



# 9 Calcolo delle perdite di carico

## 9.1 Canali

Il seguente paragrafo sarà dedicato alla descrizione delle perdite di carico nei canali anche se tutto il manuale è dedicato alle tubazioni per il trasporto di liquidi. Sembra comunque doveroso accennare anche ai canali in questo contesto.

I canali vengono di solito utilizzati per trasportare l'acqua derivata da fiumi e torrenti e possono essere industriali, di approvvigionamento, di scarico...

Se la pendenza e la sezione sono costanti si potrà considerare il moto come uniforme.

### 9.1.1 Calcolo idraulico

Il calcolo idraulico deve sempre considerare la validità dell'equazione di continuità che stabilisce che il rapporto tra velocità e sezione deve mantenersi costante lungo la tubazione, se non si sono variazioni di portata:

$$Q = S \cdot V = S' \cdot V' = S'' \cdot V'' = \text{costante}$$

### 9.1.2 Dati necessari al calcolo del canale

I parametri che vengono utilizzati nel dimensionamento dei canali sono:

- La portata in metri cubi al secondo:  $Q$ ;
- La sezione del canale perpendicolare al senso del moto in metri quadrati:  $S$ ;
- La velocità media dell'acqua del canale in metri al secondo:  $V$ ;
- Il perimetro bagnato in metri:  $P$ ;
- Il raggio idraulico, dato dal rapporto tra la sezione e il perimetro, espresso in metri:

$$R = \frac{S}{P}$$

Per i canali rettangolari, il raggio idraulico è pari all'altezza d'acqua media, mentre per la sezione circolare è pari ad un quarto del diametro della tubazione.

- La pendenza del canale:  $J$

Esistono varie formulazioni per esprimere la velocità in un canale. Ora verranno elencate le più comuni:

1. FORMULA DI CHEZY:  $V = \gamma \sqrt{R \cdot J}$  in cui  $\gamma$  è un coefficiente di rugosità della parete del canale.
2. FORMULA DI BAZIN:

$$V = \frac{87\sqrt{R}}{\sqrt{R} + \gamma} \sqrt{R \cdot J} = C \sqrt{R \cdot J}$$

in cui  $\gamma$  è un coefficiente di rugosità che dipende dalla tipologia delle pareti e i cui valori sono riportati nella tabella 9.1.

Tabella 9.1

	$\gamma$
■ Pareti molto lisce	0,06
■ Pareti lisce	0,16
■ Pareti naturali (terra con sezione regolare o pietra)	0,85
■ Canali in terra in condizioni normali di manutenzione	1,30
■ Canali in terra che offrono grande resistenza al passaggio dell'acqua	1,75

3. FORMULA DI KUTTER:

$$V = \gamma \sqrt{R \cdot J}$$

$$\lambda = \frac{23 + 0,00155 / J + 1 / n}{1 + (23 + 0,00155 / J) \cdot n / \sqrt{R}}$$

Il valore di  $n$  varia tra 0,008 per il PVC e 0,04 per tubazioni con pareti molto irregolari.

Una volta che siano noti i valori di  $\lambda$ ,  $R$  e  $J$  facilmente si può calcolare il valore della portata che tale tubazione può convogliare.

## 9.2 Tubazioni in pressione per dislivello topografico

Queste sono le tubazioni che trasportano acqua secondo il loro dislivello e si trovano sottoposte ad un determinato valore di pressione piezometrica determinato dalla configurazione planimetrica della rete.

Le applicazioni principali sono le tubazioni di adduzione, le reti di distribuzione, le irrigazioni ...

### 9.2.1 Calcolo idraulico

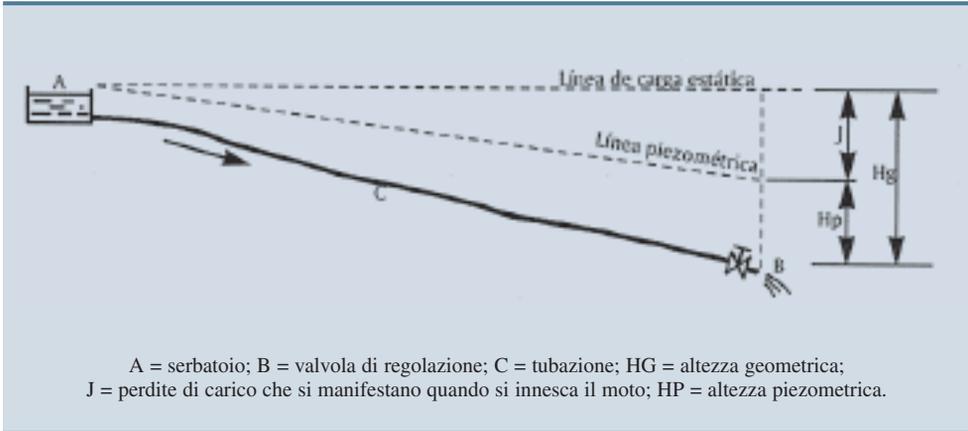
Per effettuare il calcolo idraulico in questi casi si devono trattare alcuni concetti fondamentali:

