

Silvestro Natoli

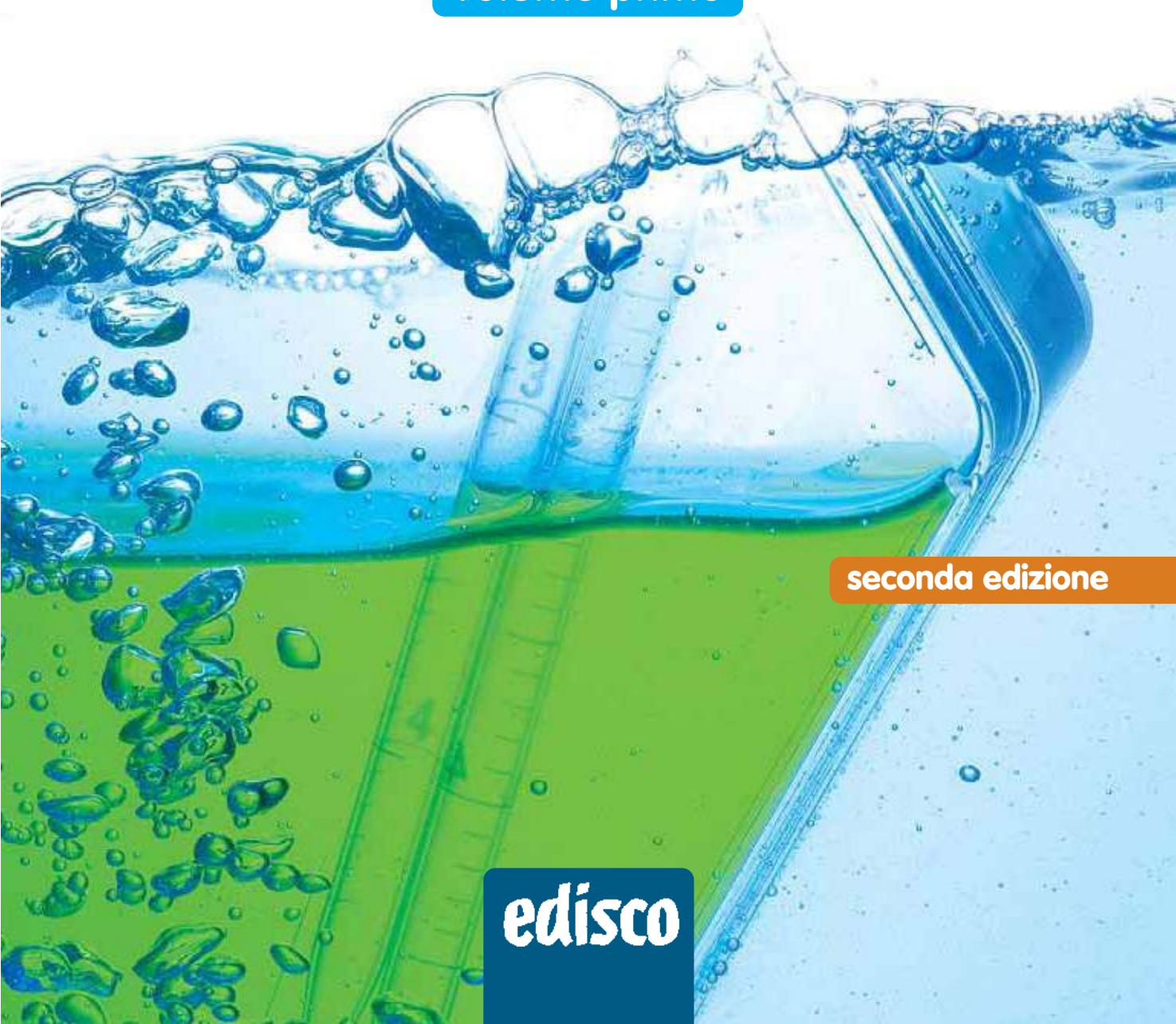
Mariano Calatozzolo

TECNOLOGIE CHIMICHE INDUSTRIALI

volume primo

seconda edizione

edisco



TECNOLOGIE
CHIMICHE
INDUSTRIALI

Volume primo

Silvestro Natoli

Mariano Calatozzolo

TECNOLOGIE CHIMICHE INDUSTRIALI

Volume primo

Seconda edizione

edisco

Tecnologie Chimiche Industriali

Volume primo, seconda edizione

Il progetto e la stesura dei contenuti sono stati condotti in stretta collaborazione dagli autori, tuttavia:

- il Prof. Mariano Calatozzolo ha curato i capitoli 4, 7 e 12;
- il Prof. Silvestro Natoli ha curato i restanti capitoli.

Realizzazione editoriale:

- Progetto grafico: Manuela Piacenti
- Impaginazione: C.G.M. - Napoli
- Computer to Plate: Imago - Marene

Contributi:

- Rilettura critica e revisione: Proff. Antonio Tagliavia e Paolo Tenca
- Correzione bozze: Lunella Luzi

In linea con le disposizioni di legge e le indicazioni ministeriali, si attesta che l'opera è realizzata in "forma MISTA", cartacea e digitale. L'Editore mette a disposizione gratuitamente sul proprio sito diverse risorse didattiche online: materiali extra per attività di approfondimento e di esercitazione in parte ad accesso libero e in parte riservati al docente.

L'Editore si impegna a mantenere invariato il contenuto della presente opera per almeno un quinquennio dall'anno di pubblicazione.

L'opera è altresì disponibile in edizione DIGITALE per gli studenti diversamente abili e i loro docenti.

L'Editore mette a disposizione degli studenti non vedenti, ipovedenti, disabili motori o con disturbi specifici di apprendimento i file pdf in cui sono memorizzate le pagine di questo libro. Il formato del file permette l'ingrandimento dei caratteri del testo e la lettura mediante software screen reader.

Tutti i diritti riservati

Copyright © 2012 Edisco Editrice, Torino

10128 Torino – Via Pastrengo, 28

Tel. 011.547880 – Fax 011.5175396

e-mail: info@edisco.it

sito web: www.edisco.it

I diritti di elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche), i diritti di noleggio, di prestito e di traduzione sono riservati per tutti i Paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

L'Editore è a disposizione degli aventi diritto con i quali non gli è stato possibile comunicare, nonché per eventuali involontarie omissioni e inesattezze nella citazione delle fonti dei brani, illustrazioni e fotografie riprodotti nel presente volume.

Stampato per conto della Casa editrice presso
La Grafica, Boves (Cn), Italia

Printed in Italy

Ristampe

5 4 3 2 1

2017 2016 2015 2014 2013 2012

Negli anni trascorsi dalla pubblicazione della prima edizione del nostro testo la scuola ha subito trasformazioni rilevanti. Da un lato l'introduzione delle tecnologie informatiche e della comunicazione ha profondamente modificato la nostra maniera di insegnare e ci ha costretto ad un lavoro di aggiornamento più impegnativo, ma anche più stimolante. D'altra parte, anche la struttura economica, il tessuto sociale ed industriale dell'Italia ha subito una trasformazione radicale nei 15 anni che sono trascorsi tra l'attivazione del corso di "Chimica nuovi programmi" e l'ultima riforma dell'Istruzione tecnica.

Ci è sembrato che proprio la riforma, che a partire dall'anno scolastico 2012/2013 riguarderà il triennio di indirizzo, piuttosto che guardare alle esigenze della società ed agli obiettivi del processo formativo, ha obbedito ad una logica di "razionalizzazione" delle risorse umane ed economiche. Sono state sacrificate 4 ore settimanali di materie di indirizzo, rendendo necessaria la soppressione di "Chimica-Fisica" per evitare un'eccessiva frammentazione delle discipline chimiche in relazione alle ore a disposizione.

Nella preparazione di questa nuova edizione ci è sembrato doveroso, piuttosto che ripiegare anche noi su obiettivi più circoscritti, cogliere l'opportunità che la riscrittura dei programmi ci offriva per un rinnovamento completo dell'opera che potesse cogliere anche le esperienze di questi 15 anni in cui, grazie anche alla collaborazione di tanti colleghi, abbiamo avuto modo di ragionare su come migliorare l'opera.

Iniziamo a descrivere la principali novità, partendo da quelle relative alla redistribuzione tra le tre discipline di indirizzo dei contenuti di "Chimica-Fisica" che non possono essere eliminati dal bagaglio di conoscenze del Perito Chimico.

Tra quelle direttamente correlate al nostro corso e che sono state incluse nel piano dell'opera, ricordiamo, non in ordine di importanza, lo studio degli equilibri tra fasi diverse, sia per quanto riguarda le leggi descrittive che la loro rappresentazione grafica. Contenuti, questi, direttamente collegati alla trattazione di tutte le operazioni unitarie, estesamente trattate nel nostro corso, basate sul raggiungimento di condizioni di equilibrio tra fasi diverse.

La termodinamica è un'altra parte della Chimica-Fisica di notevole importanza per i nostri obiettivi. Infatti, una abilità centrale per il nostro corso riguarda la corretta rappresentazione dei bilanci di materia e di energia. Sviluppare direttamente lo studio del 1° principio potrà rendere più efficaci le numerose esercitazioni applicative relative allo scambio termico, all'evaporazione ed alle successive operazioni unitarie studiate.

Ancora più importanti sono i contenuti relativi al 2° principio, alla termodinamica chimica ed alla cinetica chimica, ovvero i cardini teorici che consentono di definire le migliori condizioni operative di una reazione, sia per quanto riguarda le rese che le velocità di reazione. È possibile in questo modo affrontare più efficacemente lo studio della reattoristica chimica e dei processi relativi alle produzioni chimiche su scala industriale.

In generale trattare direttamente questi argomenti consente l'uso di un linguaggio omogeneo e funzionale ed un più diretto collegamento, anche temporale, tra gli aspetti teorici e le importanti applicazioni pratiche.

La nuova programmazione prevede anche un riordino dei contenuti tradizionali della nostra disciplina ed una maggiore attenzione verso le tematiche ambientali e la gestione e l'analisi del rischio chimico e chimico-biologico con le tecniche dell'"*Hazard Operability*".

Per quanto riguarda le esercitazioni numeriche, abbiamo ritenuto di adottare, per quanto possibile in maniera esclusiva, il Sistema Internazionale delle Unità di Misura. Di conseguenza un gran numero di esempi ed esercizi è stato riscritto.

Le indicazioni ministeriali, inoltre, mostrano una tendenza alla compressione dei contenuti nel secondo biennio, ovvero terzo e quarto anno, mentre il monte ore complessivo rimane invariato. Immaginiamo, di conseguenza, che sarà necessario operare delle scelte nelle preparazioni e nella realizzazione delle programmazioni. Abbiamo ritenuto di non dover operare noi queste scelte riducendo arbitrariamente il piano dell'opera, in modo che ciascun docente potesse scegliere le conoscenze da trasmettere, tra tutte quelle indicate nelle indicazioni ministeriali, in base agli obiettivi formativi fissati.

Un'ulteriore novità relativa alle nuove pubblicazioni scolastiche riguarda il trasferimento in rete di parte dei contenuti e delle esercitazioni. Abbiamo scelto di utilizzare le risorse della rete per quegli argomenti e tutte quelle esercitazioni che possono trarre vantaggio dall'uso degli strumenti informatici, sia per soddisfare particolari necessità di calcolo che per il reperimento di informazioni, ma soprattutto per quei contenuti ed informazioni caratterizzati da rapida evoluzione tecnologica, che possono essere più facilmente aggiornati in rete piuttosto che nell'edizione cartacea. D'altra parte, pur essendo convinti sostenitori dell'uso della tecnologia nell'attività didattica, riteniamo che la natura degli argomenti del nostro corso richieda una gradualità del ragionamento logico che porta alle conclusioni a cui il linguaggio, necessariamente sintetico e visuale del web, si addice molto poco.

Ringraziamo i colleghi Antonio Tagliavia e Paolo Tenca per i preziosi consigli e l'importante lavoro di revisione delle bozze e confidiamo nell'aiuto di colleghi e studenti per migliorare ulteriormente l'opera.

Gli autori



Il manuale è in **forma mista** perché propone su carta i «saperi minimi» sui quali è necessario confrontarsi, ma è completato da numerose risorse online disponibili sul sito della casa editrice www.edisco.it: materiali extra per attività di approfondimento, di esercitazione e di calcolo.

1. Operare con le grandezze fisiche: il Sistema Internazionale	1
1.1 IL SISTEMA INTERNAZIONALE	3
1.1.1 Le grandezze fondamentali	3
1.1.2 Le grandezze derivate	4
1.2 IL CALCOLO DIMENSIONALE E IL PRINCIPIO DI OMOGENEITÀ	6
1.2.1 Le dimensioni delle grandezze fisiche derivate	6
1.2.2 L'analisi dimensionale e il principio di omogeneità	8
1.3 LA CONVERSIONE TRA UNITÀ DI MISURA	10
GLOSSARIO	12
ESERCIZI	13
2. Materiali per le tecnologie chimiche	15
2.1 LE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI	17
2.1.1 Classificazione dei materiali	18
2.1.2 Prova di trazione	19
2.1.3 Altre caratteristiche meccaniche	24
2.2 GLI ACCIAI E LE GHISE	25
2.2.1 Classificazione e denominazione degli acciai	27
2.2.2 Le ghise	30
2.3 MATERIALI METALLICI NON FERROSI	31
2.3.1 Leghe di rame	31
2.3.2 Nichel, alluminio e altri metalli	32
2.4 MATERIALI POLIMERICI	33
2.4.1 La struttura dei materiali polimerici	34
2.4.2 Impieghi nelle tecnologie chimiche	36
2.5 ALTRI MATERIALI	37
2.6 UNO SGUARDO AL FUTURO: I NANOMATERIALI	40
2.7 I PROCESSI CORROSIVI E LA DEGRADAZIONE DEI MATERIALI	41
2.7.1 Le reazioni della corrosione elettrochimica diffusa	42
2.7.2 La scala dei potenziali elettrochimici	43
2.7.3 Le forme di corrosione localizzata	46
2.7.4 La tensiocorrosione	49
2.7.5 La biocorrosione	50
2.8 PREVENZIONE DELLA CORROSIONE	51
GLOSSARIO	55
ESERCIZI	56

3. Le basi chimico-fisiche delle operazioni unitarie: diagrammi di stato e materiali	59
3.1 GLI EQUILIBRI DI FASE E I DIAGRAMMI DI STATO	61
3.1.1 Vocabolario di base	61
3.1.2 Lettura di diagrammi di stato semplici	62
3.1.3 La regola della leva e la regola delle fasi	63
3.2 DIAGRAMMI DI STATO PER SOLUZIONI SOLIDE PARZIALMENTE MISCIBILI	65
3.3 IL DIAGRAMMA DI STATO FERRO-CARBONIO	67
GLOSSARIO	70
ESERCIZI	71
4. Stoccaggio e movimentazione dei solidi	75
4.1 PROPRIETÀ CARATTERISTICHE DEI SOLIDI	77
4.2 STOCCAGGIO DEI SOLIDI	81
4.2.1 Stoccaggio all'aperto	82
4.2.2 Stoccaggio in sili	82
4.2.3 Stoccaggio a magazzino	84
4.3 MOVIMENTAZIONE DEI SOLIDI	84
4.3.1 Trasportatori a gravità	85
4.3.2 Trasportatori portanti	86
4.3.2.1 Trasportatori a nastro	86
4.3.2.2 Trasportatori a piastre	89
4.3.2.3 Trasportatori a catena (portanti)	89
4.3.2.4 Elevatori a tazze	90
4.3.3 Trasportatori a spinta	91
4.3.3.1 Trasportatori a coclea	91
4.3.3.2 Trasportatori a flusso continuo	92
4.3.4 Trasportatori a scosse o a vibrazioni	93
4.3.5 Trasporto pneumatico	94
4.3.5.1 Apparecchiature per il trasporto pneumatico	96
4.3.5.2 Impianti di trasporto pneumatico in fase diluita	99
4.3.5.3 Impianti in fase densa	103
GLOSSARIO	106
ESERCIZI	107
5. Statica e dinamica dei liquidi	109
5.1 STATICA DEI LIQUIDI	111
5.1.1 La pressione idrostatica	112
5.1.2 Equazione della statica dei liquidi	116

