	» 491
12.13	Perfezionamenti fatti all'altoforno ed alterazioni sperimentate dell'altoforno	» 493
13.13	Fenomenologie chimico-fisiche coinvolte nei processi di conversione della ghisa in acciaio	» 494
	Analogie e differenze di procedimenti	» 494
	Processi chimici possibili	» 495
	<i>Desilicizzazione - Decarburazione - Demanganizzazione - Defosforazione - Desolforazione.</i>	
	Apparecchiature di conversione	» 497
	<i>Convertitori a ossigeno - Forni elettrici - Forni Martin - Siemens.</i>	
	La lingottizzazione semplice e desossidante l'acciaio	» 501
14.13	Ferro e principali costituenti strutturali delle sue leghe	» 503
	Proprietà chimico-fisiche-meccaniche del ferro	» 503
	I principali componenti delle leghe ferro-carbonio	» 504
15.13	Il diagramma di stato ferro-carbonio	» 505
	Zona superiore del diagramma	» 505
	Zona inferiore del diagramma di stato Fe-C	» 506
	Limiti relativi ed importanza in assoluto del diagramma Fe-C	» 509

16.13	Le ghise	Pag.	509
17.13	Gli acciai	»	510
	Inquadratura commerciale degli acciai	»	510
	Inquadratura ufficiale degli acciai	»	512
	Rassegna tecnologica d'acciai	»	512
18.13	Le ferroleghie	»	515

PARTE QUARTA
I METALLI NON FERROSI

19.13	Metalli della grande tecnologia	Pag.	517
	Alluminio	»	518
	<i>Proprietà e stato naturale - Metallurgia dell'alluminio - Usi dell'alluminio.</i>		
	Rame	»	523
	<i>Proprietà e stato naturale - Metallurgia del rame - Usi del rame.</i>		
	Nichel	»	529
	<i>Proprietà e stato naturale - Metallurgia del nichel - Usi del nichel.</i>		
	Zinco	»	532
	<i>Metallurgia dello zinco - Usi dello zinco.</i>		
	Piombo	»	536
	<i>Metallurgia del piombo - Usi del piombo.</i>		
	Cromo	»	538
	<i>Metallurgia del cromo - Usi del cromo.</i>		
	Manganese	»	540
	<i>Metallurgia del manganese - Usi del manganese.</i>		
	Stagno	»	542
	<i>Metallurgia dello stagno - Usi dello stagno.</i>		
20.13	Metalli di tecnologie specialistiche	»	543
	Antimonio	»	544
	Berillio	»	544
	Cadmio	»	545
	Cobalto	»	546
	Germanio e silicio	»	547
	Magnesio	»	550
	Mercurio	»	552
	Molibdeno	»	553
	Niobio e tantalio	»	554
	Selenio e tellurio	»	555
	Titanio	»	556
	<i>Metallurgia del titanio - Usi del titanio.</i>		
	Tungsteno	»	559
	Uranio	»	560

	<i>Metallurgia dell'uranio - Cenno alla preparazione di cariche per reattori - Usi dell'uranio.</i>	
	Vanadio	Pag. 563
	Zirconio ed afnio	» 564
	<i>Produzione di zirconio, afnio e di ZrO₂ - Usi di zirconio e d'afnio.</i>	
21.13	I metalli preziosi	» 566
	Argento	» 566
	Oro	» 569
	Platino e palladio	» 570
22.13	Pericoli da metallurgia e da diffusione di metalli	» 573

14 | PRODOTTI SILICATICI E SUCCEDANEI Pag. 575

PARTE PRIMA

CERAMICHE

1.14	Definizione e classificazione dei prodotti ceramici	Pag. 575
2.14	Ceramiche tradizionali	» 576
	Materie prime e componenti secondari di prodotti ceramici	» 576
	<i>Struttura fondamentale delle argille - Componenti accessori delle argille - La silice e il suo ruolo in ceramica - I feldspati in ceramica.</i>	
	Produzione delle ceramiche	» 589
	<i>Pretrattamento degli ingredienti - Preparazione degli impasti - Messa in forma dei prodotti ceramici - Essiccazione delle sagome - Cottura dei manufatti ceramici - Finitura di prodotti ceramici cotti.</i>	
	I tipi di prodotti ceramici tradizionali	» 598
	<i>I laterizi - I refrattari - Le porcellane - I grès - Le ceramiche minori</i>	» 604
3.14	Ceramiche delle nuove tecnologie	» 605
	Produzione delle ceramiche speciali	» 606
	Rassegna delle più note ceramiche delle nuove tecnologie	» 606
	<i>Ceramiche fissili - Ceramiche elettrotecniche ed elettroniche - I superrefrattari - I cermets.</i>	

PARTE SECONDA

VETRI SILICATICI

4.14	Lo stato vetroso	Pag. 611
5.14	Struttura dei vetri	» 612
6.14	Materie prime per vetri d'uso pratico	» 614

	Vetrificanti	Pag. 614
	Fondenti	» 615
	Stabilizzanti	» 615
	Accessori	» 616
	<i>Affinanti - Decoloranti - Opacizzanti - Coloranti.</i>	
7.14	Produzione industriale dei vetri	» 618
	Preparazione della carica ed esecuzione della fusione	» 618
	<i>Forni a crogiolo - Forni a vasca - Forni a bacino.</i>	
	Teoria della fusione e operazioni d'affinaggio e correzione	» 621
	Formatura dei vetri	» 622
	<i>Stampaggio-soffiatura - Laminazione - Stiramento meccanico - Galleggiamento - Filatura - Pressatura e colatura.</i>	
	Finitura dei vetri	» 627
	<i>Ricottura - Tempra - Pulitura e lucidatura. Cristalli industriali.</i>	
8.14	Difetti dei vetri	» 628
9.14	Classificazione e rassegna dei vetri	» 629
	Vetri di varia composizione	» 629
	<i>Vetri di silice - Vetri comuni - Vetri alla potassa e vetri al piombo - Vetri borosilicati.</i>	
	Vetri di varia lavorazione	» 631
	<i>Vetri smerigliati e vetri semicristallo - Vetri armati e vetri di sicurezza.</i>	
10.14	Smalti	» 632

