

10 Pressioni nelle condotte

10.1 Sovrappressioni accidentali

Le sovrappressioni accidentali si possono verificare a causa delle variazioni del moto dell'acqua nella tubazione. In questo caso si dirà che il moto non avviene più in regime permanente, ma che il moto è vario.

Il moto è permanente se ogni punto della condotta è caratterizzato dalle caratteristiche idrauliche, stabilite in base alla portata e alla sezione, che si mantengono costanti nel tempo. Se invece il moto è vario la velocità in ogni punto non soddisfa più la condizione di costanza nel tempo.

10.1.1 Pressioni variabili e velocità dell'onda d'urto

La situazione di moto permanente si verifica nella condotta solo dopo un certo tempo da quando si pone in servizio la rete cioè quando si stabilisce la velocità di regime. Questa velocità è correlata direttamente con la curva caratteristica della tubazione che mette in relazione la portata con il carico a cui è sottoposta. Il punto di intersezione della curva caratteristica della tubazione e quella dello strumento che fa avvenire il moto (pompa o valvola) permette di individuare il punto di funzionamento.

Se si considera la condizione in cui si ha la circolazione di una data portata e in un dato momento si verifica la variazione di qualche elemento nella rete, allora si avrà anche una modifica della sua curva caratteristica, variando anche il punto di intersezione con la curva caratteristica della condotta. Quando l'onda di pressione, che si genera nella rete affinché si verifichi l'adeguamento, incontra delle condizioni che sono incompatibili con quelle che si dovrebbero stabilire, allora si genera una nuova onda di pressione in senso contrario. Questa è la condizione che si verifica, ad esempio, nel momento in cui si chiude una valvola a valle di una condotta funzionante a gravità. L'onda di pressione che si genera si propaga fino al serbatoio dove la condizione di pressione è incompatibile con le condizioni fisiche di pelo libero. Da ciò si propaga un'altra perturbazione che a sua volta raggiungerà la valvola e troverà condizioni incompatibili, da cui una nuova perturbazione avrà origine e così via in successione.

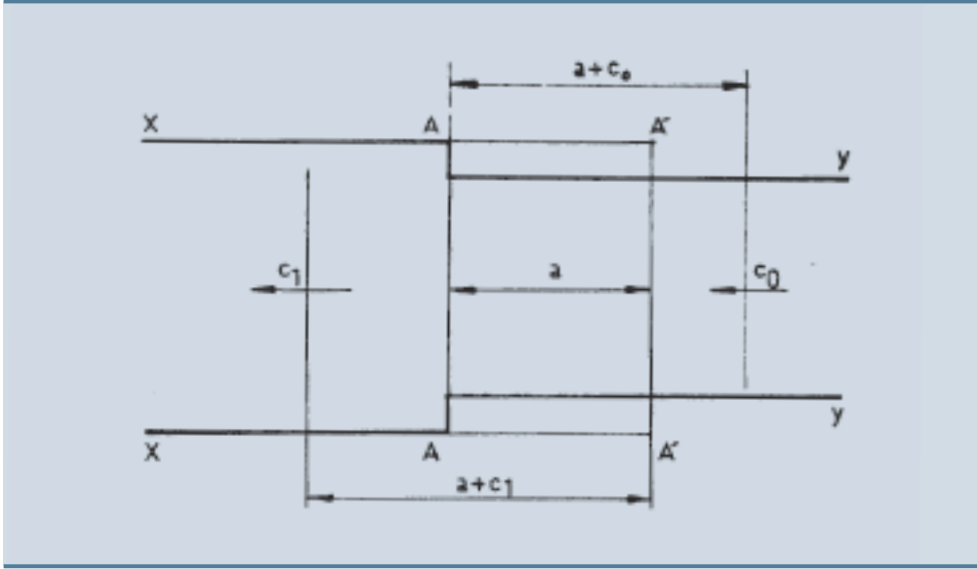
La soluzione di questo problema deve in realtà tenere in conto la dinamica dei mezzi elastici.

In regime variabile, nel caso in cui l'onda di pressione si propaga nel verso contrario alla portata. Se si ha una variazione di velocità da c_0 a c_1 , allora si verificherà anche una variazione di pressione che passerà da h_0 a $h_0 + F$ che provocherà la dilatazione del

tubo che si sposta con la celerità dell'onda a . Si può ricavare matematicamente che la sovrappressione F è pari a:

$$F = \frac{a}{g}(c_0 - c_1)$$

Figura 10.1



Nel caso in cui l'onda di pressione si sposta nel verso della portata.

In questo caso la sovrappressione sarà:

$$F = \frac{a}{g}(c_1 - c_0)$$

Queste formulazioni possono essere considerate valide nel caso di chiusura istantanea di una valvola a valle di una condotta a gravità.