5.2	I LIQUIDI IN MOVIMENTO	122
5.2.1	La portata e l'equazione di continuità	122
5.2.2	La viscosità	125
5.2.3	Moto laminare e turbolento	127
5.3	DINAMICA DEI LIQUIDI IDEALI	129
5.4	I LIQUIDI REALI E LE DISSIPAZIONI	132
5.4.1	La determinazione delle perdite di carico continue	134
5.4.2	Le perdite localizzate	139
5.5	MISURA DELLE PORTATE	141
	GLOSSARIO	146
	ESERCIZI	147
6.	Il trasporto dei liquidi	157
6.1	LA PREVALENZA	159
6.2	CLASSIFICAZIONE E CAMPI D'IMPIEGO DELLE POMPE	162
6.3	POMPE CENTRIFUGHE	164
6.3.1	Aspetti costruttivi	164
6.3.2	Cavitazione e NPSH	168
6.3.3	Curve caratteristiche	173
6.3.4	Installazione e regolazione delle pompe centrifughe	178
6.4	POMPE VOLUMETRICHE	180
6.4.1	Pompe volumetriche alternative	181
6.4.2	Pompe volumetriche rotative	184
6.5	POMPE PER APPLICAZIONI PARTICOLARI	187
	GLOSSARIO	190
	ESERCIZI	191
7.	Stoccaggio e linee di trasporto dei fluidi	199
7.1	STOCCAGGIO DEI FLUIDI	201
7.1.1	Sollecitazioni dei serbatoi	203
7.1.2	Spessore dei serbatoi	208
7.1.3	Serbatoi atmosferici	210
7.1.4	Serbatoi in pressione	212
7.1.5	Gasometri	215
7.1.6	Stoccaggi refrigerati	216
7.1.7	Dispositivi ausiliari e accessori dei serbatoi	219
7.2	TUBAZIONI, ELEMENTI DI LINEA, VALVOLE	223

7.2.1	Parametri e criteri di scelta delle tubazioni	223
7.2.2	Codici di colore per le tubazioni	230
7.2.3	Giunti, raccordi, guarnizioni, filtri di linea	231
7.2.4	Valvole	238
7.2.4.1	Struttura delle valvole	238
7.2.4.2	Valvole d'intercettazione	239
7.2.4.3	Valvole di sicurezza, ritegno, respirazione	241
7.2.4.4	Valvole di regolazione	243
7.2.4.5	Cavitazione e "flashing"	247
7.2.4.6	Attuatori delle valvole	249
7.2.4.7	Criteri di scelta delle valvole di regolazione	251
7.3	LA DIRETTIVA "PED"	266
	GLOSSARIO	270
	ESERCIZI	272
8.	Separazione solido-liquido	275
8.1	LA SEPARAZIONE SOLIDO-LIQUIDO	277
8.2	IL MOTO RELATIVO DEI SOLIDI IN UN LIQUIDO	279
8.2.1	La sedimentazione indipendente	279
8.2.2	La sedimentazione di massa	284
8.3	IMPIEGO DI FLOCCULANTI E POLIELETTROLITI	286
8.3.1	Le proprietà dei colloidi	286
8.3.2	Destabilizzazione e coagulazione dei colloidi	287
8.3.3	Flocculazione	289
8.4	I SEDIMENTATORI	291
8.5	LA FILTRAZIONE	297
8.5.1	Filtri a sabbia	299
8.5.2	Filtri con formazione di pannello	302
8.6	LA CENTRIFUGAZIONE	305
8.6.1	Centrifughe di sedimentazione	305
8.6.2	Centrifughe filtranti	309
	GLOSSARIO	311
	ESERCIZI	312
9.	Trattamenti delle acque grezze	313
9.1	FONTI DI APPROVVIGIONAMENTO DELLE ACQUE GREZZE	315
9.2	CARATTERISTICHE DELLE ACQUE GREZZE	319
9.2.1	Caratteristiche fisiche	320
9.2.2	Caratteristiche chimiche	321

9.2.3	La durezza	323
9.2.4	Microrganismi e altre specie viventi	327
9.3	REQUISITI PER L'IMPIEGO DELLE ACQUE	328
9.3.1	Le acque destinate al consumo umano	329
9.3.2	Le acque per l'industria	329
9.3.3	Le acque ad uso irriguo e per la balneazione	331
9.4	TRATTAMENTI DELLE ACQUE	332
9.4.1	Trattamenti di addolcimento	333
9.4.1.1	Il metodo calce-soda	333
9.4.1.2	Le resine a scambio ionico	338
9.4.2	Demineralizzazione	342
9.4.3	La disinfezione	344
9.4.3.1	Il cloro ed i suoi derivati	345
9.4.3.2	Disinfezione con ozono	349
9.4.4.3	Disinfezione con raggi U.V.	350
9.4.5	Eliminazione del ferro e del manganese	351
9.5	ADSORBIMENTO SU CARBONI ATTIVI	352
9.6	OSMOSI INVERSA	353
9.7	L'ELIMINAZIONE DEI GAS DISCIOLTI	358
9.8	CICLI DI TRATTAMENTO COMPLETI	359
9.8.1	Produzione acque per il consumo umano	359
9.8.2	Acque per caldaie	361
	GLOSSARIO	362
	ESERCIZI	363

10. Le basi chimico-fisiche delle operazioni unitarie: la teoria cinetica dei gas	371
10.1 LE LEGGI EMPIRICHE DEI GAS IDEALI	373
10.1.1 La Legge di Boyle	373
10.1.2 Le Leggi di Gay-Lussac	376
10.1.3 La Legge di Avogadro	378
10.1.4 L'equazione di stato dei gas ideali	379
10.1.5 Legge di Dalton sulle miscele di gas	382
10.2 IL COMPORTAMENTO DEI GAS IDEALI SECONDO LA TEORIA CINETICO-PARTICELLARE	385
10.2.1 Il modello cinetico-particellare	385
10.2.2 Teoria cinetica e pressione	386
10.2.3 Teoria cinetica e temperatura	389
10.2.4 La distribuzione delle velocità	390
10.3 IL COMPORTAMENTO DEI GAS REALI	391
10.3.1 Coefficiente di compressibilità	391

10.3.2	Correzioni al modello cinetico-particellare	393
10.3.3	Equazione di van der Waals	394
10.4	I DIAGRAMMI DI ANDREWS	396
	GLOSSARIO	400
	ESERCIZI	401
11.	Separazioni gas-solido e gas-liquido	407
11.1	PRINCIPI OPERATIVI E AMBITI APPLICATIVI	409
11.2	DEPOLVERATORI INERZIALI	411
11.3	SEPARATORI AD UMIDO	413
11.4	DEPOLVERATORI ELETTROSTATICI	416
11.5	DEPOLVERATORI A TESSUTO	417
	GLOSSARIO	420
12.	Misura e controllo nei processi chimici	421
12.1	GENERALITÀ SUL CONTROLLO AUTOMATICO	423
12.2	DEFINIZIONI PRINCIPALI	425
12.3	L'ANELLO DI REGOLAZIONE IN RETROAZIONE	426
12.4	I CONTROLLORI ED IL CONTROLLO ON-OFF	429
12.5	RAPPRESENTAZIONE DEGLI ANELLI DI REGOLAZIONE	433
12.6	GLI ELEMENTI DI MISURA	436
12.6.1	Caratteristiche statiche degli elementi di misura	436
12.6.2	Caratteristiche dinamiche degli elementi di misura	439
12.6.3	Sensori e segnali	440
12.6.4	Misura della temperatura	444
12.6.4.1	Termometri a gas	447
12.6.4.2	Termometri a liquido	448
12.6.4.3	Termometri bimetallici	449
12.6.4.4	Termoresistenze	451
12.6.4.5	Termocoppie	454
12.6.4.6	Termometri a radiazione	457
12.6.4.7	Termistori e integrati	461
12.6.4.8	Installazione dei termometri	462
12.6.5	Misura della pressione	463
12.6.5.1	Diaframmi di isolamento	463
12.6.5.2	A livello di liquido (idrostatici)	463
12.6.5.3	A movimento meccanico	464
12.6.5.4	A segnale elettrico	465
12.6.5.5	Misuratori di pressione differenziale	466

12.6.6	Misura della portata	467
12.6.6.1	A pressione differenziale	470
12.6.6.2	Ad area variabile (rotametri)	470
12.6.6.3	A vortice	471
12.6.6.4	Elettromagnetico	471
12.6.6.5	A ultrasuoni	472
12.6.6.6	Di Coriolis	473
12.6.6.7	A dispersione termica	474
12.6.6.8	A turbina	474
12.6.6.9	Volumetrici	475
12.6.7	Misura del livello	477
12.6.7.1	Misuratori di livello puntuali	479
12.6.7.2	Misuratori di livello continui	480
GLOSSARIO		494
ESERCIZI		497
APPENDICI		501
DIZIONARIO TECNICO		545
INDICE ANALITICO		551
BIBLIOGRAFIA		557
RIFERIMENTI		559

4

Stoccaggio e movimentazione dei solidi

ABILITÀ COGNITIVE

- Descrivere le caratteristiche tecniche principali delle apparecchiature per lo stoccaggio e il trasporto dei solidi.
- Applicare i criteri di scelta delle apparecchiature, anche in relazione alle norme di sicurezza.
- Conoscere la simbologia UNICHIM specifica.

ABILITÀ PRATICHE

- Individuare le apparecchiature specifiche in relazione alle caratteristiche del processo.
- Impostare schemi di processo specifici.

Non è infrequente dover trattare dei solidi: spesso materie prime, prodotti finiti, reagenti e additivi lo sono. Per le specifiche caratteristiche, le apparecchiature per la lavorazione dei solidi differiscono sostanzialmente da quelle utilizzate per i fluidi.

4.1 PROPRIETÀ CARATTERISTICHE DEI SOLIDI

Densità
dei materiali
solidi

Esaminiamo le principali proprietà dei solidi che interessano le problematiche inerenti al loro stoccaggio e movimentazione.

La **densità** può essere **reale**, data dal rapporto massa/volume, **relativa**, in rapporto a una sostanza di riferimento (p.e., acqua a 4°C), o **apparente**, data dal rapporto tra la massa e il volume occupato dal materiale, in relazione al suo grado di suddivisione. Dalla densità reale e da quella apparente si può risalire alla **porosità** (ϕ) del materiale, definita come il rapporto tra il volume dei pori (V_p) e il volume totale (V_T); tenendo conto che il volume dei pori è pari al volume totale meno il volume del solido (V_s), abbiamo:

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} = 1 - \frac{V_s}{V_T} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho} \quad (4.1)$$

Dove con ρ_{ap} si è indicata la densità apparente e con ρ quella reale. La porosità può essere **esterna** se riferita agli spazi tra i granuli di solido, o **interna**, se riguarda i pori del granulo (v. Fig. 4.1).



Fig. 4.1 ► Granuli e porosità esterna.

Esempio 4.1

Un materiale, con densità reale di $2,7 \text{ kg/dm}^3$, presenta una densità apparente di $1,8 \text{ kg/dm}^3$. Si vuole calcolare la porosità ϕ .

Applicando la (4.1) si ottiene:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho} = 1 - \frac{1,8 \text{ kg/dm}^3}{2,7 \text{ kg/dm}^3} = 0,33$$

La porosità può anche esprimersi in percentuale, in questo caso sarebbe del 33%.

Granulometria e setacci

La **granulometria** è la proprietà che informa sulle dimensioni dei granuli o particelle in cui è suddiviso un solido. Si determina tramite l'**analisi granulometrica** che si effettua, per le particelle superiori a $40 \mu\text{m}$, solitamente con appositi setacci; per le dimensioni inferiori si ricorre ad altri metodi (velocità di sedimentazione, diffrazione della luce, ecc.).

I **setacci** sono dei recipienti con il fondo costituito da reti a maglie quadrate. Le dimensioni delle maglie (diametro dei fili, luce tra le maglie, interasse) sono strettamente normati da vari enti nazionali e sovranazionali. Il parametro più importante per classificarli è il *numero di maglie* presenti in una determinata lunghezza. Molto diffusa la serie americana Tyler, che classifica le reti in base al numero di maglie per pollice lineare (*mesh*), in cui il rapporto tra la luce di un setaccio e quella del setaccio immediatamente più fine è pari a $\sqrt[4]{2} \approx 1,189$ (v. Fig. 4.2).

Fig. 4.2 ▶ a) Setacci con maglie di diversa luce; b) struttura della tela: d, diametro del filo; l, interasse; L, luce.



A seconda del tipo di materiale e delle norme da seguire si sceglie la serie di setacci. Quello a maglie più larghe è scelto con una misura che lasci passare appena tutto il campione, quello a maglie più strette, in modo che lasci passare non più di una quantità prefissata di fini, usualmente il 3%. La serie di setacci prescelta è impilata, con in alto quello a maglie più larghe, in un apparecchio scuotitore (v. Fig. 4.3).

Fig. 4.3 ▶ Apparecchio per analisi granulometrica con pila di setacci.



Si carica nel primo setaccio una massa nota del campione, si chiude con un coperchio e si avviano gli scuotimenti. Dopo il tempo prescritto, si pesa la frazione di campione trattenuta in ogni setaccio, si raccolgono i dati in forma tabellare e si costruiscono i grafici della distribuzione differenziale e di quella integrale (v. Tab. 4.1 e Fig. 4.4). Le dimensioni medie della particelle sono date dalla media aritmetica della luce delle maglie dei due setacci successivi, quello attraverso cui passa e quello su cui è trattenuta la frazione di particelle.

SETACCI UNI (LUCE, mm)	TRATTENUTO PARZIALE (g)	TRATTENUTO PARZIALE (%)	DIMENSIONE MEDIA (mm)	TRATTENUTO CUMULATIVO (g)	TRATTENUTO CUMULATIVO (%)
6	0	0,00%		0	0,00%
4	20,37	0,94%	5	20,37	0,94%
2	40,35	1,86%	3	60,72	2,81%
1	89,80	4,15%	1,5	150,52	6,96%
0,5	215,34	9,95%	0,75	365,86	16,91%
0,25	509,61	23,55%	0,38	875,47	40,45%
0,125	1022,55	47,25%	0,19	1898,02	87,70%
0,063	204,09	9,43%	0,094	2102,11	97,13%
Fondo	62,04	2,87%		2164,15	100,00%

Tab. 4.1 ► Analisi granulometrica di un campione di materiale di 2164,15 g.

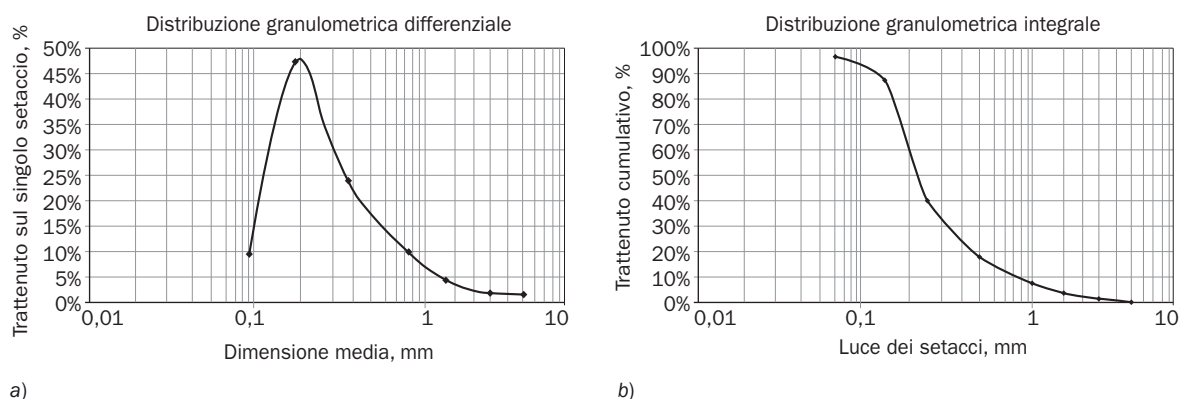


Fig. 4.4 ► Curve di distribuzione dell'analisi gravimetrica: a) differenziale; b) integrale.