PARTE TERZA

LEGANTI E CONGLOMERATI EDILIZI

11.14	Generalità sui materiali leganti edilizi	Pag. 633
12.14	I leganti aerei	» 634
	Calci aeree	» 634
	<i>Preparazione delle calci aeree - Prodotti d'estinzione delle calci aeree.</i>	
	Malte aeree	» 637
	Natura, reazioni ed usi del gesso	» 637
13.14	I leganti idraulici	» 639

LEGANTI IDRAULICI NORMALIZZATI

	Cemento portland	» 641
	<i>Costituzione del portland - Moduli o «indici» del cemento - Composizione ottimale d'un portland - Aspetto microscopico del clinker - Presa e indurimento del cemento - Il gesso e l'idratazione dei cementi - Costituzione del portland finito. Conseguenze - Altri coefficienti di presa e indurimento del cemento - Calore d'idratazione del cemento - Ciclo tecnologico di produzione del cemento - Leganti pozzolanici.</i>	
	Leganti d'altoforno	» 656

Cementi alluminosi	Pag. 657
Cementi per sbarramenti di ritenuta	» 658
Agglomeranti cementizi	» 658
Calci idrauliche e loro derivati	» 659

LEGANTI IDRAULICI NON NORMALIZZATI

Cementi speciali	» 660
<i>Cementi ferrici - Cementi a basso calore d'idratazione - Cementi per perforazioni profonde - Cementi bianchi e derivati colorati - Cementi metallurgici supersolfatati - Cementi magnesiaci o «cementi Sorel» - Cementi senza ritiro e cementi espandenti - Cementi antiacido.</i>	
14.14 Conglomerati artificiali edilizi	» 663
Componenti di base ed additivi per calcestruzzi	» 664
<i>Acque per le costruzioni - Aggregati dei calcestruzzi - Additivi specifici dei calcestruzzi - Prodotti di curing.</i>	
Granulometria degli inerti dei calcestruzzi	» 669
Calcestruzzo armato («cemento armato»)	» 670
Conglomerati leggeri simili al calcestruzzo	» 671
Conglomerati leggeri diversi dal calcestruzzo	» 673
<i>Conglomerati a base di fibre vegetali - Conglomerati di cemento - amianto («eternit»).</i>	

15 | BITUMI, CATRAMI E DERIVATI Pag. 675

1.15 I bitumi: natura, caratteristiche classificazioni	» 675
2.15 I catrami	» 678
3.15 Asfalti e loro classiche forme d'uso	» 680
4.15 Conglomerati bituminosi	» 681
Conglomerati bituminosi chiusi	» 681
Conglomerati bituminosi semiaperti	» 681
Conglomerati bituminosi aperti	» 682
Conglomerati bituminosi non normalizzati	» 682
5.15 Altre forme d'uso di bitumi e catrami	» 683
Emulsioni bituminose e catramose	» 683
Bitumi e catrami flussati (o «liquidi»)	» 683
Vernici bituminose	» 684
Cartoni e guaine catramati o bituminati	» 685

APPENDICE	» 687
INDICE ANALITICO	» 712
INDICE SISTEMATICO	» 720

5 | PROBLEMATICA DELLE ACQUE

La tecnologia chimica industriale è sia responsabile di un adatto approvvigionamento idrico in ogni campo e sia garante della salvaguardia ecologica dell'idrosfera.

Ciò perché da un lato l'aspetto chimico dei trattamenti che gli approvvigionamenti e la protezione d'acque richiedono è complessivamente di gran lunga più importante di qualsiasi altro (meccanico, fisico, biologico) e, d'altro canto, è certamente più congeniale ai chimici che agli esperti delle altre tecnologie la preparazione interdisciplinare occorrente per gestire quei compiti.

Inoltre la tecnologia chimica industriale è complessivamente «all'avanguardia» nel creare seri problemi al patrimonio idrico terrestre.

Per questi motivi l'argomento «acqua» verrà qui affrontato, come dice il titolo del capitolo, in tutta la sua complessa problematica.

1.5 Il ciclo terrestre dell'acqua e come sorgono i problemi dell'acqua

Tutta l'acqua presente sulla Terra è ciclicamente intercomunicante, nel senso che le acque lasciano continuamente, evaporando, la superficie terrestre e vi ricadono come prodotto meteorico di vario tipo.

Si calcola che dalla Terra, litosfera ed idrosfera, evaporino mediamente $3,6 \cdot 10^{14}$ tonnellate d'acqua all'anno e che altrettante vi ricadano sotto forma di neve, d'acqua e di grandine. Circa un quarto dell'acqua in ricaduta investe la terraferma («acqua litosferica») ed il resto l'idrosfera. Una parte dell'acqua litosferica finisce al servizio della biosfera, mentre in gran parte si perde tornando ai mari ove, per la più grande superficie subaerea, più intensa è poi l'evaporazione.

L'uomo oggi giorno, almeno nelle nazioni a più alto tenore di vita,

imbriglia una cospicua parte dell'acqua litosferica ed altra egli ne ricava da falde sotterranee per farla servire ad usi agrari («acque irrigue»), ad usi civili («acque potabili») e ad usi industriali («acque industriali»). Le stime danno in proposito queste destinazioni: 39% ad usi agrari, 12% ad usi civili e 49% ad usi industriali.

In conseguenza di ciò, più del 60% dell'acqua sfruttata dall'uomo è soggetta, in un paese come l'Italia, a logorio della sua purezza in connessione con gli usi che se ne fanno. Sono sia questo sistematico deterioramento delle qualità di gran parte dell'acqua disponibile sia — date le crescenti richieste — la progressiva carenza d'acqua non altamente salata che concorrono a creare la problematica delle acque.

Vi sono peraltro anche altri motivi del crearsi di problemi per le acque. Tra l'altro queste esplicano potere solvente su rocce caricandosi dei «sali della durezza», cioè assumendo composizione inammissibile per molte attività industriali e civili. Tra i componenti delle rocce che, dilavati, caricano l'acqua di sali della durezza ci sono principalmente CaCO_3 ed MgCO_3 (anche in forma del sale doppio «dolomite») bicarbonatabili ad opera di CO_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (solubilità 0,202 g in 100 grammi di acqua), MgSiO_4 ed altri silicati ed idrosilicati che, praticamente insolubili in acqua pura, si sciolgono sempre più in acque aventi pH inferiore a 5,5. Di conseguenza, per complessi fenomeni di spostamento ed idrolitici si verifica presenza di silice nelle acque.