- La pressione statica piezometrica;
- Le pressioni nella tubazioni;
- Le perdite di carico nelle tubazioni e le formule necessarie al loro calcolo.

9.2.1.1 La pressione statica e piezometrica

Si consideri una tubazione per l'adduzione di acqua in pressione. Quando non c'è moto tale tubazione sarà sottoposta alla pressione statica o totale, invece, nel momento in cui inizia il moto, la pressione sarà quella piezometrica. Se il moto avviene per gravità allora la pressione piezometrica sarà inferiore a quella statica, se invece il moto è forzato si realizza la condizione contraria.

Figura 9.1

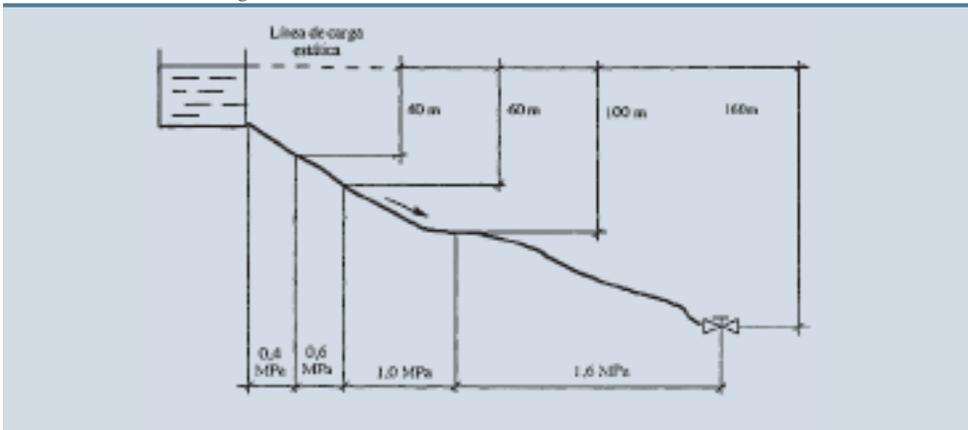


9.2.1.2 Le pressioni nelle tubazioni

Il dimensionamento delle tubazioni in pressione avviene considerando la portata che deve essere trasportata e la pressione a cui è sottoposta la tubazione.

Se si trovano le distanze della tubazioni dalla linea dei carichi statici o totali, questa è pari alla pressione massima che dovrà sopportare e quindi per la quale dovrà essere dimensionata. Il calcolo della pressione massima che la tubazione dovrà sopportare deve considerare anche la presenza del carico veicolare e della particolari condizioni di installazione.

Figura 9.2 - Tubazione a gravità con valvola di chiusura all'estremità.



### 9.2.1.3 Perdite di carico

Si considerano le seguenti ipotesi:

1. i valori dell'attrito dell'acqua con le pareti si devono considerare indipendenti dal valore di pressione;
2. se il diametro della tubazione è costante, per una stessa portata, corrisponde uno stesso valore di velocità;
3. a parità di diametro, le perdite di carico sono influenzate dalla velocità di circolazione dell'acqua e dal valore di rugosità delle pareti interne.

Per una tubazione con apertura totale al termine come in figura, vale la seguente relazione:

$$\frac{H_g}{L} = J$$

in cui  $H_g$  è l'altezza geometrica,  $L$  la lunghezza della condotta e  $J$  la pendenza.

Per le condotte in pressione le perdite di carico si possono calcolare con la formula di Darcy-Weisbach:

$$J = \lambda \frac{V^2}{2gD}$$

In cui  $\lambda$  è il coefficiente adimensionale d'attrito,  $V$  è la velocità media e  $D$  è il diametro della tubazione.

Le perdite di carico hanno valori diversi a seconda del regime che si instaura nella tubazione (laminare o turbolento).

In *regime laminare* i filetti fluidi rimangono sempre paralleli fra di loro e il numero di  $Re < 2000$ .