Durezza e resilienza

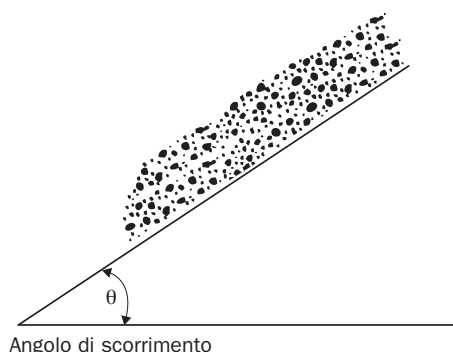
I materiali a maggior **durezza** sono generalmente più abrasivi e richiedono che le apparecchiature per la loro lavorazione siano costruite con materiali di adeguata resistenza all'usura. I materiali **resilienti** possono essere gommosi e/o fibrosi e non adatti a tutti i trasportatori.

**Attrito
e scorrevolezza**

Attrito e scorrevolezza influenzano le possibilità di stoccaggio e movimentazione dei solidi. In particolare: l'**angolo di riposo o di declivio naturale** è il massimo angolo rispetto all'orizzontale che può formare un materiale stoccato in cumulo senza franare (v. Fig. 4.5 a e Tab. 4.2), dipende da coefficiente di attrito statico μ_s , per materiali relativamente fini impilati casualmente, per l'angolo di riposo θ vale la relazione $\text{tg}(\theta) = \mu_s$; l'**angolo di scorrimento statico** è il minimo angolo rispetto all'orizzontale che forma un piano inclinato quando il materiale posto sopra inizia a scivolare (v. Fig. 4.5 b); l'**angolo di scorrimento dinamico**, minore di quello statico, si riferisce al minimo angolo con cui il materiale continua a scorrere: dipendono dai coefficienti d'attrito, rispettivamente statico e dinamico, tra il solido granulare e il materiale di cui è fatto il piano inclinato. L'**adesività** delle particelle, tra di loro e con altri materiali, permette di suddividere i materiali in prodotti **scorrevoli o agglomerabili**. Se l'angolo di riposo è inferiore a 30° il materiale è molto scorrevole, scorrevole tra 30 e 45° e poco scorrevole oltre 45° .



a)



b)

Fig. 4.5 ▶ a) L'angolo di riposo o di declivio naturale è il massimo angolo rispetto all'orizzontale che può formare un materiale stoccato in cumulo senza franare; b) l'angolo di scorrimento statico è il minimo angolo rispetto all'orizzontale che forma un piano inclinato quando il materiale posto sopra inizia a scivolare.

MATERIALE	ANGOLO DI RIPOSO	MATERIALE	ANGOLO DI RIPOSO
Ceneri	40°	Granito	$35 \div 40$
Calcare fine	45°	Ghiaia asciutta	$30 \div 45$
Argilla bagnata	15°	Sabbia asciutta	34
Terra	$30^\circ \div 45^\circ$	Sabbia bagnata	45
Farina di grano	45	Grano	28

Tab. 4.2 ▶ Angoli di riposo di alcuni materiali.

**Reattività
e sicurezza**

I solidi possono presentare una vasta gamma di **reattività**. Possono essere sostanzialmente inerti, come più o meno corrosivi, ossidanti, igroscopici, infiamma-

Problematiche delle polveri

bili, esplosivi, ecc. Le problematiche legate alla reattività sono acute nel caso di polveri che possono anche formarsi per frantumazione di granuli più grossi durante la movimentazione. Le polveri presentano un elevatissima superficie di contatto con l'atmosfera in cui sono immerse. Nel caso di materiali infiammabili, come zucchero, farine o altre sostanze organiche, si possono formare miscele aria-polveri altamente infiammabili e anche esplosive, facilmente innescate, per la natura non conduttiva di tali materiali, anche da scintille dovute a cariche elettrostatiche. Le polveri, facilmente disperdibili nell'ambiente, in assenza di opportuni dispositivi di confinamento, possono creare problemi di nocività e/o tossicità per l'uomo e l'ambiente. Nota la carcinogenicità delle polveri fini di amianto che ha portato all'abbandono di questo materiale per la stragrande maggioranza degli impieghi. Con materiali fermentabili, come farine e granaglie, si può sviluppare CO₂, gas più pesante dell'aria che stratifica in basso, e, in assenza di un'adeguata ventilazione, rende l'ambiente anossico e quindi a rischio di asfissia per il personale. Inoltre le fermentazioni sviluppano calore e, a seconda delle condizioni, possono sviluppare gas e/o vapori infiammabili.

4.2 STOCCAGGIO DEI SOLIDI

I principali *fattori di scelta* che permettono di individuare la tipologia di *stoccaggio* più idoneo per un dato materiale solido si possono riassumere come segue.

- **Granulometria:** a seconda della pezzatura che può essere grossolana (decine di centimetri e oltre); media (da pochi centimetri a diversi millimetri); fine e molto fine (polveri, da qualche millimetro in giù).
- **Scorrevolezza:** elevata, angolo di riposo < 30°; media, 30 ÷ 45°; scarsa, angolo di riposo > 45°.
- **Degradabilità:** se il materiale resiste alle intemperie si può stoccare all'aperto, se no è necessario ricorrere ad ambienti riparati; in alcuni casi, p.e. con materiale igroscopico o deliquescente, è necessario ricorrere a temperatura e atmosfera controllate.
- **Quantità da stoccare:** piccole o grandi quantità possono portare a soluzioni altrettanto diverse.
- **Reattività chimica:** condiziona la scelta del materiale di costruzione del silo.
- **Sicurezza:** in relazione soprattutto a possibili problemi di nocività e/o tossicità per l'uomo e l'ambiente, di rischio d'incendio e/o di esplosione, a seconda del materiale, della sua granulometria e alla possibile formazione di polveri.
- **Economicità e comodità di manipolazione:** come prassi comune delle attività industriali, tenuto conto di tutti i fattori, si sceglie la soluzione economicamente ottimale.

4.2.1 Stoccaggio all'aperto

Adatto a materiali sostanzialmente inerti che non si danneggiano esponendoli alle intemperie e che non danno problemi di nocività e inquinamento. È il più economico. Può essere in *cumuli*, con eventuale preparazione del terreno, tenendo conto dell'angolo di riposo del materiale, o in *trincee*, per materiali scorrevoli (v. Fig. 4.6).

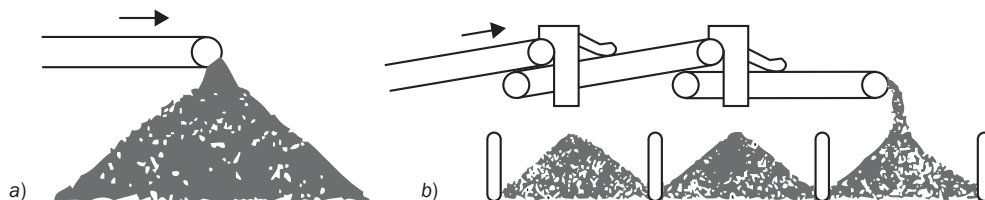


Fig. 4.6 ▶ Stoccaggio all'aperto: a) in cumulo; b) in trincee.

4.2.2 Stoccaggio in sili

I *sili* sono strutture cilindriche verticali con il fondo di opportuna conicità. Sono costruiti sia in materiali metallici, come acciaio, alluminio, ecc., sia in materiale non metallico, come cemento, vetroresina, ecc. (v. Fig. 4.7).



Fig. 4.7 ▶ Batteria di sili.

Sono adatti per materiali granulari e scorrevoli. Offrono buona protezione e sono facilmente integrabili in sistemi automatizzati di movimentazione.

I sili terminano con una tramoggia di opportuna conicità in relazione al coefficiente d'attrito dinamico del materiale con le pareti della tramoggia. Se la tramoggia ha sufficiente pendenza il materiale scende in modo abbastanza uniforme (*flusso in massa*), se la pendenza è insufficiente il materiale scende con difficoltà formando come un imbuto (*flusso a imbuto*). In quest'ultimo caso la portata è pulsante e può anche bloccarsi e la misura del livello del materiale nel silo è falsata. Poiché pendenze accentuate della tramoggia riducono lo spazio utile, per grandi diametri si fa terminare il silo con più tramogge; si possono an-

che utilizzare vibratori per diminuire la pendenza. La relazione tra il coefficiente d'attrito e la pendenza della tramoggia per avere il flusso in massa è data dal **grafico di Jenike** (v. Fig. 4.8).

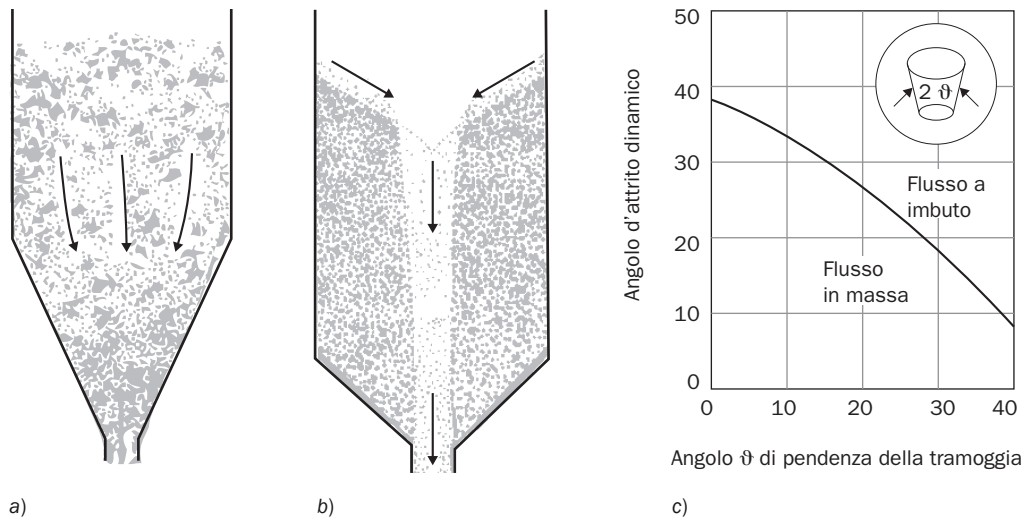


Fig. 4.8 ▶ Scarico di un materiale granulare dai sili in relazione alla pendenza della tramoggia: a) flusso in massa; b) flusso a imbuto; c) grafico di Jenike.

La sicurezza nello stoccaggio delle polveri

Nello **stoccaggio in sili** il rischio maggiore è dato dalla formazione di miscele esplosive ed infiammabili da polveri, generalmente da materiali a matrice organica. Gli incidenti possono essere anche gravi, come nel 1997 a Blaye, in Francia con 11 vittime (v. Fig. 4.9).

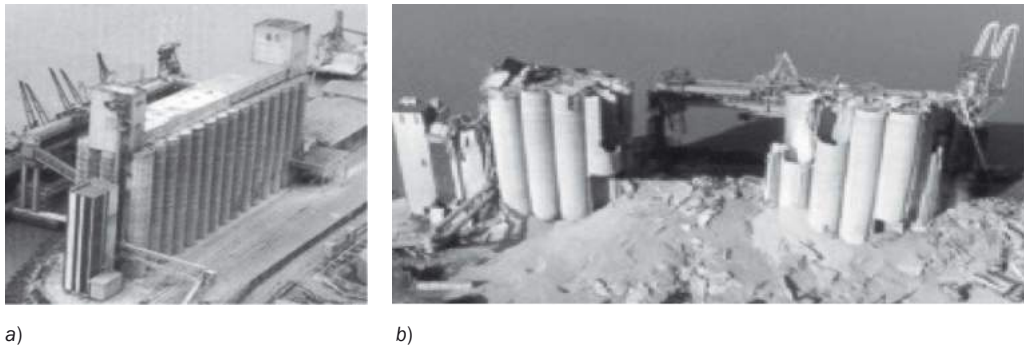


Fig. 4.9 ▶ Esplosione da polveri in uno stoccaggio di granaglie (Blaye, Francia, 1997, 11 morti): a) i sili prima dell'esplosione; b) dopo l'esplosione.

I principali accorgimenti per prevenire tali incidenti si possono così riassumere:

- sensori di temperatura in diversi punti in modo da monitorare tutto il silo;
- un efficiente sistema di ventilazione;
- un efficiente sistema di evacuazione delle polveri;
- isolare i sili l'uno dall'altro per evitare il propagarsi dell'incendio/esplosione;

- messa a terra accurata per evitare l'accumulo di elettricità elettrostatica;
- rivelatori di scintille collegati a un sistema automatico di isolamento dell'apparecchiatura.

Altri problemi di sicurezza sono legati alla formazione di gas nocivi e/o pericolosi.

4.2.3 Stoccaggio a magazzino

Quantità non elevate di materiali solidi sono spesso stoccate in *magazzini*. I contenitori possono essere sacchi (di carta, di tela, di plastica, compositi). Per la movimentazione nei magazzini sono molto usati i bancali (*pallets*), spesso con sistemi ad elevata automazione che permettono il prelievo e lo stoccaggio dei bancali con controllo a distanza. I magazzini, oltre le apparecchiature per il normale funzionamento, devono essere dotati dispositivi di sicurezza (ventilazione, aperture da tutti i lati, sistemi antincendio, ecc.).

4.3 MOVIMENTAZIONE DEI SOLIDI

La *movimentazione* dei solidi riguarda il trasporto all'interno dei siti produttivi per:

- lo scarico dei prodotti in arrivo;
- il carico per le spedizioni;
- la movimentazione nei cicli produttivi;
- la movimentazione nei magazzini.

Classificazione
dei trasportatori
dei solidi

Le apparecchiature per la movimentazione dei solidi possono essere di svariate tipologie. In base alla modalità d'azione le *principali tipologie* si possono classificare in:

- *trasportatori a gravità*: operano solo in discesa sfruttando la forza di gravità;
- *trasportatori portanti*: gli elementi mobili portano il materiale (trasportatori a nastro, a piastre, a catene, elevatori a tazze);
- *trasportatori a spinta*: gli elementi mobili spingono il materiale (trasportatori a coclea, a flusso continuo);
- *trasportatori a scosse o a vibrazioni*: elementi vibranti fanno avanzare il materiale;
- *trasporto pneumatico*: un gas, di solito aria, trasporta il materiale.

I diversi *trasportatori* rispondono alle svariate necessità di movimentazione. I principali parametri sono:

- portata: importante, specie per il dimensionamento, da kg/h a migliaia di t/h;
- distanza: da metri a chilometri;
- dislivello: in orizzontale, in pendenza, in verticale;
- caratteristiche materiale: granulometria, scorrevolezza, densità, abrasività, temperatura, ecc.;
- richieste del processo: continuo, discontinuo, regolazione della portata più o meno fine, portata sostanzialmente costante o alquanto variabile, ecc.

Una prima classificazione in base al dislivello del percorso è riportata in Tab. 4.3.

DISLIVELLO DEL PERCORSO	TRASPORTATORE
Trasporto in orizzontale	A nastro, a piastre, a catene, a flusso continuo, a coclea, a vibrazione, pneumatico
Trasporto in salita o in discesa	A flusso continuo, a coclea, pneumatico, a gravità (in discesa); per pendenze limitate: a nastro, a piastre
Sollevamento	A tazze, a flusso continuo, a vibrazione, pneumatico
Trasporto in orizzontale e in verticale	A flusso continuo, a coclea, pneumatico, a tazze inclinato, a gravità (in discesa)

Tab. 4.3 ► Tipologie di trasportatori e dislivello del percorso.

A seconda delle esigenze, spesso si ricorre nello stesso processo a diverse tipologie di trasportatori (v. Fig. 4.10).



Fig. 4.10 ► Trasportatori a nastro con trasporto pneumatico dei materiali fini.

4.3.1 Trasportatori a gravità

Funzionano solo in discesa e sono, ovviamente, i più economici. Sono adatti ad una vasta tipologia di solidi, purché di pezzatura non elevata. La tipologia più comune è a canale aperto o, spesso, chiuso per evitare la dispersione di polveri nell'ambiente o pericolose perdite di materiale nei punti di maggior pendenza. I canali possono essere in metallo, di plastica, flessibili, in relazione alle sollecitazioni che debbono sopportare. È da considerare l'angolo di scorrimento del materiale: quello statico, se è previsto un punto di partenza in cui il materiale è fermo; quello dinamico, quando il materiale è sicuramente in movimento. I trasportatori a rulli, che possono funzionare per brevi tratti anche in orizzontale, se il materiale arriva con sufficiente

energia cinetica o se spinto, sono adatti a materiali già impaccati, p.e., per la movimentazione in magazzino (v. Fig. 4.11).