2.5 Requisiti delle acque in rapporto agli usi

Le destinazioni delle acque litosferiche captate dall'uomo sono dunque agrarie, civili e industriali.

Le **acque di irrigazione** devono essere:

- trasparenti in superficie e limpide in massa,
- esenti da veleni dei vegetali,
- non troppo salate.

La *non trasparenza* superficiale nociva alle acque irrigue è conseguenza d'inquinamento da idrocarburi, schiume e polveri e la varia opacità in massa, pure nociva, è per lo più dovuta a sospensioni di polveri, ad emulsioni d'oli minerali o di solventi idrofobi e a dispersioni di melme a base grassa.

Sono *veleni* dei vegetali soprattutto i cianuri, i fenoli ed i composti aromatici in generale, i solfiti ed i metalli pesanti. Da alcuni anni poi diventa sempre più un grave motivo d'allarme l'eventualità che le acque di irrigazione contengano insetticidi e diserbanti raccolti, magari, nel pieno stesso del territorio alla cui fertilità sono destinate.

I *sali* nell'acqua d'irrigazione non devono superare il limite massimo di 2,5 g/l ed i cloruri, in particolare, devono raggiungere, al limite, gli 0,5 g/l.

Le acque irrigue devono pure essere sufficientemente aereate.

Le **acque potabili** (o «d'uso civile») devono risultare:

- batteriologicamente innocue, incolori, inodori e limpide,

— esenti da veleni e da sintomi di veleni (quali sono l'ammoniaca ed i nitriti),

— moderatamente dotate di certi sali disciolti e ben aerate, così da risultare gradevolmente gustose.

Dal punto di vista qualitativo gli *anioni* ammessi nelle buone acque potabili sono i bicarbonati, i cloruri, i solfati e i nitrati ed i cationi senz'altro consentiti sono Na^+ , K^+ ed Li^+ . Moderatamente consentiti sono Ca^{2+} ed Mg^{2+} . Sono anche tollerate piccole dosi di cationi di alluminio, ferro e manganese. Assolutamente assenti devono essere i metalli pesanti tipo piombo, mercurio, rame e cromo.

Quantitativamente, il residuo secco delle buone acque potabili non deve superare gli 0,5 g/l e in quest'ambito i sali di calcio e magnesio devono essere espressi da non più di 0,2 g di $\text{CaO} + \text{MgO}$, i solfati non devono comportare più di 0,1 g di SO_3 , i cloruri oltre 0,035 g di Cl ed i nitrati non devono corrispondere a più di 0,027 g di N_2O_5 .

Infine le acque giudicate potabili devono avere temperature comprese tra i 7 e i 15 °C.

Le acque industriali devono, in linea di massima:

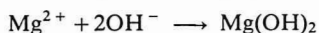
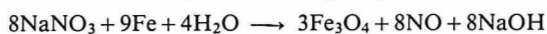
— non mostrarsi torbide per sospensioni vere (di terre, di polveri, ecc.) né per sospensioni colloidali (di argille, di silice, ecc.);

— non sciogliere affatto gas corrosivi (ossigeno, CO_2 , H_2S ed H_2) né qualunque altro gas (es. N_2) in quantità tali da costituire potenziali pericoli per entrata in forte pressione;

— non contenere solubilizzati sali di potere corrosivo (es. MgCl_2 , Na_2CO_3 e nitrati) o incrostanti (per lo più sali di calcio e di magnesio).

Taluni sali risultano nocivi all'acqua industriale per più motivi.

Così i bicarbonati di calcio e di magnesio oltre che produrre CO_2 aggressiva per strutture metalliche a caldo provocano precipitati insolubili (es. CaCO_3) ed i nitrati sono dannosi sia per i fenomeni d'ossidazione che possono causare e sia perché determinano formazione di idrossidi caustici e capaci di dare precipitati ad esempio con il magnesio:



Tuttavia le esigenze delle acque industriali sono assai varie e specifiche per ogni tipo di industria in cui devono essere usate: al punto che non si possono predeterminare in maniera generale.

Tra l'altro: le *acque per zuccherifici* non devono contenere anioni che ostacolano il cristallizzare dello zucchero facendo aumentare la resa in melasso (es. CO_3^{2-} , NO_3^- ed SO_4^{2-}); le *acque per industrie alimentari* devono, tra l'altro, essere batteriologicamente pure ed esenti da ammoniaca e da nitriti; le *acque per impianti di refrigerazione* devono essere sterilizzate, disaerate e private di ogni agente incrostante, per evitare — oltretutto per lo svilupparsi di microrganismi appiccicosi (alghe) — la buona trasmissione del calore; le *acque di alimentazione di caldaie* devono essere praticamente esenti da ossigeno, da durezza, da ferro e manganese e quasi esenti da CO_2 (libera e combinata) e da silice ed avere $\text{pH} = 7 \div 9,5$ causato solo da alcali volatili.

3.5 Stato delle acque praticamente disponibili

S'impone una preliminare rassegna di come sono disponibili le acque.

Acque di primo impiego ed acque di reimpiego

In natura si trovano disponibili acque grezze (principalmente¹) rappresentate da:

- acque dure marine;
- acque dolci o dure superficiali: di torrenti, fiumi, laghi e stagni;
- acque dolci o dure sotterranee: di sorgente o di pozzo artesiano.

I termini *dolci* e *dure* sono usati per caratterizzare le acque in relazione, come diremo, con il contenuto in esse di determinati sali.

Le acque grezze naturali non marine possono trovare delle utilizzazioni in uno o più campi di pratico impiego dell'acqua; agrario, civile o industriale.

Tutte quante le acque grezze naturali si usano in ogni campo dopo essere state sottoposte a procedimenti che ne allontanano componenti indesiderati per gli impieghi cui sono destinate, cioè in forma di «acque trattate».

Quando vengono utilizzate, le acque naturali, sia grezze che trattate, sono da considerare **acque di primo impiego**.

Una volta usate, le acque di primo impiego diventano *acque reflue* (*refluo* = che fluisce indietro) o «acque di scarico». Le acque reflue vengono mandate in bacini idrici dopo averle riambientate o vengono riutilizzate dopo opportuno trattamento o senz'alcun trattamento: a seconda che occorra o no ripristinarne certe caratteristiche. Così: prima del riciclo si filtra l'acqua servita in un processo d'abbattimento di polveri di fumi, mentre si torna ad utilizzare tal quale in un processo di deterzione (ad esempio) l'acqua scaldatasi in operazione di raffreddamento.