10.1.2 Calcolo della celerità della perturbazione

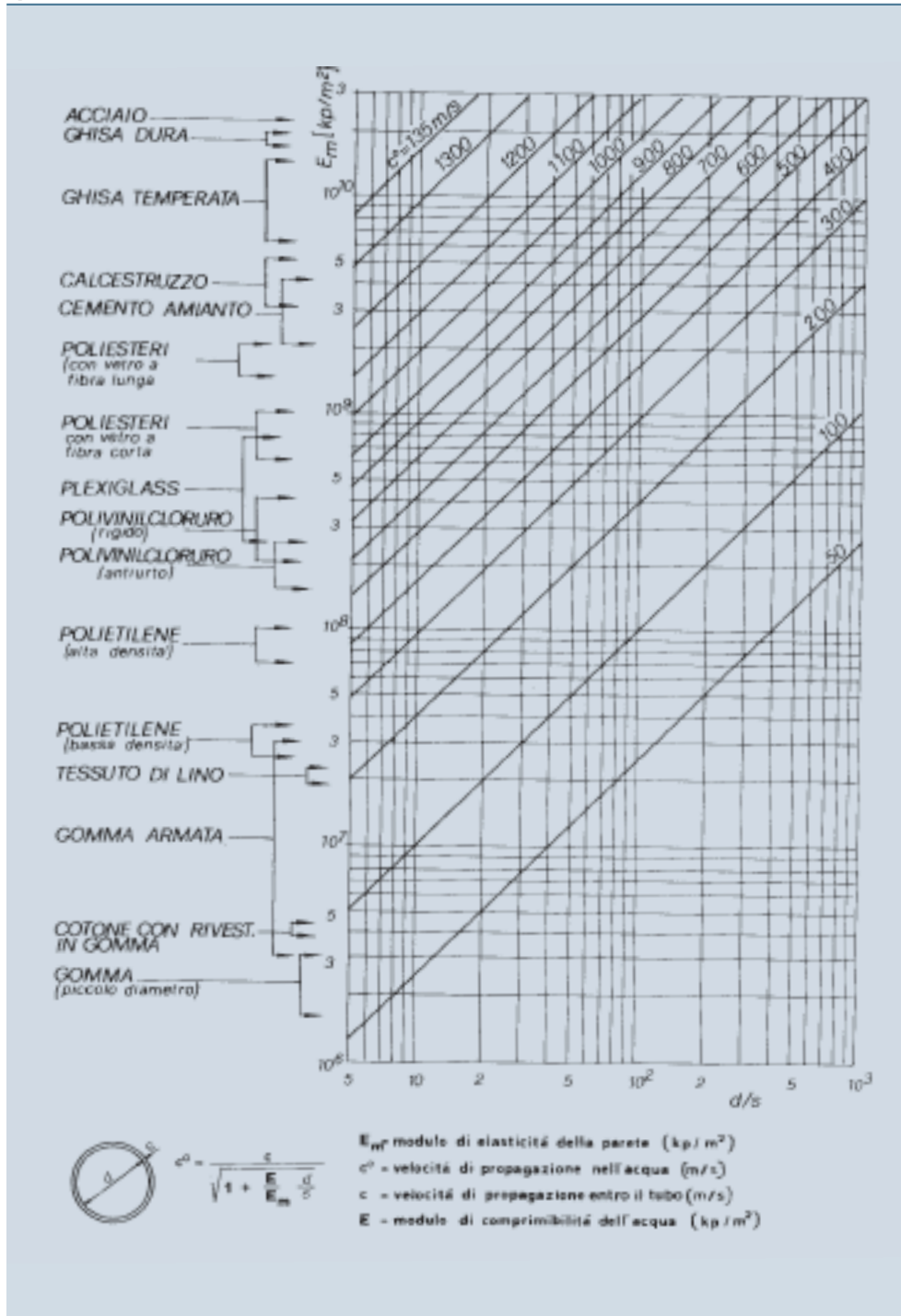
Si supponga che un liquido circoli con una velocità c_0 in regime permanente e che in un momento stabilito si produca una perturbazione che faccia variare la velocità in c_1 . Se $c_1 < c_0$ allora aumenterà la pressione e pertanto si avrà una dilatazione del raggio del tubo.

Questa variazione si trasmetterà con una velocità a . Quest'ultima si può ricavare in seguito a considerazioni analitiche, ottenendo:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma} \frac{1}{\left(\frac{D}{E_m \cdot e} + \frac{1}{E_a}\right)}}$$

in cui E_m è il modulo elastico del materiale, E_a è quello dell'acqua ($2,1 \cdot 10^8 \text{ kg/m}^2$) e γ è il peso specifico dell'acqua.

Figura 10.2



10.1.3 Colpo d'ariete

Questo fenomeno è stato molto studiato perché è presente in tutte le condotte in pressione in cui il regime non sia costante nel tempo. È il nome attribuito ad un fenomeno secondo il quale le variazioni di funzionamento di un apparecchio nella rete, producono variazioni di portata e pressione che si propagano all'interno della condotta con una velocità che dipendono soltanto dalla compressibilità del liquido e dalla rigidità della tubazione.