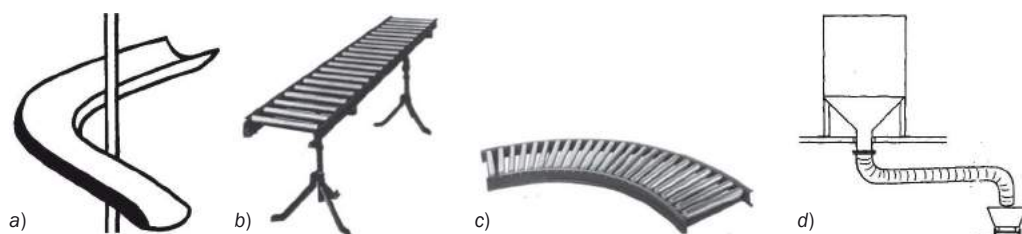


Fig. 4.11 ▶ Trasportatori a gravità: a) a canale aperto e curvo; b) dritto a rulli; c) curvo a rulli; d) a canale chiuso per lo scarico da un silo a un mezzo di trasporto.

4.3.2 Trasportatori portanti

Sono i trasportatori in cui i materiali sono caricati su nastri, catene di supporti e contenitori che costituiscono una sorta di anello in continuo movimento.

4.3.2.1 Trasportatori a nastro

Sono tra i più diffusi. L'anello è costituito da un **nastro** di materiale elastomerico, opportunamente rinforzato, che gira in un telaio sorretto da apposite pulegge e mosso da pulegge motrici, un dispositivo per mantenere in tensione il nastro completa gli elementi di base di questo trasportatore (v. Fig. 4.12).



Fig. 4.12 ▶ Trasportatori a nastro depositano il materiale in cumuli di stoccaggio all'aperto.

Caratteristiche operative

Possono coprire lunghe distanze, fino ad alcuni chilometri con un singolo nastro. Combinando più nastri si possono creare reti di movimentazione che coprono distanze considerevoli. Il record mondiale, 100 km, appartiene ai trasportatori che collegano al mare le miniere di fosfati nel Sahara occidentale.

Lavorano prevalentemente in rettilineo; per cambiare direzione, come per percorsi lunghi e articolati, si ricorre alla sovrapposizione di più nastri. Le curve sul piano orizzontale sono accettabili solo con un raggio di curvatura molto elevato, in quanto richiedono la deformazione e/o l'inclinazione del nastro; non ci sono problemi per le curve sul piano verticale, anche se l'inclinazione è limitata dall'angolo di scorrimento del materiale, comunque migliorabile con nastri appositamente scolpiti (v. Fig. 4.13 c), in ogni caso è generalmente contenuta entro i 30°.

Le portate vanno da pochi kg/h fino a 5000 t/h, con nastri che possono raggiungere 1,6 m di larghezza e velocità che vanno da pochi cm/s fino a 5 m/s. La potenza richiesta dipende da quella assorbita dal nastro vuoto, dalla portata, dall'eventuale dislivello e dalla potenza assorbita dai dispositivi di carico e scarico, se presenti.

I materiali trasportati possono avere caratteristiche molto ampie. Materiali di grossa pezzatura richiedono nastri più larghi, materiali umidi e appiccicosi rendono difficoltoso lo scarico e possono richiedere la presenza di coltelli di pulizia, materiali taglienti e abrasivi richiedono nastri opportunamente robusti.

Particolari costruttivi

I materiali e la struttura del nastro sono scelti in base all'aggressività più o meno pronunciata del materiale da trasportare, alla sua temperatura e alle condizioni operative. L'usuale intervallo operativo di temperatura va dai - 20 ai + 50°C. I nastri sono costituiti da una matrice *elastomerica* (gomma naturale, neoprene, gomma butile, gomma nitrile, ecc.) o, in alcuni casi, *plastomerica* (PVC, PTFE), rinforzata con *fibre* (naturali, sintetiche, metalliche), a seconda della robustezza richiesta (v. Fig. 4.13 e Tab. 4.4).

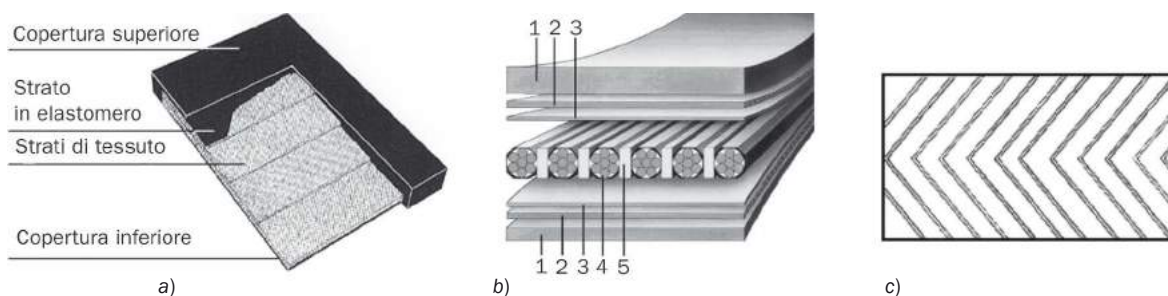


Fig. 4.13 ▶ Struttura di nastri per trasportatori. a) Rinforzato con tessuto. b) Ad alta resistenza: 1) strati di copertura; 2) traverse elastomeriche di rinforzo; 3) strati interni in elastomero; 4) cavi d'acciaio; 5) strisce in elastomero. c) Scolpito per superare pendenze.

PROPRIETÀ (1: ECCELLENTE; 6: INADEGUATO)	NR	SBR	BR	NBR	CR	IIR	EPDM	PVC
Carico a rottura	1	2	4	2	2	3	3	5
Allungamento a rottura	1	2	3	2	2	2	3	5
Resistenza all'abrasione	4	2	1	2	3	4	3	4
Resistenza agli strappi	2	3	5	3	3	3	3	5
Flessibilità a freddo	2	3	2	3	4	2	2	6
Resistenza al calore	4	4	3	3	2	1	1	5
Resistenza all'ozono e alle intemperie	4	4	3	4	2	3	1	2
Resistenza agli oli	6	5	6	1	2	6	6	2
Resistenza ad acidi e basi	3	3	3	4	2	2	1	2
Resistenza alla fiamma	6	6	6	6	2	6	6	2

NR: gomma naturale (cis-poliisoprene); SBR: gomma stirene-butadiene; BR: polibutadiene; NBR: gomma nitrile (copolimero acrilonitrile-butadiene); CR: neoprene (poli-2-clorobutadiene); IIR: gomma butile (copolimero isobutene-butadiene o isoprene); EPDM: terpolimero etilene-propilene-dieni; PVC; polivinilcloruro (plastomero).

Tab. 4.4 ▶ Proprietà applicative di alcuni materiali utilizzati nei nastri dei trasportatori.

Il nastro può essere disposto in diversi modi. Se il materiale ha un angolo di riposo troppo basso, con una disposizione concava si migliora la capacità di carico, con un percorso canalizzato si evitano cadute di materiale, con un canale chiuso si ripara il materiale e/o si evitano dispersioni di polveri nell'ambiente (v. Fig. 4.14).

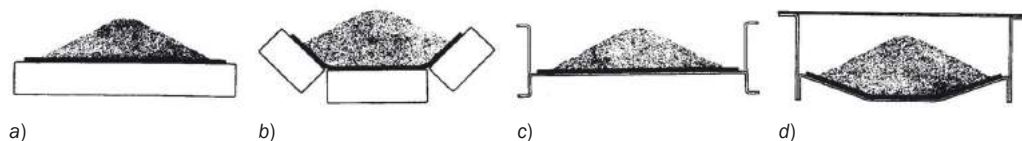


Fig. 4.14 ▶ Tipici profili dei nastri trasportatori: a) piatto; b) concavo, per materiale a basso angolo di riposo; c) a canale aperto, per evitare perdite di materiale; d) a canale chiuso per evitare contaminazione del materiale e/o inquinamento dell'ambiente.

Trasportatori a nastro tubolare

Per una migliore protezione del materiale trasportato e/o dell'ambiente si può ricorrere a **trasportatori a nastro tubolare**, in cui il nastro è arrotolato fino a sovrapporsi e costituire un tubo, in grado di seguire un percorso curvilineo anche sul piano orizzontale. Nei punti previsti appositi dispositivi allargano la sovrapposizione fino ad aprire il tubo e consentire così il carico e lo scarico del materiale (v. Fig. 4.15)

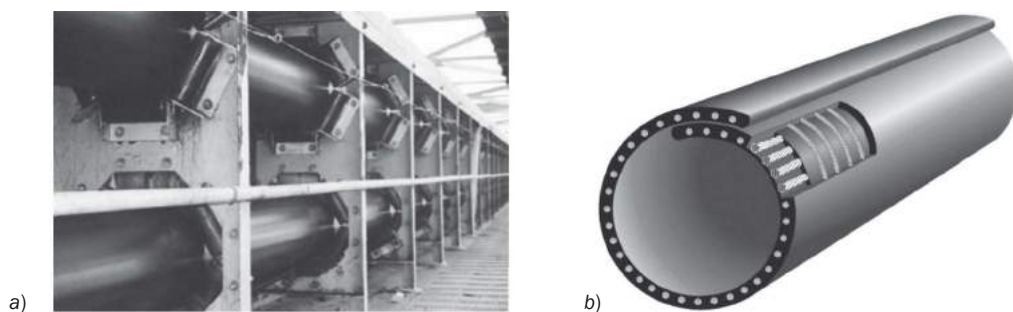


Fig. 4.15 ▶ a) Trasportatore a nastro tubolare, in evidenza il tratto di andata e di ritorno; b) struttura di un nastro tubolare rinforzato con cavi d'acciaio.

Dispositivi di carico e scarico

Lo scarico del materiale può avvenire senza particolari dispositivi all'estremità del trasportatore (v. Fig. 4.12). Per il carico e per lo scarico lungo il percorso sono previsti opportuni **dispositivi di carico e scarico** (v. Fig. 4.16) che possono essere interfacciati a sistemi di controllo automatico per la regolazione del processo.

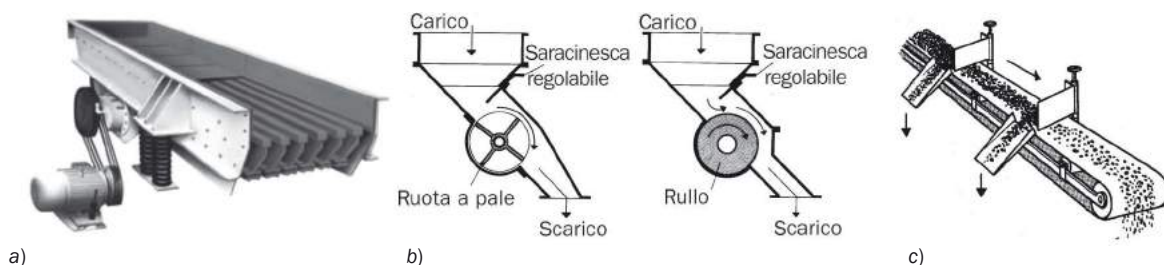


Fig. 4.16 ▶ Esempi di dispositivi: a) di carico a vibrazioni; b) di carico con dosatore a ruota o a rullo; c) di scarico laterale per trasportatori a nastro.

4.3.2.2 *Trasportatori a piastre*

Per materiali particolarmente usuranti o a temperatura elevata, come, p.e., trucioli metallici o materiale in uscita da un forno (coke, calce, ecc.), condizioni in cui gli usuali nastri non resisterebbero, si può ricorrere al trasportatore a piastre (v. Fig. 4.17), in cui il nastro è sostituito da *piastre metalliche* che formano come una tapparella. Le piastre possono avere dei risalti o formare come delle vaschette per superare pendenze più elevate di quelle dei trasportatori a nastro. Non sono usualmente utilizzati per coprire lunghe distanze ma per la movimentazione tra reparti di lavorazione relativamente vicini.

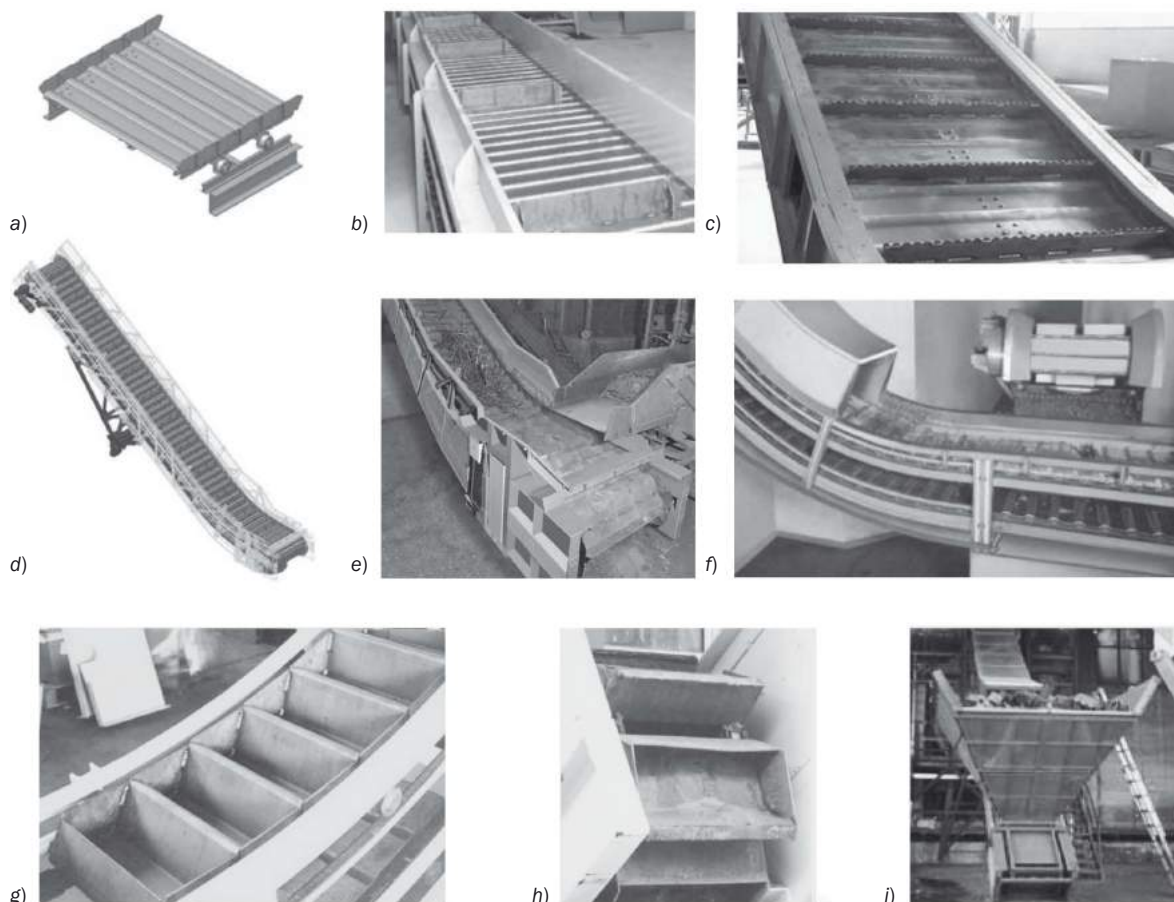


Fig. 4.17 ▶ Varietà dei trasportatori a piastre. Elementi di base: a) a piastre sovrapposte; b) e c) esempi di riporti per trattenere il materiale nei tratti in pendenza; d) insieme di un trasportatore a piastre; e) tramoggia di carico; f) incrocio tra due trasportatori. Particolari di piastre a vaschette: g) struttura; h) punto di scarico; i) tramoggia di carico.

4.3.2.3 *Trasportatori a catena (portanti)*

Sono trasportatori in cui l'anello portante è costituito da *catene* dalle maglie opportunamente sagomate o collegate a listelli d'appoggio. Le maglie snodate permettono di seguire agevolmente percorsi curvilinei. Le catene possono essere sia metalliche, sia in materiale plastico, sia in compositi. Adatti prevalentemente al trasporto di materiali già impaccati, trovano spesso impiego nella movimentazione

nei magazzini e negli impianti di confezionamento, spesso integrati con sistemi sofisticati di automazione (v. Fig. 4.18).



Fig. 4.18 ▶ Trasportatori a catena portante: a) con piano a listelli; b) con il piano costituito dalle maglie della catena; c) applicazione in un impianto di confezionamento.