Le acque riciclate, con o senza trattamento, sono **acque di reimpiego**.

Durezza delle acque

L'acqua scorrendo sul suolo e nel sottosuolo si carica di sali e così finisce per arricchirsi più o meno. Particolare importanza assume il processo di dissoluzione del calcare operato dall'acqua che tiene sciolta, per lavaggio atmosferico e per scorrimento nel terreno biosferico, dell'anidride carbonica:



1. Altre acque naturali sono le *piovane*, eventualmente raccolte per essere sfruttate, e le *acque dei nevai e dei ghiacciai*. Si tratta di acque molto pure ma scarsamente utilizzate.

Dal punto di vista delle conseguenze che per le loro utilizzazioni civili e industriali i sali provocano sulle acque vanno distinti:

- i sali alcalini, solitamente considerati innocui;
- i sali di calcio e di magnesio (ed eventualmente d'altri metalli alcalino-terrosi o terrosi, come ferro e manganese) sempre nocivi se superano determinati quantitativi.

Si definiscono *dure* le acque che contengono più di un certo quantitativo di sali di calcio, magnesio, ecc. («sali della durezza»).

A livello civile la forte durezza rende le acque non potabili, ostacola cotture ed impedisce il lavaggio con saponi, perché causa precipitazioni di sali appiccicosi. La reazione seguente indica tale formazione.



Le acque dure sono industrialmente inammissibili per una serie di motivi. Ne accenniamo qualcuno.

Ostruendo tubazioni ed incrostando caldaie, le acque dure abbassano il coefficiente di scambio termico obbligando ad operare dispendiosi e pericolosi surriscaldamenti. Tra l'altro, eventuali incrinature nell'incrostazione provocano contatti acqua-lamiere surriscaldate cui conseguono improvvise abnormi produzioni di vapore che possono causare scoppi e, comunque, gravi anomalie nel regime di resistenze meccaniche richieste all'impianto.

Pericoli di rotture sussistono anche per corrosione delle strutture sotto le incrostazioni, a seguito del fenomeno dell'*aerazione differenziale*. Avviene precisamente che, per la scarsità d'ossigeno, sotto l'incrostazione non vi è richiesta d'elettroni riducenti, mentre — viceversa — in ogni punto scoperto della struttura una tale richiesta esiste accentuata dallo squilibrio «elettrofilo» tra le due zone. Gli elettroni perciò richiamati dai punti aerati migrano a questi attraverso il metallo, da quelli non aerati che, di conseguenza, subiscono ossidazione («deeletronizzazione») cioè corrosione.

Con acque dure inoltre non possono essere alimentate unità elettrochimiche (es. batterie), le cartiere (dove è — tra l'altro — impedito l'incollaggio antiespandente della carta), le concerie (viene ostacolato il rigonfiamento delle pelli), le tintorie (i coloranti macchiano) e via dicendo.

La durezza di un'acqua si esprime tradizionalmente in **gradi di durezza**, *intesi come parti di sostanze standard virtualmente contenute in determinate parti di acqua*. Gli standard sono:

- il carbonato di calcio per i *gradi francesi* (°F), per i *gradi inglesi* (°I) e per i *gradi USA* (°USA);
- l'ossido di calcio per i *gradi tedeschi* (°T).

Diciamo specificamente solo cosa si deve intendere per gradi francesi (i più usati in Italia) e per gradi tedeschi.

Un'acqua ha durezza 1°F se contiene sali indurenti in quantità corrispondente a 1 g di CaCO₃ in 100 l (10 mg/l) ed ha durezza 1°T se il suo contenuto di sali della durezza corrispondente a 1 g di CaO in 100 l (10 mg/l).

Oggi giorno però la durezza si esprime spesso in meq/l e ppm di CaCO₃ e, meno comunemente, in meq/l o in ppm («parti per milione» di CaO).

Riportiamo la tabella di conversione dei vari gradi di durezza e le corrispondenze in meq/l e in ppm di CaCO₃.

Tab. 1-5 **Varie unità di misura della durezza**

Tipo di gradi	°F	°T	°I	°USA	meq/l	ppm _{CaCO₃}
francesi	1	0,56	0,7	0,58	0,2	10
tedeschi	1,79	1	1,25	1,05	0,36	17,85
inglesi	1,43	0,8	1	0,84	0,29	14,3
USA	1,71	0,96	1,2	1	0,34	17,1

La durezza può servire come criterio di classificazione delle acque: ciò che s'intende qui brevemente provare in maniera prospettica (Tab. 2-5).

Tab. 2-5 **Classificazione di acque (A.) in base alla durezza**

Tipi	Durezza (°F)	Esempi	Tipi	Durezza (°F)	Esempi
A. molto dolci	0 ÷ 4	piovane	A. discretamente dure	12 ÷ 18	di fiume e di lago trattate
A. dolci	4 ÷ 8	oligominerali	A. dure	18 ÷ 30	permeanti dei calcari
A. medio-dure	8 ÷ 12	Acque potabili secondo il WHO ²	A. molto dure	30...	di zone collinose includenti gesso

In altra tabella (Tab. 3-5) si riporta la distinzione che comunemente si fa della durezza delle acque.

Tab. 3-5 **Tipi di durezza di un'acqua**

Classificazione	Definizione	Principali fattori salini
Durezza temporanea	Scompare facendo bollire l'acqua	I bicarbonati dei metalli della durezza
Durezza permanente	Indifferente all'ebollizione	Solfati, cloruri e nitrati dei metalli della durezza
Durezza totale	Somma delle precedenti	Tutti i sali della durezza

Acque salse

Mentre la durezza è la tipica caratteristica delle acque naturali grezze superficiali e sotterranee, la qualità di spicco delle acque grezze marine e di alcune acque di superficie e sotterranee («acque salmastre») e di certe acque reflue è la salsedine.

2. WHO = World Health Organisation; l'ente mondiale della sanità in seno all'ONU.

Non esiste un limite di salsedine per potere definire salata («salsa») un'acqua; al punto che le acque non decisamente salate vengono considerate tali sulla base degli usi che se ne devono fare.

In generale le acque salse sono anche dure, ma non lo sono necessariamente perché a costituire la salsedine di un'acqua concorre ogni sale (anche alcalino) in essa presente.