Poiseuille stabilì la seguente relazione:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

E sostituendo nella formula di Darcy-Weisbach e quindi della definizione di numero di Reynolds, si ottiene:

$$J = \frac{32V^2}{gD Re} = \frac{32V^3}{gD^2}$$

Se invece il *regime è turbolento* il movimento dei filetti non si mantiene sempre parallelo alla direzione della tubazione. Questo è il regime più comune e, per effettuare il calcolo delle perdite di carico, si deve stimare un valore di  $\lambda$ .

In alcune formule si trova il coefficiente di attrito:

$$b = \frac{\lambda}{8g}$$

Le perdite di carico si possono esprimere come:

$$j = b \frac{V^2}{R}$$

in cui  $V$  è la velocità media e  $R$  il raggio idraulico.

Esistono un gran numero di formule per calcolare il coefficiente di attrito e qui di seguito si riportano le principali:

■ FORMULA DI BLASIUS

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

È applicabile a tutti i tubi lisci e per numeri di Reynolds inferiori a  $10^5$  (regime di corrente turbolenta e di transizione).

■ FORMULA DI DARCY

Le perdite di carico  $j$  sono fornite dalla seguente formula:

$$j = \frac{4}{D} \left( \alpha + \frac{\beta}{D} \right) V^2$$

in cui  $\alpha$  e  $\beta$  sono costanti che assumono valori differenti a seconda se le tubazioni sono nuove oppure usate.

Tabella 9.2

	<i>Tubazioni nuove</i>	<i>Tubazioni usate</i>
■ $\alpha$	$2,535 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$
■ $\beta$	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$1,294 \cdot 10^{-5}$

■ FORMULA DI KUTTER

Il coefficiente di attrito è pari a:

$$b = \frac{\left[ \alpha + \sqrt{\frac{D}{4}} \right]^2}{2500D}$$

in cui  $\alpha = 0,25$  per le tubazioni nuove, mentre  $\alpha = 0,35$  per quelle usate.

■ FORMULA DI BAZIN

Il coefficiente di attrito è:

$$b = \left[ \frac{1 + \frac{2\alpha}{\sqrt{D}}}{87} \right]^2$$

in cui  $\alpha = 0,16$  per le tubazioni usate di diametro inferiore a 0,70m, mentre  $\alpha = 0,31$  per quelle di diametro superiore.

■ FORMULA DI HAZEN-WILLIAMS

$$J = \left[ \frac{V}{0,355\alpha D^{0,66}} \right]^{0,54}$$

Per il PVC il valore di cui  $\alpha = 150$ .

### ■ FORMULA DI MANNING-STRICKLER

La velocità nella tubazione è pari a:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} j^{1/2}$$

I valori del coefficiente  $n$  sono riportati nella tabella 9.3.

Tabella 9.3

<i>Material</i>	<i>n</i>
■ PVC, PE	0,006 ÷ 0,008
■ Calcestruzzo liscio	0,011 ÷ 0,013
■ Calcestruzzo grezzo	0,013 ÷ 0,017
■ Acciaio	0,014 ÷ 0,019
■ Terra	0,020 ÷ 0,030

### ■ FORMULA DI COLEBROOK

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{K}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right]$$

Questa formula è stata ricavata empiricamente e si può ritenere valida per le tubazioni lisce e rugose con  $Re > 2000$ .

### ■ FORMULA DI VON KARAMAN

Partendo dalla precedente formula, per i tubi idraulicamente lisci, in cui il valore di  $K$  tende a zero, il primo termine scompare e si ottiene:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right]$$

### ■ FORMULA DI NIKURADSE

Per le tubazioni idraulicamente rugose, dalla formula di Colebrook si può trascurare il secondo termine quando il numero di  $Re$  è molto elevato, ottenendo:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{K}{3,71D} \right]$$

### ■ FORMULA DI PRANDTL-COLEBROOK

Unendo le formule di Colebrook e Darcy, si ottiene la formula di Prandtl-Colebrook:

$$V = -2\sqrt{2gI} \log \left( \frac{K_a}{3,7iD} + \frac{2,51\nu}{D\sqrt{2gD_i}} \right)$$

in cui  $i$  è la perdita di carico,  $k_a$  è la rugosità uniforme equivalente in metri,  $\nu$  è la viscosità cinematica.