4.3.2.4 Elevatori a tazze

È il più semplice ed affidabile mezzo per il trasporto in verticale come, p.e., tra piani diversi di un sito produttivo. In ogni caso può lavorare anche con una certa inclinazione, combinando al percorso in verticale anche un tratto in orizzontale. Sono costituiti essenzialmente da due pulegge che fanno girare una o più catene a cui sono collegate delle **tazze**; una carcassa, munita di aperture per il carico e lo scarico racchiude l'apparecchiatura. Le varie tipologie di tazze li rendono idonei al trasporto dei materiali più svariati, anche umidi o bagnati. Lo scarico può avvenire per semplice ribaltamento della tazza o anche per forza centrifuga, in relazione alla velocità di rotazione delle pulegge. Le tazze possono essere **distanziate** o **ravvicinate**, in modo da costituire quasi un continuo. Con il primo tipo, adatto a materiale di piccola pezzatura, parte del carico alimentato cade nella tazza e parte sul fondo della carcassa, dove è raccolto dalle tazze in salita. Con il secondo tipo, adatto al materiale di grossa pezzatura, il carico è posto solo nelle tazze; inoltre, le tazze ravvicinate non permettono elevate velocità e lo scarico avviene prevalentemente per gravità. Le portate possono superare le 100 t/h e le velocità i 5 m/s; l'altezza di sollevamento può arrivare a 25 m. La potenza richiesta dipende principalmente dalla portata e dall'altezza di sollevamento (v. Fig. 4.19)

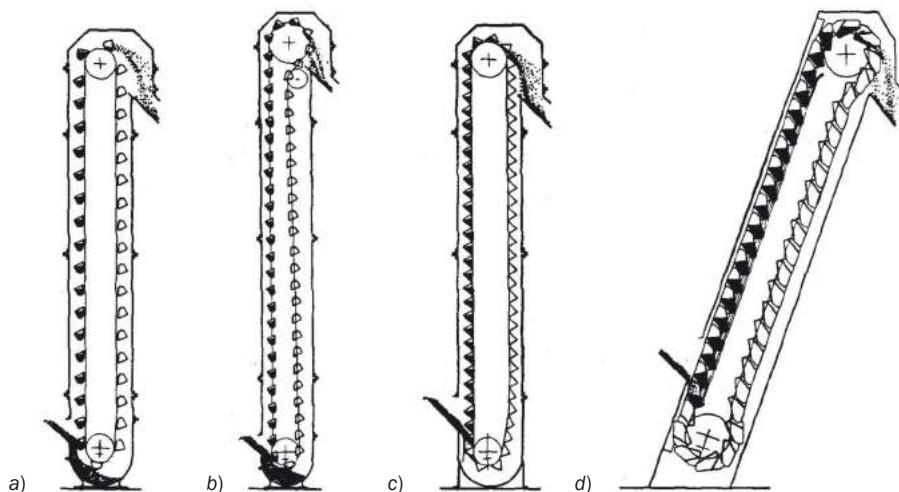


Fig. 4.19 ▶ Elevatori a tazze: a) a tazze spaziate e scarico centrifugo; b) a tazze spaziate e a scarico a gravità; c) a tazze ravvicinate; d) inclinato, a tazze ravvicinate, per elevate portate.

4.3.3 Trasportatori a spinta

Sono trasportatori in cui gli organi in movimento spingono in avanti il materiale.

4.3.3.1 Trasportatori a coclea

Sono molto versatili e molto diffusi. Sono costituiti da un cassone tubolare entro cui gira un *elicoide* (v. Fig. 4.20) che spinge in avanti il materiale. Sono adatti a materiale di piccola pezzatura ma che può essere anche pastoso. Possono operare in salita o in discesa, ma con percorsi rettilinei per le singole unità. Non coprono lunghe distanze per evitare eccessivi carichi torsionali dell'albero, generalmente operano in un raggio di decine di metri.

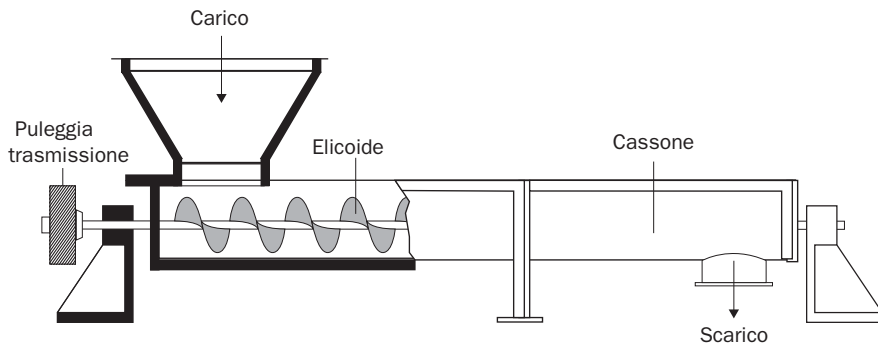


Fig. 4.20 ▶ Trasportatore a coclea (notare la struttura dell'elicoide).

Oltre alla movimentazione possono assolvere ad altre operazioni di processo come la miscelazione tra solidi o con un solvente (*lisciviazione*). L'adozione di elicoidi di cavi e camice per la circolazione di fluidi di scambio termico rendono possibile riscaldamento, raffreddamento, essiccamento, ecc.

Gli elicoidi sono di diversi tipi per adattarsi ai vari materiali e alle diverse funzioni. Il loro diametro, che può superare i 50 cm, dipende anche dalla granulometria: per evitare inceppamenti con le pezzature più grossolane si utilizzano i diametri più elevati (v. Fig. 4.21).

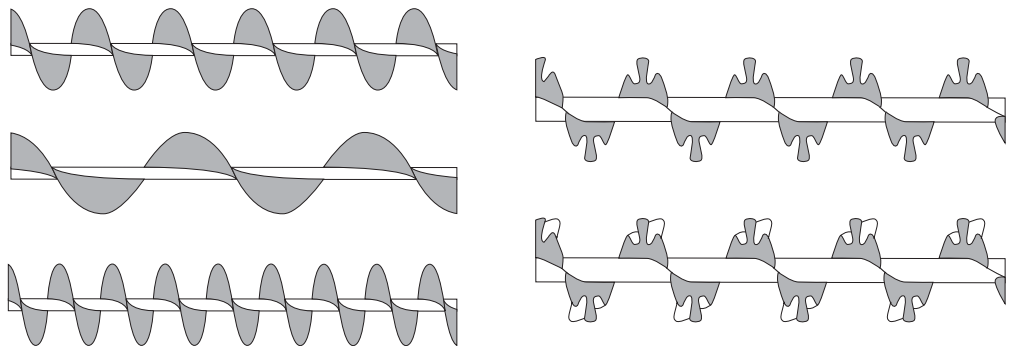


Fig. 4.21 ▶ Alcune tipologie di elicoidi per coclee.

La portata è facilmente regolabile con il numero di giri e può andare da pochi kg/h a diverse centinaia di t/h. Operano in canali chiusi prevenendo così la contaminazione del materiale e/o l'inquinamento dell'ambiente.

La potenza richiesta dipende sia da quella assorbita a coclea vuota (lunghezza, velocità di rotazione, attrito dei cuscinetti), sia da quella richiesta dal carico (portata, grado di riempimento, distanza).

4.3.3.2 *Trasportatori a flusso continuo*

Sotto questo nome si raggruppano diversi trasportatori: a catene con rastrelli o con pale, a draghe mobili, ecc. Sono simili ai trasportatori portanti: l'organo in movimento è costituito da una catena o da un cavo, chiuso ad anello, che gira dentro un cassone o tubo. Alla catena o al cavo sono collegati delle pale, draghe o rastrelli di varia foggia che spingono il materiale (v. Fig. 4.22).

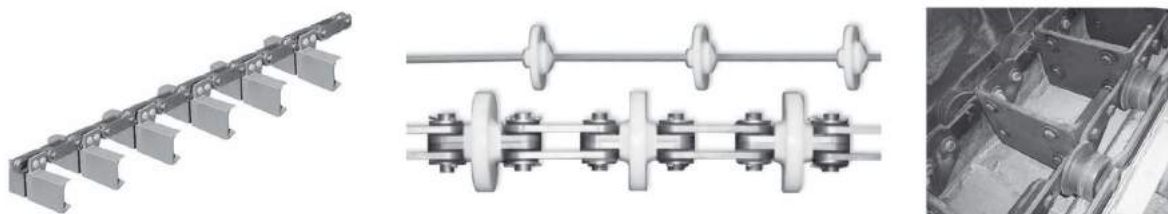


Fig. 4.22 ► Alcune tipologie di catene e cavi con pale e draghe.

Sono adatti a solidi di piccola pezzatura e scorrevoli, anche fanghi. Sono detti anche trasportatori a *flusso continuo* perché il materiale costituisce appunto un continuo in cui è immerso il dispositivo di trasporto. Un unico cassone può contenere sia il tratto di andata, sia quello di ritorno della catena e in tal caso il materiale si dispone nella parte bassa, oppure costituisce come un anello in cui il tratto di andata è separato da quello di ritorno (v. Fig. 4.23).

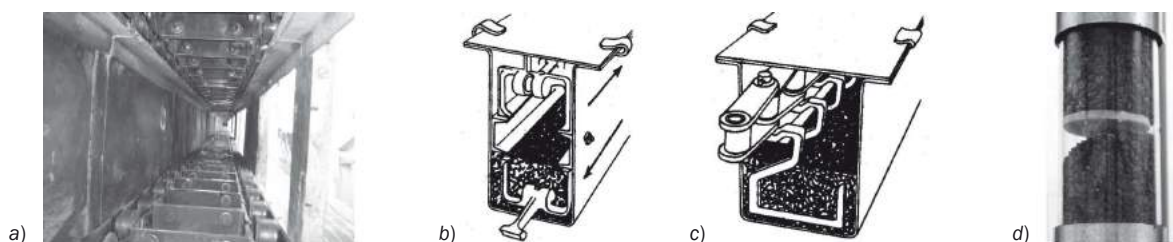


Fig. 4.23 ► Trasportatori a flusso continuo. A condotto unico: a) a draghe mobili; b) a catena con rastrelli. A condotto separato per l'andata e per il ritorno: c) a catena con rastrelli per un trasporto solo in orizzontale; d) a cavo con dischi per un trasporto in ogni direzione.

Una buona parte della potenza assorbita è dissipata per l'attrito del materiale con le pareti del condotto, quindi, dal punto di vista energetico, non reggono il confronto, p.e., con i trasportatori a nastro. Presentano però alcuni vantaggi: si possono adattare a qualsiasi percorso, orizzontale, verticale o inclinato che sia (v. Fig. 4.24); possono avere multipli punti di carico e scarico; il trasporto avviene in un apparecchiatura chiusa, senza contaminazioni e/o inquinamenti: può essere

condizionato, p.e., con un'atmosfera inerte. Raggiungono comunque portate fino a 1000 t/h e velocità fino a 1 m/s.

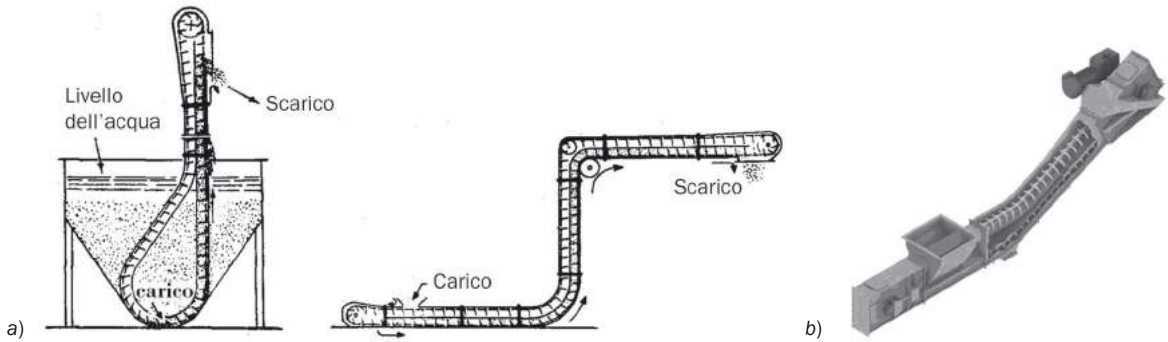


Fig. 4.24 ▶ Trasportatori a flusso continuo: a) possibili schemi applicativi; b) spaccato di un trasportatore.

4.3.4 Trasportatori a scosse o a vibrazioni

Sono trasportatori costituiti da canali aperti o chiusi a cui si impartiscono scosse o vibrazioni con una componente nella direzione del moto (v. Fig. 4.25).

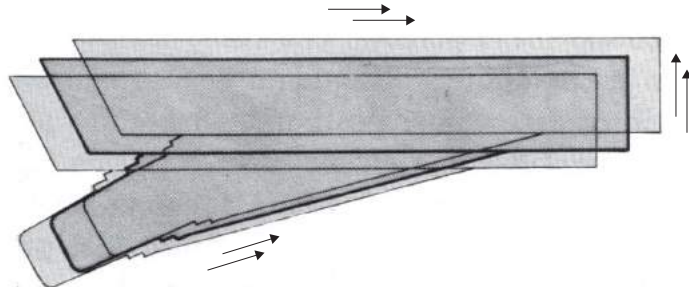


Fig. 4.25 ▶ L'impulso della vibrazione è scomponibile in una componente verticale che solleva il materiale dal piano d'appoggio, riducendo l'attrito con il trasportatore, e in una componente nella direzione del moto che realizza il trasporto impartendo al materiale una serie continua di piccoli salti.

Sono adatti a materiale granulare non polverulento, meglio di forma irregolare. Elevati coefficienti d'attrito, sia interno, sia con il piano di trasporto (quindi elevati angoli di riposo e di scorrimento) facilitano il movimento solo nella direzione voluta.

Le oscillazioni possono essere impartite meccanicamente, con elettromagneti, pneumaticamente o idraulicamente. Generalmente la frequenza delle oscillazioni è fissa, mentre si varia l'ampiezza per regolarne la portata. Con i vibrator meccanici, detti più propriamente *a scosse*, si raggiungono le maggiori distanze (oltre 100 m). I vibrator pneumatici (o anche idraulici) sono la scelta d'elezione per le aree a rischio di esplosione. Quelli elettromagnetici sono i più versatili. Regolando l'intensità della corrente si può ottenere una regolazione fine della portata, che può andare da pochi grammi a circa 1000 t/h. Diffuso l'impiego come dispositivi di alimentazione

di altre apparecchiature, oltre che per il trasporto orizzontale, possono essere utilizzati anche come elevatori (v. Fig. 4.26).

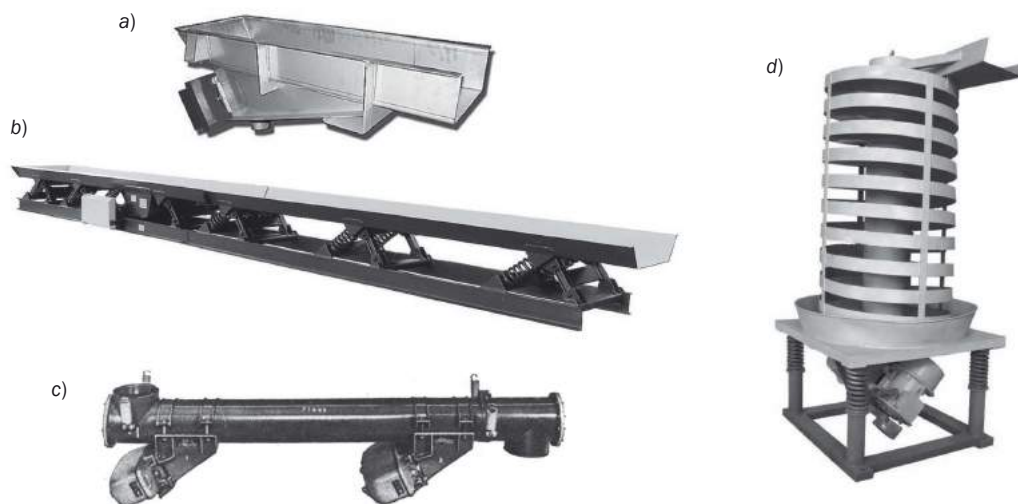


Fig. 4.26 ▶ Trasportatori a vibrazione: a) alimentatore, elettromagnetico; b) meccanico, a canale aperto; c) elettromagnetico, a canale chiuso; d) elevatore, meccanico.