Oltre che per gli inconvenienti dati dalla durezza, se gli è contestuale, le acque salse sono:

- agricolmente inammissibili perché già un notevole tenore di sali nuoce ai vegetali, soprattutto per gli effetti osmotico-disidratanti che provocano sui loro tessuti;
- civilmente disadatte per dissetare e per tutti gli usi che escludono la presenza di soluti ionici;
- industrialmente nocive nei più vari processi: per fenomeni di corrosione, per dannosi effetti ebullioscopici, per incompatibilità con processi chimici e così via.

Il ricorso, previa dissalazione, all'uso di acque salse grezze, specie marine, o di ricupero sta oggi diventando una comune pratica: grazie oltretutto ai perfezionati metodi che vedremo disponibili allo scopo.

Acque inquinate

Le direttive CEE indicano cosa significa inquinare artificialmente le acque, così esprimendosi: «**L'inquinamento idrico è l'effetto dello scarico in ambiente acquoso di sostanze o di energie tali da compromettere la salute umana, da nuocere alle risorse dei viventi e, più in generale, al sistema ecologico idrico e da costituire ostacolo a qualsiasi legittimo uso delle acque, comprese le attrattive ambientali.**».

L'inquinamento artificiale è oggi di gran lunga il più diffuso e grave, ma è chiaro che tutte le acque contenenti sostanze od energie con conseguenze del tipo di quelle provocate dall'inquinamento prodotto dall'uomo sono da considerare inquinate. Ad esempio, sono inquinate le acque naturali divenute gessose per dilavamento dei calanchi appenninici e le acque stagnanti che lo sviluppo di certa fauna e flora abbia prima eccessivamente impoverito d'ossigeno e successivamente arricchito di microrganismi di putrefazione anaerobici.

I livelli d'inquinamento d'acque e le loro cause

L'inquinamento delle acque può svilupparsi a tre livelli. Esistono infatti:

- modifiche delle qualità delle acque dovute a cause naturali insopprimibili, in quanto l'acqua piovana a contatto con certi ambienti aerei (di distretti vulcanici, ad esempio) e più generalmente del suolo porta in soluzione ed in sospensione sostanze dei mondi minerale e biologico («inquinamento naturale»);
- uno stato d'inquinamento superiore a quello ora detto, derivante

dall'apporto, per cause non naturali, di inquinanti di varia specie, perfino energetica (calore), in quantità peraltro non superiore alla capacità d'autodepurarsi dell'acqua interessata («inquinamento indotto temporaneo»);

— un terzo e più grave stato d'inquinamento quando gli inquinanti sono tali, qualitativamente e quantitativamente, da inibire la capacità d'autodepurazione dell'acqua e da provocare quindi permanente degrado o estetico o funzionale del corpo idrico («inquinamento indotto permanente»).

Cause dell'inquinamento naturale dell'acqua (compresa la salsedine marina) sono da sempre in primo luogo la struttura lito-biosferica terrestre e poi l'attività esogena della Terra e certi fenomeni meteorologici.

Fattori artificiali dell'inquinamento delle acque sono essenzialmente gli scarichi di fognature civili, quelli d'effluenti industriali e quelli connessi con l'attività agrario-zootecnica; cui talvolta consegue l'innescarsi di processo — per così dire — inverso dell'autodepurazione, qual è, in sostanza, l'«eutrofizzazione».

Gli *scarichi di fognature civili* portano nelle acque soprattutto prodotti del metabolismo umano con relativa carica batterica, inquinanti derivati da attività domestiche (alimentazione e lavaggio) e rifiuti convogliati dal drenaggio di strade, piazzali ed officine.

Gli *scarichi di effluenti industriali*, contenenti residui delle materie prime e dei prodotti intermedi e finali delle lavorazioni, hanno composizione variabile a seconda del tipo d'industria che li fornisce.

Per esempio, si può ricordare che industrie come l'alimentare, la tessile, la conciaria e la cartaria apportano alle acque sia residui tipici anche degli scarichi urbani oltre che specifici prodotti: come i coloranti e gli additivi di finisaggio; le industrie grafiche e le galvaniche sono apportatrici di acque acide o basiche, intossicate — tra l'altro — da cationi di metalli pesanti, da cromati, da riducenti e talvolta da cianuri; le raffinerie di petrolio riversano in acqua (in particolare) ammoniacca, solfuri ed oli minerali.

Gli *scarichi inerenti l'attività agrario-zootecnica* apportano alle acque soprattutto liquami metabolici e di lavorazioni di mattatoio e lattiero-casearie, pesticidi e concimi dilavati.

L'*eutrofizzazione* è termine che indica l'eccessivo accrescimento e moltiplicazione disordinata di vegetali acquatici, soprattutto di alghe, per effetto della presenza nelle acque di dosi assai elevate di sostanze nutritive.

Pur usato nel significato ora detto, di per sé «eutrofizzazione» indica che un ambiente si trova in condizioni di poter fornire ottimo nutrimento a certe specie viventi; fermo restando il fatto che sono praticamente possibili vari gradi di trofizzazione, come si rileverà dalla Tab. 4-5.

Principali responsabili dell'eutrofizzazione sono i composti azotati e fosforati provenienti da scarichi civili o industriali e dal dilavamento dei fertilizzanti in agricoltura.

I laghi con modesto ricambio d'acqua e gli stagni in genere sono particolarmente interessati da questo fenomeno che, dopo essersi imposta-

to, rende inospitale l'ambiente per pesci ed altri viventi aerobici, pur se gli si interrompe l'apporto di sostanze nutritive.

Avviene infatti che l'eccessivo sviluppo di vegetali di breve vita, come le alghe, porta in putrefazione grandi quantità di materiale organico: ciò che richiede gran consumo d'ossigeno per la tendenza dei residui organici a trasformarsi in CO₂ ed H₂O. In questa stessa trasformazione tornano a rendersi disponibili fosforo ed azoto che nuovamente favoriscono, per quanto possibile, il risviluppo di vegetali; mantenendo l'ambiente permanentemente impedito per viventi aerobici.

La seguente tabella riassume la terminologia corrente delle acque interessate da trofismo, ne descrive lo stato e specifica le condizioni d'ossigenazione, di fosforazione e d'azotazione di tali acque.