### 9.2.2 Dati utili per il dimensionamento della condotta

Per il calcolo dimensionale, cioè per la valutazione del diametro e dello spessore della condotta, si devono conoscere le seguenti quantità:

1. lunghezza totale: si deve conoscere l'intero tracciato della condotta a partire dalla captazione iniziale all'utilizzatore finale;
2. dislivello: la differenza di quota tra il punto iniziale e finale della tubazione;
3. pressione desiderata all'estremo finale: viene stabilita in base alle condizioni di servizio, a seconda dei fini perseguiti;
4. portata circolante: sarà funzione del consumo stimato, tenendo in conto anche la possibilità di funzionamento simultaneo delle utilizzazioni;
5. materiale della tubazione: è necessario conoscerlo per stabilire il valore della tensione circonferenziale di lavoro ( $\sigma$ ) a cui è in grado di essere sottoposto. Sarà quindi utilizzato per stabilire lo spessore della condotta, che è in relazione con la pressione nominale PN;
6. caratteristiche topografiche del terreno: si deve conoscere la disposizione in pianta delle tubazioni.

### 9.2.3 Esempio

Si consideri una tubazione di PVC 160/10 in cui passa una portata di 1,5 l/s.

Il suo diametro interno sarà quindi  $d_i = 160 - 2 \cdot 6,2 = 147,6 \text{ mm} = 0,1476 \text{ m}$ .

La velocità media all'interno della sezione si può calcolare come:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{0,015}{0,0171} = 0,877 \text{ m/s}$$

dato che la sezione interna è:

$$S = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = 0,0171 \text{ m}^2$$

Le perdite di carico si possono stimare con la formula di Manning con  $n = 0,008$ :

$$j^{1/2} = \frac{Vn}{R^{2/3}}$$

Il raggio idraulico R è:

$$R = \frac{d_i}{4} = 36,9 \text{ mm}$$

Da cui la perdita di carico:

$$j = \left( \frac{0,877 \cdot 0,008}{0,0369^{2/3}} \right)^2 = 0,0043$$

## 9.3 Moto in pressione per la presenza di una pompa idraulica

Quando è necessario sollevare l'acqua ad una quota superiore a quella di prelievo, si deve utilizzare una pompa, che fornisce una determinata pressione al fluido. Generalmente, per la progettazione si deve conoscere la portata che deve circolare in

modo da stabilire la soluzione economicamente migliore per la sua installazione. Si devono inoltre calcolare il diametro della condotta, la velocità dell'acqua, le perdite di carico, la pressione desiderata nel punto di utilizzazione, la potenza del motore della pompa.

Se si sceglie per la condotta di adduzione un diametro troppo piccolo, che avrà un basso costo, si presenteranno elevate perdite di carico e quindi sarà necessario aumentare la potenza della pompa per fare in modo che la pressione all'utilizzatore sia costante. Viceversa, con una tubazione di maggior diametro si utilizzerà una pompa che consumerà minore energia, ma si avranno costi più elevati per la tubazione. Si tratta quindi di risolvere un problema di minimizzazione dei costi totali, dati dalla somma del costo dell'energia e del costo della tubazione.

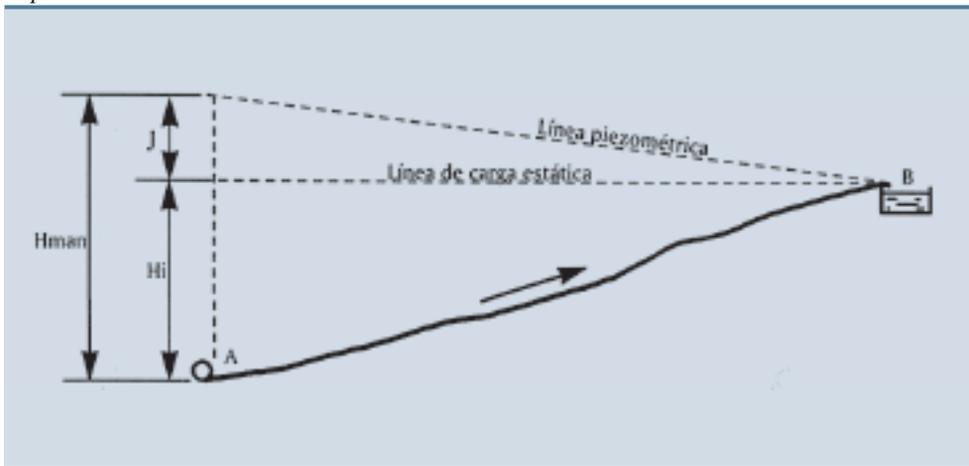
### 9.3.1 Calcolo idraulico

Nel paragrafo 9.2.1 sono già stati presentati i concetti fondamentali per effettuare il calcolo idraulico. Ora verranno applicati a questa condizione di moto.

#### 9.3.1.1 Pressione statica e piezometrica

La pressione piezometrica sarà superiore alla statica quando il moto avviene sotto l'impulso di una pompa.