4.3.5 Trasporto pneumatico

Nel trasporto *pneumatico* il solido è trascinato da una corrente gassosa. Il moto di una particella solida in un gas è simile a quello in un liquido (v. Cap. 8). Dopo un transitorio iniziale, il moto relativo al fluido di una particella isolata è dato dall'equilibrio tra la forza peso, la spinta archimedeica e la forza d'attrito con il fluido (v. Fig. 4.27).

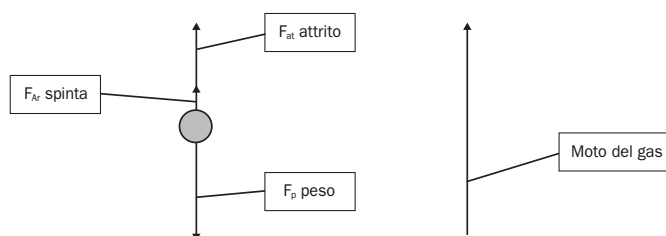


Fig. 4.27 ▶ Forze agenti su una particella solida isolata in un gas.

La notevole differenza tra la densità dei solidi e quella dei gas rende praticamente trascurabile la spinta archimedeica, quindi una particella isolata in caduta libera in un gas in quiete raggiungerà la massima velocità quando la risultante delle forze (\vec{F}_R) sarà nulla:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_p + \vec{F}_{at} = 0$$

Fluidizzazione

Se un solido granulare è posto in un contenitore (un silo, una tubazione, ecc.) con il fondo chiuso da una rete che sostiene il solido ma che lascia passare il gas e si

comincia ad immettere un gas dal fondo, si possono osservare i seguenti fenomeni. Inizialmente il solido è fermo e la pressione del gas all'imboccatura del contenitore sale per le perdite di carico causate dal *letto* sovrastante di particelle solide. Se si considera però il moto relativo al gas è come se la particella cadesse con velocità crescente con quella ascensionale del gas. Aumentando la portata, e quindi la velocità, del gas si arriva a un massimo della caduta di pressione che poi comincia a diminuire: la velocità del gas ha mediamente eguagliato quella di caduta delle particelle che è come se galleggiasse, il letto comincia ad espandersi e si formano delle bolle di gas che attraversano tutto il letto di particelle rimescolandolo. Si è al *letto fluido bollente*, in cui la velocità del gas è mediamente in grado di rimescolare le particelle ma non di trascinarle (v. Fig. 4.28 a). Aumentando ancora la velocità del gas il gradiente di pressione (variazione della pressione con la distanza, $\Delta P/x$) diminuisce e le particelle cominciano ad essere trascinate. Con l'ulteriore crescita della velocità del gas si ha un notevole calo del gradiente di pressione e si arriva al trasporto pneumatico in *fase diluita* (v. Fig. 4.28 b).

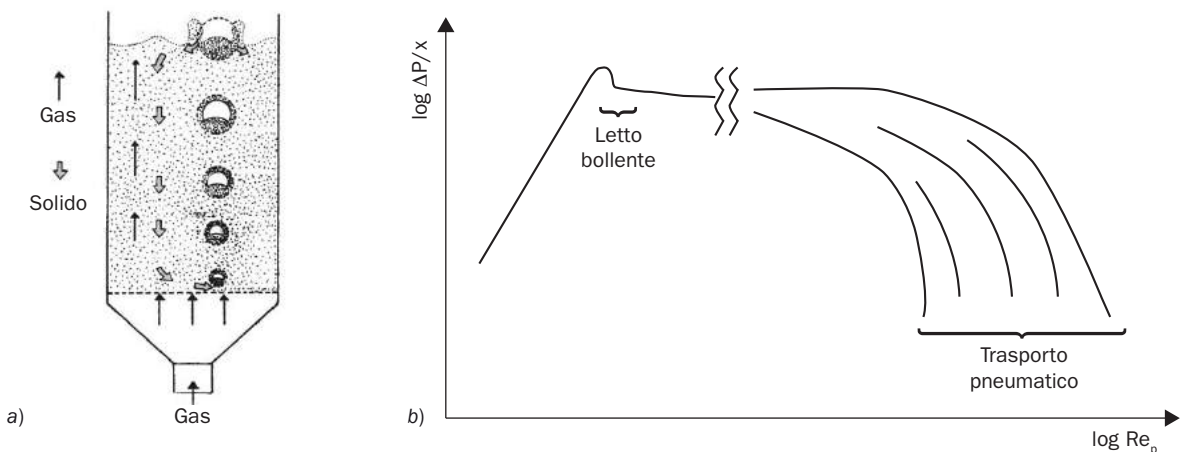


Fig. 4.28 ▶ a) Letto fluido bollente: il solido è continuamente rimescolato dal gas che trascina le particelle verso l'alto nelle bolle; arrivate alla sommità del letto, le bolle scoppiano lasciandole ricadere. b) Grafico dell'andamento del gradiente di pressione in funzione del numero di Reynolds delle particelle: in evidenza le zone del letto fluido bollente e del trasporto pneumatico (numero di Reynolds (Re): v. 5.2.3).

Caratteristiche del trasporto pneumatico

Come si è visto nei precedenti paragrafi le apparecchiature per la movimentazione dei solidi sono di una certa complessità. Il trasporto pneumatico ha, in estrema sintesi, il pregio di trattare i solidi con la semplicità (o quasi) con cui si trattano i liquidi. In particolare, il trasporto pneumatico:

- ha costi d'istallazione e d'esercizio relativamente bassi;
- trasporta i solidi in tubazioni chiuse e, volendo, si può evitare il contatto del materiale con parti in movimento, evitando la contaminazione del materiale e/o l'inquinamento dell'ambiente;
- è adatto a solidi granulari di diverso tipo, con densità apparente da meno di 20 a più di 3000 kg/m^3 , con dimensioni da polveri fini fino a diversi centimetri, per le basse densità come quelle delle materie plastiche;
- opera in qualsiasi direzione;

- può operare su brevi distanze, come su linee di chilometri;
- ha potenzialità elevate, fino a decine di t/h per linea;
- richiede interventi manuali minimi;
- è facilmente gestibile in automatico;
- è facilmente modificabile, spesso basta spostare o allungare le tubazioni.

Le tecnologie principali utilizzate nel trasporto pneumatico sono la “fase diluita” e la “fase densa”.

Nel trasporto in fase diluita un gas trascina i granuli di solido in continuo e a bassa pressione, con un elevata velocità e con un rapporto gas/solido molto elevato (Fig. 4.28b).

Nel trasporto in fase densa un impulso di gas pressurizzato dà la spinta a un ammasso di materiale spostandolo lungo la linea, prevalentemente in modo discontinuo. Il trasporto avviene a bassa velocità e ad elevata pressione, con un rapporto gas/solido molto basso.

Il trasporto pneumatico inizialmente era basato sulla tecnologia a fase diluita. A partire dagli ultimi decenni del secolo scorso hanno cominciato a svilupparsi i processi a fase densa per ridurre i costi energetici e gli inconvenienti con materiali abrasivi o friabili.

Tranne casi molto particolari, il gas di trasporto utilizzato comunemente è l'aria atmosferica.

4.3.5.1 Apparecchiature per il trasporto pneumatico

Gli impianti di trasporto pneumatico sono costituiti da diverse apparecchiature e dispositivi. Oltre a sili, serbatoi, condotte, ecc., ce ne sono alcuni particolarmente rilevanti per tali impianti.

Compressori e soffianti: a seconda della pressione richiesta dal trasporto, si utilizzano soffianti per pressioni di pochi kPa, compressori rotativi, generalmente del tipo a lobi, per pressioni fino a 1 bar o poco più, compressori alternativi per pressioni superiori (v. Fig. 4.29).

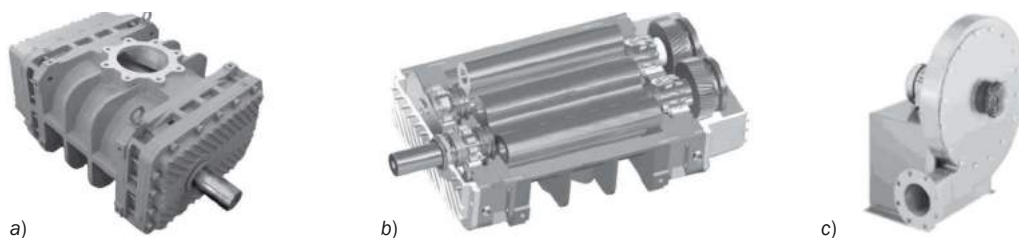


Fig. 4.29 ▶ a) Compressore rotativo a 3 lobi (1 bar) e b) relativo spaccato (Eurus Blower); c) soffiante centrifuga (35 kPa).

Dispositivi
di carico

Valvole rotative: dette anche *rotocelle* o *dosatori stellari*, hanno la funzione di spingere il materiale solido dentro un'apparecchiatura a pressione (silo, tubazione, ecc.) facendo tenuta tra le apparecchiature a differente pressione, cioè senza che il

gas fuoriesca e spinga il materiale all'indietro; sono costituite da una ruota a palette fatta girare da un motore: le palette sono in numero tale da chiudere il percorso al gas e girando spingono il materiale nella direzione voluta; regolando il numero di giri, si regola la portata. Praticamente sono utilizzate solo nel trasporto in fase diluita (v. Fig. 4.30).

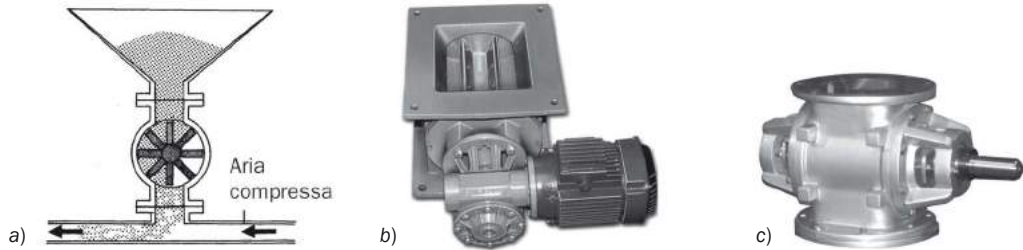


Fig. 4.30 ▶ a) Schema applicativo delle rotocelle; b) e c) rotocelle.

Eiettori a tubo Venturi: hanno la stessa funzione delle rotocelle, agiscono aspirando il solido; essendo delle macchine statiche, risultano più economiche ma richiedono gas a pressione ben più alta di quella di mandata; non offrono una buona regolazione della portata, adatti per trasporti a bassa pressione (v. Fig. 4.31).

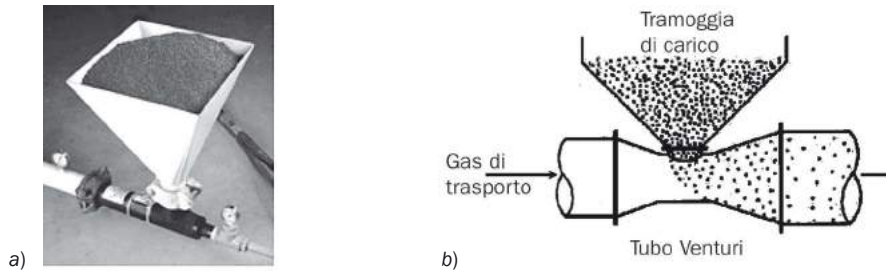


Fig. 4.31 ▶ a) Eiettore a tubo Venturi con tramoggia di carico; b) schema di funzionamento.

Valvole a serranda: aprono o chiudono il passaggio al materiale che passa sotto la spinta del proprio peso o della pressione, si pongono sullo scarico dei silos o di altre apparecchiature; sono costituite da un otturatore a lama che si muove perpendicolarmente al condotto o, talvolta, di un otturatore emisferico che agisce per rotazione e che offre una migliore tenuta nelle applicazioni in pressione (v. Fig. 4.32).

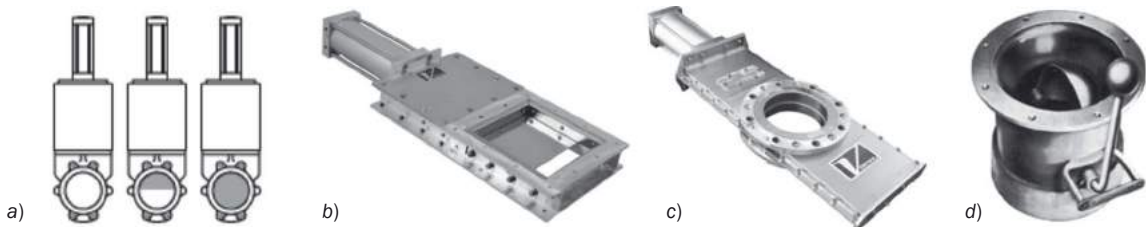


Fig. 4.32 ▶ a) Schema di funzionamento delle serrande; b) serranda con otturatore a lame per condotti a sezione quadra e c) a sezione circolare; d) serranda con otturatore emisferico.

Valvole deviatrici: deviano il flusso del materiale tra due condotti; lavorano con diversi principi: in alcune c'è un setto mobile che indirizza lo scarico tra i due condotti, in altre c'è un breve tratto di tubazione che ruotando in una bussola collega l'ingresso con una o l'altra via, in altre ancora, sui due condotti di scarico è posta una serranda che agisce alternativamente sugli scarichi (v. Fig. 4.33).

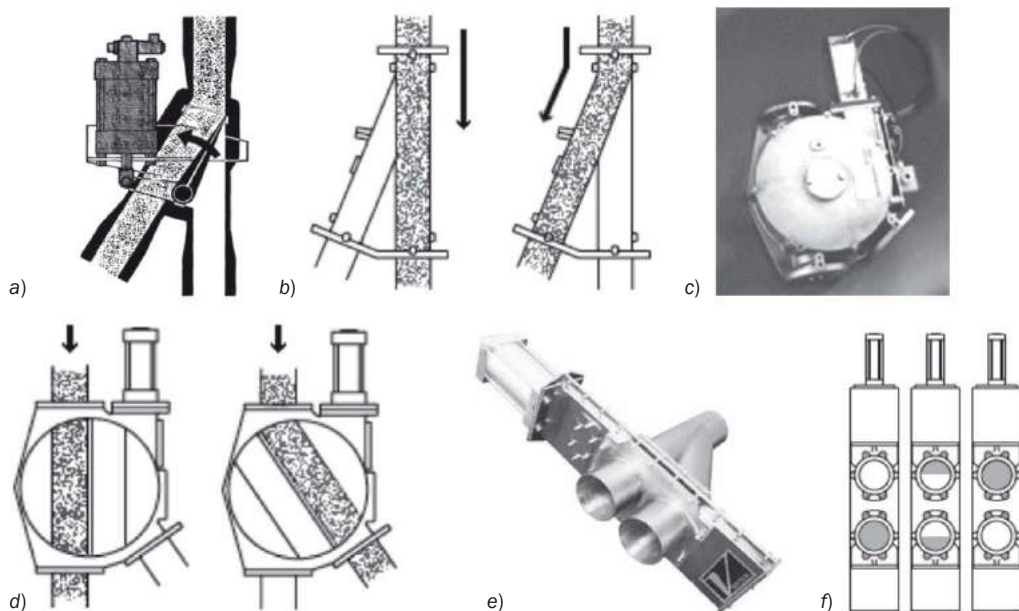


Fig. 4.33 ▶ Valvole deviatrici: a) e b) a setto, schemi di funzionamento; c) a bussola e d) schema; e) con serranda a doppia luce sugli scarichi (Vortex) e f) schema di funzionamento.

Dispositivi di scarico

Cicloni e filtri: si utilizzano per separare il materiale solido dalla corrente gassosa. In particolare, i filtri, prevalentemente del tipo a maniche, si aggiungono per fermare le polveri fini, se presenti, in ingresso a compressori e soffianti e sugli scarichi in atmosfera; i filtri sono generalmente dotati di sistemi per la pulizia in contro pressione per evitare l'accumulo di polveri. Per la descrizione si rimanda al Cap. 11, in cui sono ampiamente trattati. I cicloni e i filtri possono essere accoppiati in un'unica apparecchiatura, specifica per il trasporto pneumatico. Lo scarico del gas nel ciclone è suddiviso in più camini sorretti da una sorta di piastra tubiera che fa da supporto per un setto filtrante (v. Fig. 4.34).