Tab. 4-5 Gradi di trofizzazione delle acque e loro caratteristiche

<i>Tipi di acque</i>	<i>Come si presentano</i>	<i>Ossigeno presente e contenuti di fosforo e d'azoto</i>
<i>Eutrofiche</i>	Infestate da alghe, torbide, verdastre, chiaramente maleodoranti e di sapore cattivo	<i>Ossigeno</i> : meno di 2 mg/l (a 20 °C ed 1 atm) <i>Fosforo</i> (come P): più di 0,01 mg/l <i>Azoto</i> (come N): più di 0,3 mg/l
<i>Mesotrofiche</i>	Non limpide e di incipiente colore verde; dotate, a ben sentire, di chiaramente ingrati odore e sapore	<i>Ossigeno</i> : da 2 a circa 20 mg/l (20 °C e 1 atm) <i>Fosforo</i> : circa 0,002 mg/l <i>Azoto</i> : circa 0,06 mg/l
<i>Oligotrofiche</i>	Limpide ed incolori ad occhio nudo; praticamente inodori ed insapori. Molto scarse in esse le alghe.	<i>Ossigeno</i> : sui 40 mg/l (limite di saturazione in ossigeno dell'acqua a 20 °C ed 1 atm 44,34 mg/l) <i>Fosforo</i> : meno di 0,001 mg/l <i>Azoto</i> : meno di 0,03 mg/l

La richiesta d'ossigeno come indice d'inquinamento idrico

Non solo a seguito d'eutrofizzazione, ma anche quando un corpo idrico (acqua di mare, di fiume o di lago) tiene sospese o sciolte sostanze ossidabili tipo solfuri e composti solforosi, nitriti o sali ferrosi, prodotti del metabolismo animale, idrocarburi e la stragrande maggioranza delle sostanze organiche d'origine industriale, il corpo diventa inospitale per fauna ittica e per microrganismi aerobici che dovrebbero promuoverne l'attività autodepurante. Poiché gli inquinanti dei corpi idrici sono in genere sostanze che consumano ossigeno, si può ritenere che lo stato d'inquinamento di questi corpi sia proporzionale alla quantità di ossigeno che è richiesta per eliminare l'azione dei riducenti che li inquinano.

La domanda d'ossigeno di un corpo idrico è la quantità d'ossigeno, espressa in mg/l (pari a g/m³), richiesta per liberarlo dall'azione degli agenti che consumano ossigeno in esso presenti.

La domanda d'ossigeno di un corpo idrico può essere espressa come COD o come BOD, in riferimento:

— all'ossigeno consumato per ossidare in condizioni prefissate per via chimica tutte le sostanze d'azione riducente, ad eccezione dei cloruri, in esso presenti (COD);

— all'ossigeno consumato per ossidare biologicamente, pure in condizioni prefissate, una parte delle sostanze d'azione riducente che in esso sono presenti (BOD).

Le metodiche per determinare questi due parametri, rispettivamente di carattere chimico analitico inorganico il *Chemical Oxygen Demand* (COD) e di tipo biologico-chimico il *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) sono riportate dai testi di analisi tecniche chimiche e dai trattati sulle acque.

Talvolta, ma non sempre, il *BOD* viene specificato *BOD*₅ per indicare che la prova di determinazione è durata 5 giorni. Il *BOD*₅ rappresenta solo una frazione del totale d'ossigeno occorrente a trasformare completamente le sostanze organiche biodegradabili, perché l'intero processo si svolge in un tempo molto più lungo di 5 giorni (circa un mese). Ad esempio, per i liquami normali di fognatura civile il *BOD*₅ è poco più del 68% del *BOD* totale.

Mentre il *BOD* indica, per come viene sperimentalmente misurato, il contenuto di sostanze biodegradabili, il *COD* esprime il consumo di ossigeno che occorre per ottenere gli effetti prodotti dall'energica ossidazione chimica operata dal bicromato di potassio in ambiente d'acido solforico con cui lo si determina. Ai fini dunque sia di determinare l'azione depurante dei trattamenti biologici e sia di seguire l'andamento dell'inquinamento da sostanze biodegradabili dei corpi idrici viene fatto sistematico riferimento al *BOD*.

La Royal Commission of Sewage Disposal, l'ente britannico che ha messo a punto il metodo di determinazione del *BOD*, ritiene molto pulita un'acqua con *BOD* pari ad 1 ppm³, con dubbia presenza di sostanze inquinanti un'acqua con *BOD* di 5 ppm e sicuramente inquinata un'acqua con *BOD* di 10 ppm.

Secondo le vigenti disposizioni di legge le aziende già esistenti in Italia possono scaricare in acque pubbliche effluenti con *BOD* fino a 250 ppm mentre le nuove aziende devono fornire degli effluenti con *BOD* massimo di 40 ppm.

4.5 Eliminazione di sospensioni dalle acque

Le acque della più varia provenienza possono contenere corpi sospesi («sospensioni») in ampio campo di dimensioni dei corpi stessi. Infatti si va dai solidi grossolani di dimensioni dell'ordine di grandezza del metro, alle dispersioni colloidali dell'ordine di grandezza del micron ($1\mu = 10^{-6}$ m).

3. Si ricorda che 1 ppm è pari ad 1 mg/l o ad 1 g/m³.

I trattamenti per liberare dalle sospensioni le acque sono:

- la *grigliatura* per togliere solidi di dimensioni⁴ superiori ad 1 cm;
- la *sedimentazione*, che si presta per eliminare sospensioni da 1 cm a $5 \cdot 10^{-3}$ cm;
- la *filtrazione meccanica*⁵, che si presta per eliminare sospensioni da $5 \cdot 10^{-3}$ cm a 10^{-5} cm;
- la *coagulazione-flocculazione*, seguita da sedimentazione e/o da filtrazione per togliere le dispersioni colloidali.

Va notato che la filtrazione meccanica può di per sé sostituire la sedimentazione, perché è senz'altro possibile separare per filtrazione ogni particella che può sedimentare. Siccome però l'esercizio della sedimentazione è meno costoso di quello della filtrazione e questo incide tanto più sui costi quanta più sospensione si deve separare, nella pratica industriale si usa far precedere la sedimentazione alla filtrazione per renderne meno gravoso il compito ed abbassare, di conseguenza, le spese.