Figura 9.3 -  $H_{man}$  è la prevalenza della pompa;  $H_i$  è il carico in condizioni statiche;  $J$  sono le perdite di carico.



#### 9.3.1.2 Le pressioni nelle tubazioni

Le tubazioni saranno dimensionate in base alla pressione e alla portata circolante.

Per determinare le diverse pressioni delle tubazioni, si tracciano le parallele alla linea piezometrica corrispondenti a livelli di pressione di lavoro. Si possono così trovare le diverse parti in cui suddividere la condotta.

#### 9.3.1.3 Perdite di carico

Le formule di calcolo delle perdite di carico sono le stesse presentate nel paragrafo 9.2.1.3 in quanto il moto avviene anche in questo caso in pressione.

### 9.3.2 Dati utili per il dimensionamento della condotta

Si deve conoscere la portata da sollevare in base al consumo previsto, l'altezza di aspirazione relativamente alla minima altezza d'acqua da prelevare, la massima altezza a cui la pompa deve poter fornire acqua, la pressione desiderata al punto di utilizzo, la lunghezza totale della condotta, sia in aspirazione che in pressione, il numero di valvole di ritenzione e di tutti gli elementi che possono causare perdite di carico sulla rete, le caratteristiche topografiche del terreno di posa della condotta.

Per determinare le caratteristiche della pompa, dati:

- $Q$  = portata da sollevare;
- $H_p$  = profondità del pozzo o altezza di aspirazione;
- $H_g$  = quota geometrica di bocca pozzo;
- $V$  = velocità media dell'acqua;
- $J_p$  = perdite di carico nella tubazione verticale del pozzo;
- $J$  = perdite di carico nella condotta di adduzione;
- $J_a$  = perdite di carico addizionali;
- $\gamma$  = densità dell'acqua;
- $\eta_p$  = rendimento della pompa (circa 60%);
- $\eta_m$  = rendimento del motore della pompa (circa il 90%);

L'altezza totale di sollevamento della pompa sarà quindi determinabile come:

$$H = H_p + H_g + \frac{V^2}{2g} + J_p + J + J_a$$

E la potenza assorbita dalla pompa sarà:

$$P = \frac{\gamma Q H}{75 \eta_p} \text{ in CV}$$

La potenza del motore si ottiene considerando anche il suo rendimento:

$$P_m = \frac{P}{\eta_m} \text{ in CV}$$

Per ottenere i kW si deve moltiplicare il risultato per 0,736.

Ad esempio, si consideri di voler sollevare acqua da un pozzo a 50 m di profondità per riempire un serbatoio di 1500m<sup>3</sup>, situato all'altezza di 80 m. La pompa lavora per 16 ore al giorno e la lunghezza della tubazione di adduzione è di 200m.

La portata da sollevare sarà:

$$Q = \frac{1500 \cdot 1000}{16 \cdot 3600} = 26,04 \text{ l/s}$$

Se si desidera avere una velocità di 1,3 m/s, con una tubazione di 160 mm, le perdite di carico si possono stimare in 0,80 m/100m. Le perdite di carico accidentali lungo la condotta sono considerate equivalenti a 10 m di tubazione rettilinea di diametro 160mm. Da cui si ottiene:

$$J = \frac{0,80(200 + 10)}{100} = 1,68 \text{ m}$$

Se si desidera avere una velocità di 1,3 m/s, con una tubazione di 160 mm, le perdite l'altezza totale H:

$$H = 50 + 80 + \frac{1,3^2}{2 \cdot 9,81} + 0,75 + 1,68 + 10 = 142,6 \text{ m}$$

Mentre le potenze assorbite:

$$P = \frac{1 \cdot 26,04 \cdot 142,61}{75 \cdot 0,6} = 82,5 \text{ CV}$$

$$P_m = \frac{82,52 \cdot 100}{90} = 91,7 \text{ CV} = 67,5 \text{ kW}$$

La scelta del motore della pompa si fa considerando il 20% di potenza in più per i possibili sovraccarichi. In questo caso si potrebbe scegliere un motore da 80 kW.

#### *Tubazione di aspirazione*

L'aspirazione teorica massima di una pompa è di 10,33 metri di colonna d'acqua equivalente alla pressione atmosferica. Questo è però un valore teorico in quanto si devono considerare anche le perdite di carico nella tubazione di aspirazione e nella valvola di fondo. Come valore cautelativo si può considerare 6,5 metri. Altre cause che possono influire sull'altezza di aspirazione sono l'altezza sul livello del mare dell'aspirazione e la temperatura dell'acqua.