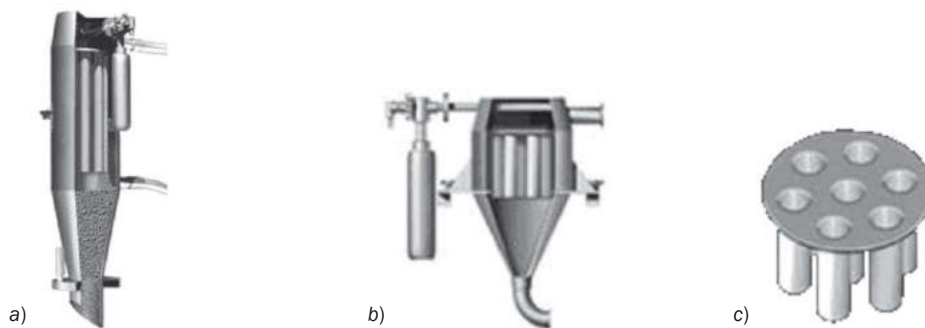


Fig. 4.34 ▶ Cicloni-filtri per il trasporto pneumatico in aspirazione: a) e b), spaccati di apparecchiature, con accumulatore di gas per la pulizia del filtro; c) particolare del porta filtro.

Propulsori: sono particolari tramogge chiuse utilizzate nel trasporto discontinuo in fase densa; una volta riempite del materiale, si pressurizzano in modo da spingere il materiale da trasportare (v. Fig. 4.35)



Fig. 4.35 ▶ Propulsore per trasporto in fase densa (Air-Tec).

4.3.5.2 Impianti di trasporto pneumatico in fase diluita

È la tecnologia attualmente più diffusa, le caratteristiche principali sono:

- velocità di trasporto di $15 \div 40$ m/s;
- pressione in compressione di $40 \div 80$ kPag (il suffisso g, gauge, indica un valore di pressione effettiva);
- depressione in aspirazione di $-15 \div -40$ kPag;
- rapporto in massa gas/solidi > 2 .

L'elevata velocità di trasporto presenta l'inconveniente dell'abrasione delle tubazioni e delle altre parti dell'impianto per il continuo impatto delle particelle, specie nei cambi di direzione e nei punti di maggiore turbolenza. Un altro inconveniente è la possibile frantumazione dei granuli di solido, specie con i materiali più friabili, con degradazione del prodotto che può risultare intollerabile. Inoltre la rilevante quantità di gas per unità di massa di solido trasportato impone elevati consumi energetici.

È adatto a materiali scorrevoli, non abrasivi, non friabili, non umidi e, preferibilmente, con densità apparente inferiore a 1 kg/m^3 .

Il trasporto pneumatico si può realizzare con due impianti di base: in aspirazione o in compressione, in aggiunta ci sono impianti che lavorano in aspirazione, per un tratto, e in compressione per un altro.

Impianti
in aspirazione

In un **impianto in aspirazione**, un compressore, posto a fine impianto, crea una depressione lungo la linea e le apparecchiature. Il materiale è aspirato e trasferito, sempre in depressione, fino all'apparecchiatura, p.e. un silo, di destinazione.

Un utilizzo tipico è il trasporto da più punti, quali carri ferroviari, autotreni, stive, sili di stoccaggio, ecc., su brevi distanze, a un'unica apparecchiatura di destinazione. Non è economico avere più destinazioni, perché ognuna dovrebbe avere il proprio sistema di separazione solido-gas e un compressore collegato. Non si possono coprire lunghe distanze perché non si può operare con depressioni più spinte di circa il 50% del vuoto assoluto, dato che è sempre necessaria la presenza di una certa quantità di gas per realizzare il trasporto. Inoltre, i costi sono superiori agli

impianti in compressione, perché tutte le apparecchiature devono essere a tenuta per il vuoto.

Nel trasporto in aspirazione il prodotto non viene in contatto con parti in movimento e le eventuali polveri non possono fuoriuscire, è pertanto indicato per prodotti alimentari o farmaceutici, come, per altro, per prodotti tossici e/o pericolosi.

Le tipiche condizioni operative sono:

- portata: medio-bassa, fino a 10 t/h;
- velocità di trasporto: 15 ÷ 40 m/s;
- distanza massima: circa 100 m;
- pressione: circa il 50% del vuoto assoluto.

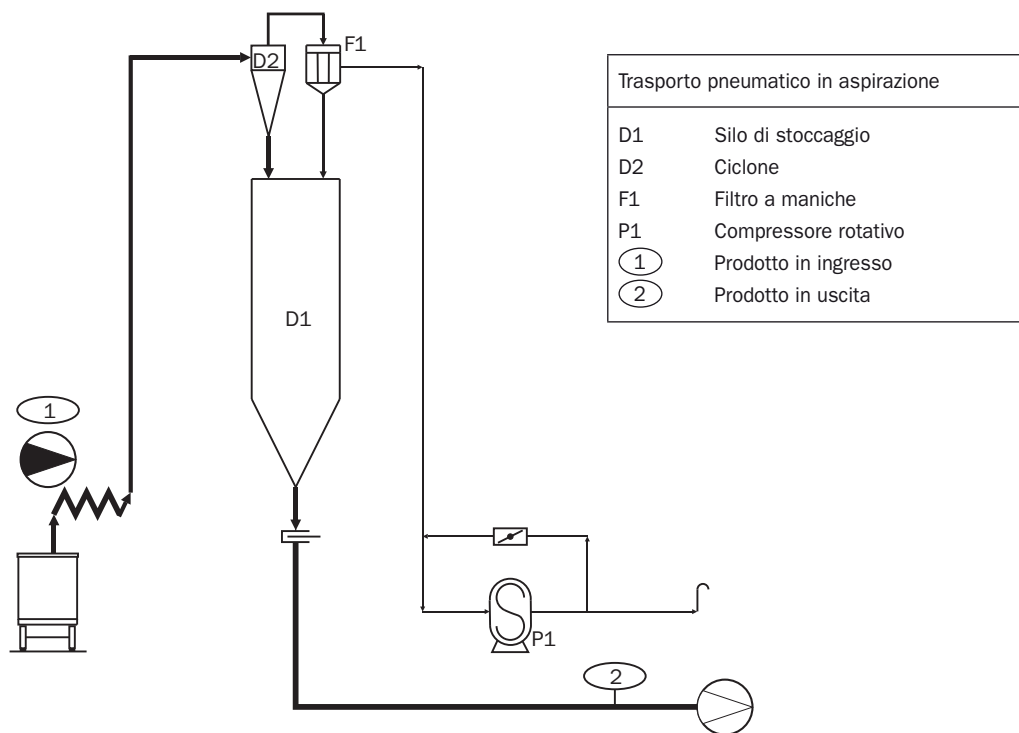


Fig. 4.36 ▶ Trasporto pneumatico in aspirazione.

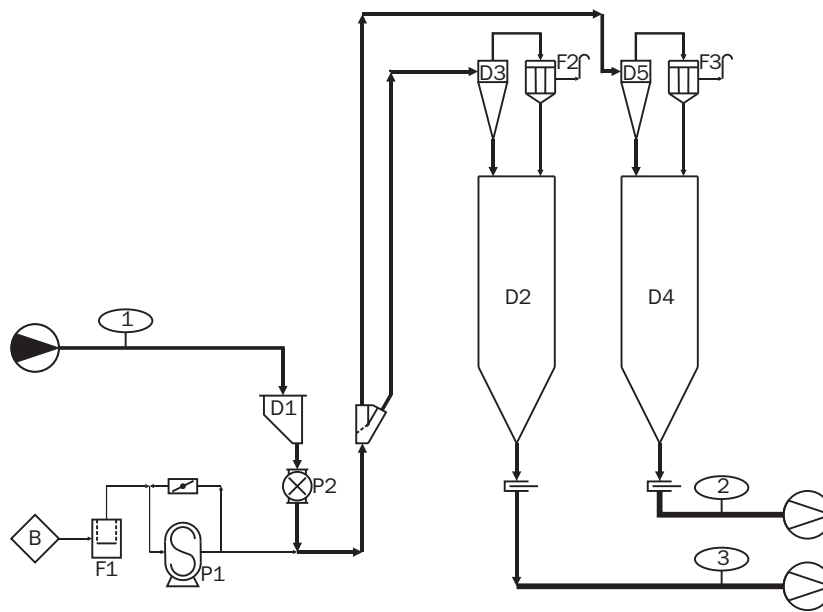
In Fig. 4.36 è riportato lo schema di processo di un trasporto pneumatico in *aspirazione*. Il prodotto granulare 1, da scaricare da un carro ferroviario, è aspirato con una tubazione flessibile, arriva al *ciclone* D2, dove si separa dall'aria, e passa nel *silo di stoccaggio* D1. Da D1 il prodotto 2 si scarica a gravità tramite la serranda posta sull'uscita. L'aria in uscita da D2 passa nel *filtro a maniche* F1 per separare i fini non trattenuti dal ciclone. I fini rientrano in D1. L'aria è aspirata dal *compressore rotativo* P1. La portata dell'aria, e quindi la depressione creata dall'aspirazione, è regolata da una valvola a farfalla posta sulla linea di by-pass su P1.

Impianti
in pressione

Negli *impianti in compressione* il materiale è spinto con una rotocella o un altro dispositivo nella linea in cui circola un gas pressurizzato con un compressore o una soffiante. Il solido, trascinato dal gas, è trasportato nella linea pressurizzata fino a destinazione. Sono possibili portate e distanze superiori agli impianti in aspirazione.

Le tipiche condizioni operative sono:

- portata: da bassa ad elevata, da meno di 1 t/h, fino a 50 t/h;
- velocità di trasporto: 16 ÷ 40 m/s;
- distanza: oltre 200 m;
- pressione: fino a 1 barg.



Trasporto pneumatico in compressione			
D1	Tramoggia di carico prodotto 1	P2	Dosatore stellare prodotto 1
D2	Silo stoccaggio prodotto 3	①	Prodotto 1 in ingresso
D3	Ciclone	②	Prodotto 2 in uscita
D4	Silo stoccaggio prodotto 2	③	Prodotto 3 in uscita
D5	Ciclone	◇	Aria atmosferica
F1	Filtro a cartuccia aria di trasporto		
F2	Filtro a maniche		
F3	Filtro a maniche		
P1	Compressore rotativo		

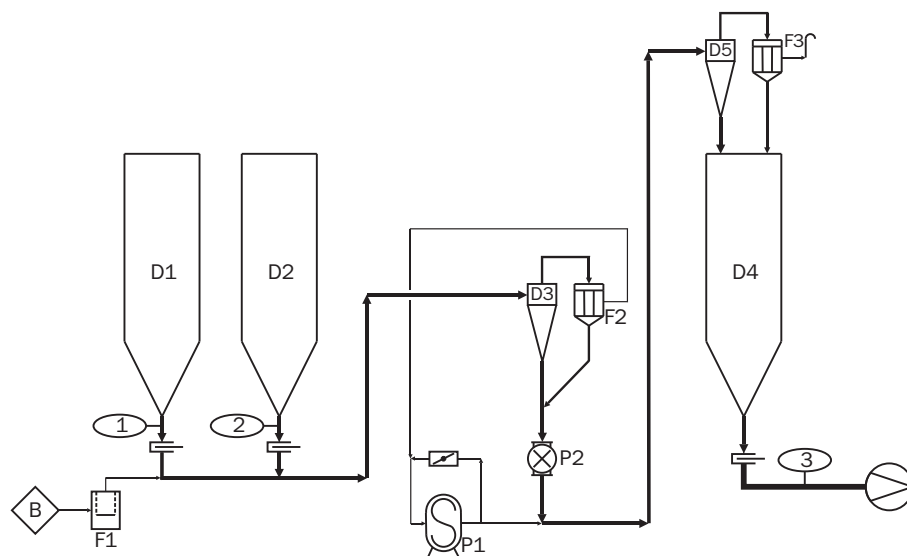
Fig. 4.37 ▶ Trasporto pneumatico in compressione.

Lo schema di processo di Fig. 4.37 rappresenta un impianto di trasporto pneumatico in **compressione** che trasferisce i prodotti in ingresso in due silos di stoccaggio. Il prodotto 1 è caricato nella **tramoggia** D1 da dove è prelevato tramite la **rotocella** P2 e immesso nella linea in pressione. Tramite una valvola deviatrice il prodotto è inviato al **silo** D2 (al silo D4). La linea che alimenta D2 incontra prima il **ciclone** D3 dove il prodotto si separa dall'aria. I fini in uscita da D3 con l'aria sono separati nel **filtro a maniche** F2 e fatti ricadere in D2, mentre l'aria è spurgata. Similmente la linea che alimenta D4 incontra il ciclone D5 dove il prodotto si separa dall'aria e i fini sono separati in F3 e recuperati, mentre si spurga l'aria. Da D2 si scarica a gravità, tramite la serranda posta sull'uscita, il prodotto 3. Similmente da D4 si scarica il prodotto 2. L'aria compressa è prodotta a partire dall'aria atmosferica, preventi-

Impianti in
aspirazione e
compressione

vamente filtrata nel filtro a candela F1, tramite il compressore rotativo P1, la cui portata è regolata con la valvola a farfalla posta sulla linea di by-pass.

Impianti in aspirazione e in compressione: sono impianti in cui un primo tratto lavora in aspirazione, mentre quello successivo è in compressione. Riuniscono i vantaggi di aspirazione e compressione, tipicamente utilizzati per prelevare i solidi da più fonti e trasportarli a più destinazioni.



Trasporto pneumatico in aspirazione e compressione			
D1	Silo stoccaggio prodotto 1	①	Prodotto 1 in ingresso
D2	Silo stoccaggio prodotto 2	②	Prodotto 2 in ingresso
D3	Ciclone	③	Prodotto 3 in uscita
D4	Silo stoccaggio prodotto 3	◇ B	Aria atmosferica
D5	Ciclone		
F1	Filtro a cartuccia aria di trasporto		
F2	Filtro a maniche		
F3	Filtro a maniche		
P1	Compressore rotativo		
P2	Dosatore stellare		

Fig. 4.38 ▶ Trasporto pneumatico in aspirazione e compressione.

Lo schema di Fig. 4.38 è di un impianto che trasferisce il materiale presente in due silos in un terzo silo. Il prelievo dai due silos avviene in aspirazione, poi, dopo la separazione del solido dal gas, si comprime l'aria di trasporto, si immette il solido nella linea in pressione e lo si trasporta al silo di destinazione. Il prodotto 1, stoccato nel silo D1, e/o il prodotto 2, stoccato in D2, sono aspirati dalla *condotta in depressione*, in cui passa aria atmosferica, filtrata nel *filtro a cartuccia* F1, e aspirata dal *compressore rotativo* P1. La sospensione aria-prodotto passa nel ciclone D3, dove si separa la quasi totalità dei solidi, poi passa nel filtro a maniche F2, dove si separano i fini, quindi è compressa in P1 e inviata in pressione nella linea di mandata. Il materiale, separato in D3 e F2, è riunito e, tramite la rotocella P2, immesso nella linea

in pressione e trasportato al silo di stoccaggio D4, dopo separazione dall'aria in D5. Prima di essere spurgata in atmosfera, l'aria è depurata dai fini nel filtro a maniche F3. Anche i fini si raccolgono in D4, da dove si preleva il prodotto 3, scaricando per gravità tramite la serranda posta sull'uscita di D4.

4.3.5.3 Impianti in fase densa

Nel trasporto in fase diluita il gas sostiene e trascina le singole particelle. Se si riduce la velocità, le particelle, a cominciare dalle più grosse, non sono più sostenute dal gas e precipitano sul fondo della tubazione. Nel trasporto in *fase densa* si opera con velocità del gas inferiore a quella necessaria per sostenere le particelle del solido che quindi non può essere sostenuto e trascinato ma si accumula formando degli addensamenti che aumentano le perdite di carico. Tali addensamenti si muovono lentamente solo se la pressione aumenta, oltre un certo limite, fino a spingere il materiale senza che, in pratica, sia attraversato dal gas.