Grigliatura

La grigliatura è normalmente la prima operazione che s'incontra in un impianto di depurazione d'acqua di miniera o di scarico. Con essa si eliminano solidi grossolani, come fibre minerali, pezzi di legno, stracci e carte. Viene realizzata facendo passare l'acqua attraverso una griglia del tipo a barre, a maglie o a piatto forato; di forma piana, convessa o a tamburo. Le griglie di aperture maggiori, da 0,5 cm in su, sono normalmente del tipo a barre e quelle ad aperture minori sono a maglie o a piatti forati. La quantità di materiale trattenuto dipende senz'altro dalle dimensioni ma anche dalla forma delle aperture.

La Fig. 1/5 riportata alla pagina seguente mostra il funzionamento di principio di un certo tipo di griglia che serve ad intercettare acque per toglierne sospensioni grossolane.

Sedimentazione

La teoria del processo di sedimentazione («decantazione») è sviluppata nei corsi d'impianti chimici industriali e si applica solo approssimativamente al campo della depurazione delle acque, dove le particelle sospese hanno forme varie e dimensioni e pesi specifici non uniformi: proprio in discordanza con tale teoria, che perciò qui non viene riportata.

4. Le dimensioni qui date sono da intendersi «ordini di grandezza». Infatti in apparente contrasto con esse si dirà tra poco che vi sono griglie con apertura da 0,5 cm e si riscontra che tra i prodotti di sedimentazione ci sono anche particelle che raggiungono appena i 10^{-3} cm. A dispetto poi del limite inferiore dato qui per le particelle filtrabili, si trovano sfuggite ai filtri anche particelle di diametro un po' maggiore di 10^{-5} cm. Per questo motivo in pratica quando gran parte delle sospensioni si collocano al limite delle dimensioni che si dice richiedano un metodo di separazione piuttosto che un altro, questi si applicano entrambi successivamente per mondare e chiarificare le acque.

5. Esiste infatti, come vedremo (pag. 152), anche una «filtrazione biologica».

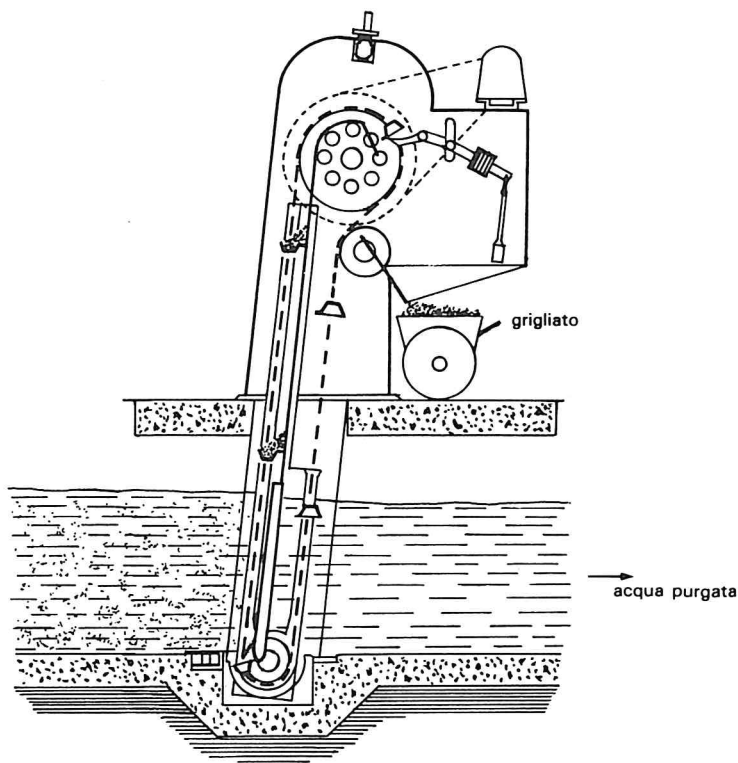


Fig. 1/5 - Le griglie intercettano solidi di notevoli dimensioni raccogliendoli in tazze che, elevate e ribaltate, caricano un vagoncino da scaricamento.

In pratica se un'acqua che contiene sospesi materiali di densità anche differente, mantenuti in sospensione da movimento turbolento, viene interessata da relativa quiete, si verifica in essa la sedimentazione dei materiali più pesanti. Tramite la sedimentazione dunque vengono separati per gravità da un corpo idrico i soluti di un certo intorno di dimensioni (e' peso) che vi sono tenuti in sospensione dalla turbolenza.

È attraverso sperimentazioni di laboratorio che si ricavano praticamente sia i valori riguardanti il dimensionamento dei bacini di sedimentazione nei quali l'acqua deve restare per un dato tempo onde garantire a certe particelle in essa sospese la possibilità di sedimentare e sia le altre condizioni operative che valgano a chiarificare al massimo il liquido attraverso questo solo procedimento.

Sono soprattutto le caratteristiche strutturali dei solidi da far sedimentare, i quali possono essere *granulari* come le sabbie e certe polveri o *flocculari* come degli ossidi idrati e molti componenti di fanghiglie biologiche, che condizionano la scelta della forma, delle dimensioni e delle condizioni di funzionamento delle apparecchiature: per provocare velocità e garantire tempi di residenza dell'acqua trattata favorevoli a chiarificarla per sedimentazione.

I sedimentatori sono generalmente costituiti da vasche circolari, ma anche rettangolari, in cemento o in ferro, col fondo leggermente inclinato verso una zona dove il fango sedimentato viene convogliato, sfruttando opportuni meccanismi raschiatori, per essere poi scaricato. In alternativa il fango può anche essere estratto direttamente dalle vasche con tubi d'aspirazione mobili.

In Fig. 2/5 è riprodotto in pianta ed in sezione un sedimentatore circolare nel quale l'acqua in entrata (l'«influyente») va in un distributore situato al centro della vasca e dal quale l'effluente esce mediante stramazzi disposti in periferia. Il distributore ha il precipuo compito di garantire l'entrata del liquido senza creare turbolenze.

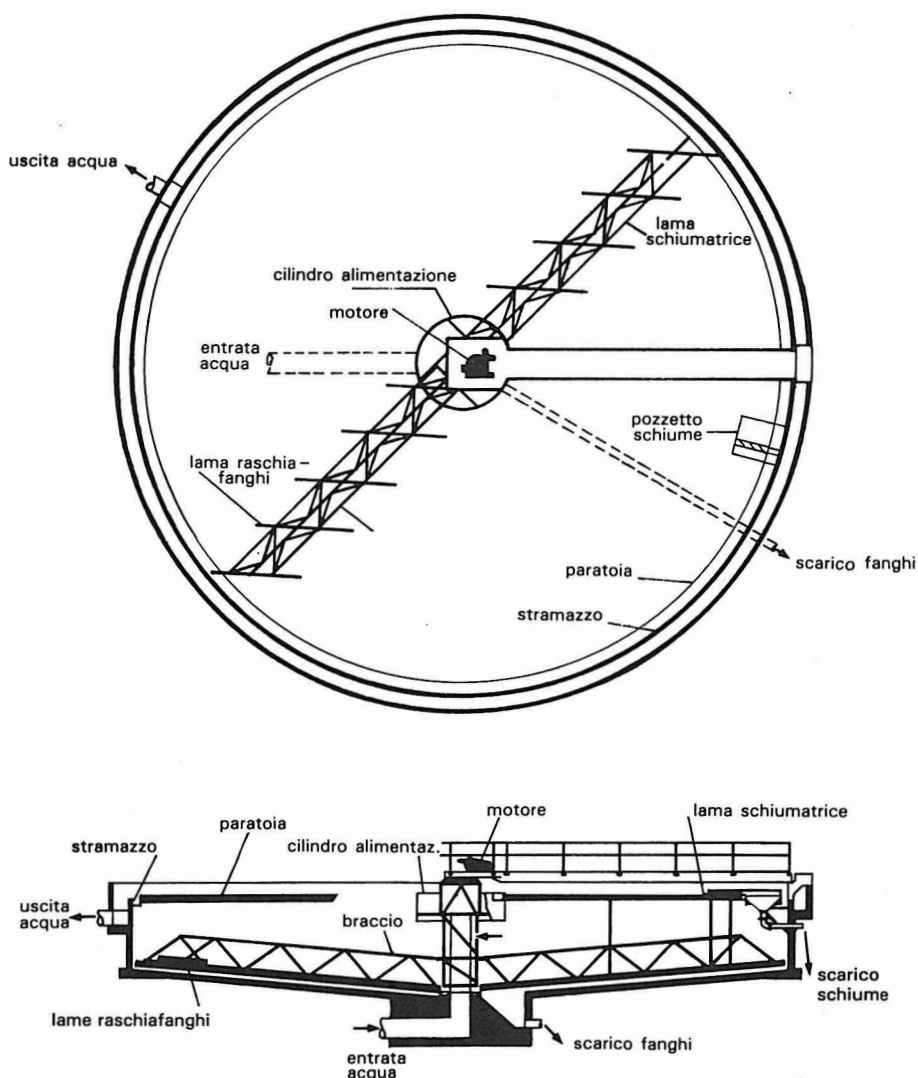


Fig. 2/5 - Pianta e sezione di sedimentatore circolare con meccanismo raschiafanghi a due bracci. Per i sedimentatori circolari il distributore dell'influente, posto al centro della vasca, è talvolta incorporato nella colonna di sostegno del meccanismo raschiafanghi.

I fanghi sono convogliati allo scarico da lame raschiafanghi e le sostanze galleggianti in superficie vengono raccolte usando lame schiumatrici; retti entrambi (raschiafanghi e schiumatori) da un'unico meccanismo girevole.

Filtrazione

La filtrazione sfrutta una differenza di pressione esistente tra la faccia superiore e l'inferiore d'un setto filtrante, si compie su sospensioni insediamentabili in tempi ragionevolmente brevi e serve soprattutto per migliorare la qualità dei corpi idrici in ordine all'uso da farne.

Per lo sviluppo della teoria relativa alla filtrazione si rimanda, come già per quella della sedimentazione, al corso d'impianti chimici industriali. L'operazione di filtrazione in relazione alla tecnologia delle acque si realizza generalmente con filtri a setto filtrante granulare, costituito da inerti silicei d'assortita granulometria (ciottoli, ghiaie e sabbie) o di altro tipo come i granulati antracitici.

I filtri per acque possono funzionare a gravità o, più spesso, sotto pressione.

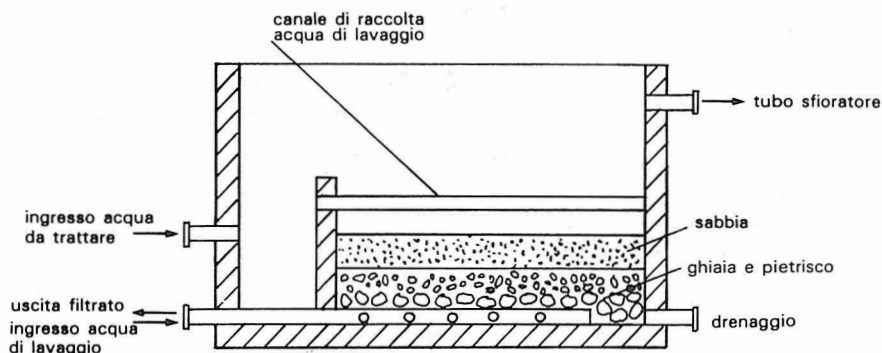


Fig. 3/5 - Struttura e specificazione dell'implicito funzionamento, tramite indicazioni didascaliche, d'un filtro a sabbia del semplice tipo «a gravità».

I filtri a gravità (Fig. 3/5) sono costituiti essenzialmente da vasche, di solito in cemento, funzionanti a cielo aperto e sul cui fondo è installato un sistema di drenaggio. Il mezzo filtrante (sabbie, ghiaie, coke, ecc.) è disposto a strati di granulometria crescente dall'alto al basso. L'influente entra di sopra del letto filtrante, lo permea e ne esce in fondo dal sistema di drenaggio. Dopo un certo periodo d'esercizio il filtro dev'essere «rigenerato», rimuovendone i solidi trattenuti. Si attua allo scopo un controlavaggio inviando acqua di lavaggio al di sotto dello strato filtrante attraverso il sistema di drenaggio e facendola uscire da apposite canalette di raccolta.

I filtri a gravità, cosiddetti a sabbia, comprendono in effetti sia uno strato di ghiaia di spessore minimo di 30 cm sia uno strato di sabbia che è almeno di 100 cm in quelli «lenti» e di 50 cm in quelli «rapidi». La portata specifica di filtrazione è circa $0,05 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ nei lenti e di $2 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ nei rapidi ed il tempo di durata d'ogni ciclo è dell'ordine di 1000 h e,