Consumi energetici

La ridotta velocità porta molti vantaggi, nonostante la pressione più alta, il gas utilizzato è molto di meno e, di conseguenza, i consumi energetici sono più ridotti (v. Fig. 4.39). Poi diminuiscono i problemi di abrasività e di fragilità del materiale trasportato poiché la maggior parte delle particelle non arriva a toccare le pareti delle tubazioni; diminuiscono anche i costi di manutenzione e l'emissione di polveri nell'ambiente. Con la fase densa si possono trasportare materiali fragili, abrasivi, ad alta densità, igroscopici. Mentre non si può utilizzare per materiali che hanno la tendenza ad impaccarsi perché, in tal caso, si formano addensamenti tali da bloccare il trasporto.

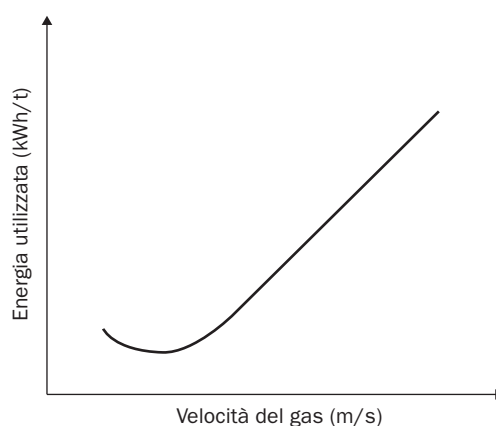


Fig. 4.39 ► Consumi energetici per tonnellata di prodotto, in funzione della velocità del gas nel trasporto pneumatico.

Le tipiche condizioni operative sono:

- portata: elevata, oltre 100 t/h;
- velocità di trasporto: bassa, 1 ÷ 10 m/s;
- distanza: elevata, oltre 3 km;
- pressione: elevata, oltre 8 barg;
- rapporto gas/solido: basso, inferiore a 0,2.

Caratteristiche operative

Il funzionamento di base è *discontinuo* poiché non è possibile utilizzare le usuali rotocelle che non sarebbero in grado di fare tenuta con pressioni così elevate. Anche se esistono speciali rotocelle per alta pressione, risulta conveniente utilizzare dei serbatoi, detti propulsori (v. Fig. 4.35) che funzionano secondo il *ciclo* seguente (v. Fig. 4.40).

1. **Carico.** Valvole aperte: V1, V4, V5. Si riempie il propulsore con il prodotto da trasportare; si chiude V1 e V4.
2. **Pressurizzazione.** Valvole aperte: V3. Si pressurizza fino a raggiungere la pressione di lavoro.
3. **Trasporto.** Valvole aperte: V2, V3, V5. Il prodotto è spinto dalla pressione lungo la tubazione fino a destinazione; si pressurizza man mano anche la linea per agevolare il trasporto; si chiude V2 e V3.
4. **Spurgo.** Valvole aperte: V4, V5. Si spurga la linea con gas compresso e si depressurizza il propulsore.

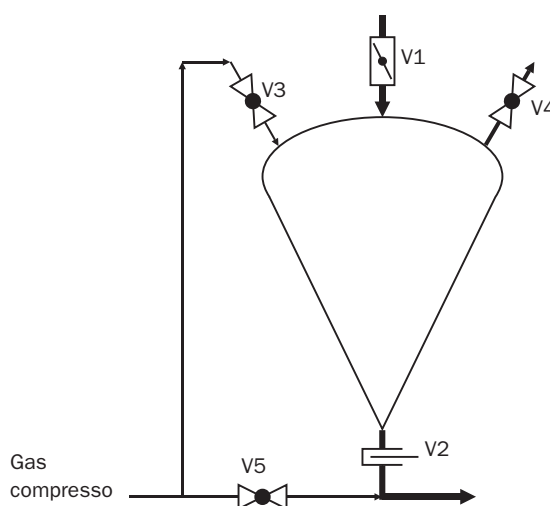


Fig. 4.40 ▶ Schema dei collegamenti principali di un propulsore. V1: valvola carico prodotto; V2: valvola scarico prodotto; V3, V5: valvole pressurizzazione; V4: valvola spurgo.

Tutto il ciclo, come la pressione e la distribuzione del gas è necessariamente regolato da un sistema di controllo automatico, indispensabile, visto che di solito il funzionamento è stabile in un ristretto intervallo di velocità.

Per rendere *semicontinuo* il processo si utilizzano due o più propulsori in batteria.

Le modalità di movimento del solido sono diverse in relazione alle condizioni operative adottate e alle caratteristiche del materiale. Al di sotto dei 5 m/s è tipico il *flusso a pistone*, in cui il solido forma come dei “tappi”, tratti di tubazione, praticamente pieni del solido granulare, alternati a cuscinetti di gas compresso che danno la spinta al movimento (v. Fig. 4.41).



Fig. 4.41 ▶ Movimento del solido a flusso a pistone (a “tappi”) nel trasporto pneumatico in fase densa.

In Fig. 4.42 è schematizzato un impianto di trasporto in fase densa, a singolo propulsore, che funziona secondo il ciclo descritto precedentemente, con movimento del solido a flusso a pistone.

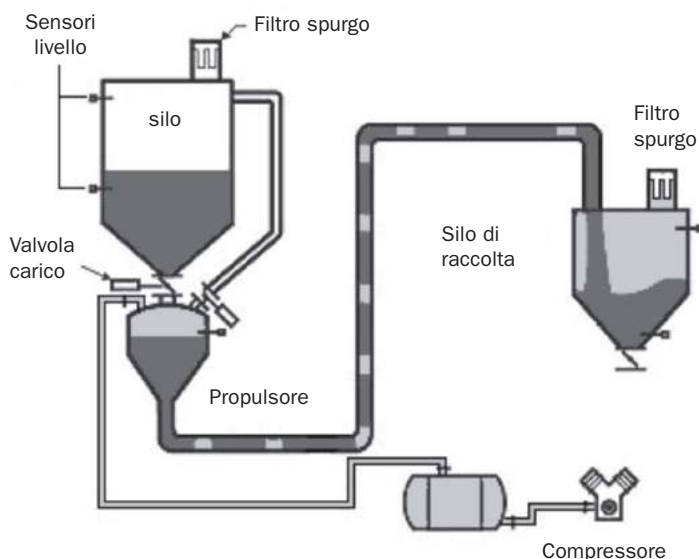


Fig. 4.42 ► Rappresentazione di un impianto di trasporto in fase densa con movimento a flusso a pistone del solido.

Si è già detto della necessità di un accurato sistema di controllo per il trasporto in fase densa che risulta comunque più delicato di quello in fase diluita. Anche la tipologia del solido trasportato e la sua granulometria, che non deve essere troppo ampia, influenzano le condizioni di funzionamento che inevitabilmente debbono cambiare se cambiano le caratteristiche del prodotto. È facile per questi impianti cadere in un regime di instabilità, con pericolose vibrazioni, o arrivare all'intasamento della linea con blocco del trasporto.

Inoltre anche i costi d'impianto sono maggiori rispetto alla fase diluita, sia perché è un impianto in pressione, sia per il necessario sistema di controllo altamente sofisticato. Sono invece minori i costi energetici e la manutenzione e, soprattutto, non si ha il deterioramento di prodotti delicati, come con la fase diluita che, in tal caso, si tradurrebbero in pesanti costi d'esercizio.

glossario

- **Analisi granulometrica.** Metodo con cui si determina la distribuzione delle dimensioni delle particelle di un materiale granulare. Permette di ottenere la curva di distribuzione differenziale, che mostra la distribuzione delle dimensioni delle particelle, e quella integrale o cumulativa, che mostra la frazione al di sotto e quella al di sopra di una data dimensione. L'analisi granulometrica può essere effettuata con diverse tecniche, anche in relazione alle caratteristiche del materiale. Tipico l'uso di setacci (v.) in serie, altre tecniche comprendono la sedimentazione, la diffrazione laser, ecc. Recentemente, con lo sviluppo di software per l'analisi delle immagini, si è sviluppata anche la granulometria ottica che si basa sull'analisi di una fotografia del materiale con un "setaccio virtuale".
- **Angolo di declivio naturale.** V. Angolo di riposo.
- **Angolo di riposo.** È il massimo angolo rispetto all'orizzontale che può formare un materiale stocato in cumulo senza franare.
- **Angolo di scorrimento dinamico.** È il minimo angolo rispetto all'orizzontale con cui il materiale, posto un piano inclinato, continua a scivolare.
- **Angolo di scorrimento statico.** È il minimo angolo rispetto all'orizzontale che forma un piano inclinato quando il materiale posto sopra inizia a scivolare.
- **Bancale o pancale.** Struttura utilizzata per agevolare lo spostamento e il trasporto di oggetti (p.e. contenitori) di varia natura. Ha forma piana sì da sostenere gli oggetti in modo stabile. È caratterizzata da zone di appoggio per le apposite macchine di sollevamento e trasporto. È costruita con dimensioni e forme standardizzate; i materiali vanno dal legno, alla plastica, agli acciai.
- **Porosità.** È una misura degli spazi vuoti in un materiale granulare e/o poroso. È definita come il rapporto tra il volume dei pori e il volume complessivo occupato dal materiale. Può essere espressa anche in termini percentuali. Può essere **esterna**, se si riferisce al volume degli interstizi tra le particelle di un materiale granulare, o **interna**, se si riferisce al volume dei pori eventualmente presenti nei granuli del materiale.
- **Pulsore.** Apparecchiatura utilizzata nel trasporto pneumatico in fase densa. È costituito da un serbatoio munito di opportune valvole. Una volta caricato del materiale da trasportare, è pressurizzato a pressione sufficientemente elevata da assicurare il trasporto.
- **Rotocella o dosatore stellare.** È costituita da una ruota a pale che gira in un'apposita cassa. Ha la funzione di spingere un solido granulare da un ambiente a un altro a diversa pressione. Il numero di pale è tale da fare tenuta tra i due ambienti, mantenendo così la diversa pressione.
- **Setaccio o staccio.** È costituito da una rete supportata da un bordo cilindrico, usualmente in metallo. Serve per separare quella parte di solido granulare con dimensioni inferiori a quelle della rete che lo caratterizza. Le reti, a maglia quadrata, hanno dimensioni normalizzate secondo opportune serie. I setacci si utilizzano solitamente in serie, impilandoli con in alto il più grossolano e in basso il più fine, per l'analisi granulometrica (v.) di solidi granulari.
- **Silo.** Serbatoio cilindrico verticale per solidi granulari. Di forma allungata, munito in basso di un fondo conico per agevolare lo scarico del materiale.
- **Trasportatori a gravità.** Trasportatori per solidi che sfruttano la forza di gravità. Operano solo in discesa. Possono essere **a rulli** o **a canale**, aperto o chiuso.
- **Trasportatori a scosse o vibrazioni.** Trasportatori per solidi che fanno avanzare il materiale lungo canali aperti o chiusi per mezzo di vibrazioni. Le vibrazioni possono essere impartite con dispositivi meccanici, elettrici, pneumatici o idraulici.
- **Trasportatori a spinta.** Trasportatori per solidi in cui il materiale è spinto da appositi organi dentro canali prevalentemente chiusi. Possono essere **a coclea** e **a flusso continuo**. Questi ultimi possono essere **a draghe**, **a pale**, **a rastrelli**, ecc. Talvolta detti anche trasportatori a catena con possibile confusione con l'omonimo tipo di trasportatori portanti.
- **Trasportatori portanti.** Trasportatori per solidi in cui il materiale è posto su elementi mobili che assicurano il trasporto. Possono essere **a nastro**, **a piastre**, **a catena**. In questa categoria rientrano anche gli **elevatori a tazze**.
- **Trasporto pneumatico.** Sistema di trasporto di solidi granulari sotto la spinta di un gas, di solito aria. Può essere in **fase diluita**, in cui il solido è trascinato dalla corrente gassosa, o in **fase densa**, in cui si opera a più elevata pressione che spinge i granuli compattati in sorta di tappi. Il trasporto in fase diluita può operare in compressione, in aspirazione o in aspirazione e compressione; il trasporto in fase densa solo in compressione.

esercizi

Capitolo 4

esercizio 1

Un materiale presenta una porosità dichiarata del 39,2% e una densità apparente di $1,57 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Si vuole calcolare la densità effettiva del materiale.

(Utilizzare la relazione (4.1) Risposta: $2,58 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)

esercizio 2

Si vuole determinare la porosità, la densità apparente e reale di un materiale granulare non poroso, preventivamente essiccato e privo di fini. Si può adottare la seguente procedura, adatta a materiali a densità maggiore di quella dell'acqua e facilmente riproducibile in laboratorio.

Si fa la tara di un cilindro da 1000 mL. Si riempie il cilindro con il materiale fino a circa $750 \div 800 \text{ mL}$. Si scuote il cilindro per far compattare il materiale e far assumere un profilo il più possibile orizzontale alla sommità del materiale, in modo da misurare il volume con buona accuratezza e precisione. Si pesa e si ricava la massa del materiale. Si riempie il cilindro con acqua, agitando con cautela e portando il volume a 1000 mL (comunque, fino a ricoprire il materiale). Si pesa di nuovo e, in base alla densità dell'acqua utilizzata, se ne ricava il volume e, quindi, il volume effettivo del materiale. Si calcola la porosità, con la (4.1), quindi la densità reale e apparente del materiale.

Dati

massa materiale:	$m = 1270,5 \text{ g}$
volume apparente del materiale:	$V_T = 770 \text{ mL}$
acqua per portare a 1000mL:	$516,92 \text{ g}$
densità dell'acqua a 20°C:	$0,9982071 \text{ g/mL}$

Risoluzione

Il volume dell'acqua aggiunta vale:

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{516,92 \text{ g}}{0,9982071 \text{ g/mL}} = 517,85 \text{ mL}$$

Il volume effettivo del materiale è:

$$V_S = V_{\text{cil}} - V_{H_2O} = 1000 - 517,85 = 482 \text{ mL}$$

Per la (4.1) si ha:

$$\phi = 1 - \frac{V_S}{V_T} = 1 - \frac{482 \text{ mL}}{770 \text{ mL}} = 0,374 \approx 37\%$$

La densità apparente vale:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_T} = \frac{1270,5 \text{ g}}{770 \text{ mL}} = 1,65 \text{ g/ml} \approx 1,65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

La densità reale del materiale vale:

$$\rho = \frac{m}{V_S} = \frac{1270,5 \text{ g}}{482 \text{ mL}} = 2,64 \text{ g/ml} \approx 2,64 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

esercizio 3

Si richiede l'analisi granulometrica di un campione di sabbia. Dopo essiccamento, si pesa esattamente un'aliquota e si sottopone a setacciatura. La massa totale di campione setacciata è di 231,28 g. Il trattenuto parziale è riportato nella tabella sottostante. Completare l'elaborazione dei dati della tabella e costruire le curve di distribuzione differenziale e integrale come nel § 4.1 (v. Tab. 4.1 e Fig. 4.4).

SETACCI UNI (LUCE, mm)	TRATTENUTO PARZIALE (g)	TRATTENUTO PARZIALE (%)	DIMENSIONE MEDIA (mm)	TRATTENUTO CU- MULATIVO (g)	TRATTENUTO CUMULATIVO (%)
8	0	0,00%		0	0,00%
5,6	3,30	1,43%	6,8	3,30	1,43%
4	42,21				
2	95,94				
1	48,17				
0,5	18,84				
0,25	10,31				
0,125	8,22				
0,063	3,47				
Fondo	0,82				

esercizio 4

Nella seguente tabella sono indicate alcune caratteristiche tipiche dei trasportatori di solidi. Indicare, per le tipologie di trasportatori riportate, se le caratteristiche sono vere o false.

CARATTERISTICHE	TRASPORTATORI A NASTRO	TRASPORTATORI PNEUMATICI (FASE DILUITA)	TRASPORTATORI A CATENA (A SPINTA)	ELEVATORI A TAZZE
Sono adatti a trasportare anche materiali umidi				
Possono operare solo in orizzontale				
Possono operare anche in verticale				
Sono adatti a percorsi curvilinei				
Possono trasportare anche materiali di grossa pezzatura				
È possibile il carico e scarico in vari punti del percorso				

esercizio 5

Tre diversi prodotti granulari, stoccati in appositi sili, si devono periodicamente trasportare nello stesso serbatoio di polmonazione che alimenta un processo di lavorazione. Allo scopo si utilizza un sistema di trasporto pneumatico in compressione utilizzando aria atmosferica. Tracciare, utilizzando per quanto possibile le norme UNICHIM, lo schema di processo relativo al trasporto dai serbatoi di stoccaggio al serbatoio di polmonazione.