La prima soluzione analitica del problema è quella di Michaud del 1878 che intuì il suo carattere oscillatorio. Lo studio avviene nel caso particolare di condotta a gravità in cui si trova una valvola. Il valore della sovrappressione, nel caso che la chiusura della valvola avvenga in tempi maggiori al tempo di fase (tempo in cui la perturbazione raggiunge il serbatoio e ritorna alla valvola), è:

$$\Delta H = \frac{2Lv}{gT}$$

in cui L la lunghezza della condotta, T è il tempo di chiusura della valvola in secondi e v è la velocità iniziale dell'acqua.

Nel 1890 Joukowski completò il lavoro di Michaud, arrivando all'espressione:

$$\Delta H = \frac{av}{g}$$

La formula sopra scritta si riferisce ad una chiusura istantanea della valvola ed è valida per un tempo di chiusura $T < 2L/a$ che è il tempo che impiega un'onda per percorrere in andata e ritorno la tubazione. Per $T = 2L/a$ la formula di Michaud coincide con quella di Joukowski. La prima rimane valida per tempi di chiusura $T > 2L/a$.

Nelle tubazioni in PVC il rapporto D/e è costante, perciò il valore di celerità è costante per un certo valore di pressione.

Tabella 10.1

<i>Pressione nominale</i>	<i>Celerità a per tubazioni in PVC</i>
■ 4 atm	240 m/s
■ 6 atm	295 m/s
■ 10 atm	380 m/s
■ 16 atm	475 m/s
■ 20 atm	530 m/s
■ 25 atm	595 m/s

Nel 1903 l'ingegner Allievi studiò il fenomeno del colpo d'ariete considerando l'ipotesi reale di chiusura lineare della valvola, cioè considerando che la chiusura della valvola varia linearmente la sezione di passaggio.

La velocità di propagazione della perturbazione, secondo Allievi, è ricavabile dalla formula:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{w}{g} \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{E} \frac{D}{e} \right)$$

in cui: w è il peso specifico del liquido in kg/m^3 , ε è il modulo di elasticità dell'acqua, E è il modulo di elasticità del materiale (per il PVC a 20°C $E=3 \cdot 10^8 \text{ kg/m}^2$), D è il diametro del tubo in mm, e è lo spessore del tubo. Sostituendo all'interno della sopra citata formula i valori relativi all'acqua si ottiene:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}}$$

Il valore di k dipende dal modulo di elasticità del tubo e per il PVC rigido è pari a 33,33.

Allievi dimostra che il fenomeno del colpo d'ariete si può studiare una volta conosciuti due parametri che rappresentano le caratteristiche della tubazione e quelle della valvola.

Per una manovra lenta cioè per $T > 2L/a$ si ritiene valida la formula di Michaud:

$$\Delta H = \pm \frac{2Lv}{gT}$$

mentre per $T < 2L/a$, allora vale la formula di Allievi:

$$\Delta H = \pm \frac{av}{g}$$

10.1.3.1 Formula di Mendiluce

Nelle condotte in cui è presente una pompa, esiste una formula per calcolare il tempo T intercorrente tra l'interruzione di funzionamento della pompa e l'annullamento della velocità di circolazione dell'acqua:

$$T = C + \frac{MLv}{gH_p}$$

in cui C è un coefficiente funzione della relazione tra prevalenza della pompa e lunghezza L della condotta, M è un coefficiente funzione di L , v è la velocità dell'acqua, H_p è la prevalenza.

Tabella 10.2

■ H_p/L %	10	20	25	30	35	40
■ C	1	1	0,8	0,5	0,4	0
■ L	250	500	1000	1500	2000	
■ M	2	1,75	1,5	1,25	1,15	

Per $L < aT/2$, sarà valida la formula di Michaud:

$$\Delta H = \pm \frac{2Lv}{gT}$$

mentre per $L > aT/2$, vale la formula di Allievi:

$$\Delta H = \pm \frac{av}{g}$$

Quando si verifica quest'ultima condizione, in realtà si devono utilizzare tutte e due le formule perché esisterà un punto per cui è soddisfatta l'uguaglianza $L = aT/2$ e da quel punto in poi sarà valida l'equazione di Michaud.

10.1.4 Introduzione al metodo di Bergeron

Questo è un metodo grafico che permette di risolvere anche i problemi più complessi di colpo d'ariete. Si possono calcolare in tutti i punti della tubazione la portate e le pressioni in ogni istante. Bergeron ha dimostrato la relazione tra portate e pressioni:

$$\Delta H = \pm \frac{a}{gS} \Delta Q$$

in cui S è la sezione utile della condotta.

Il metodo di Bergeron, che ora non verrà approfondito, si applica ipotizzando la presenza di un osservatore interno alla condotta che si muove con la velocità della celerità della perturbazione.

Alcune considerazioni importanti si possono fare per quanto riguarda la cavitazione, essendo questa una condizione che non si vuole si realizzi nella condotta.

Se ci si trova nel caso in cui:

$$\frac{av}{g} < H_g + J + P_a$$

Dove H_g è la pressione statica o la quota statica, J è la perdita di carico totale, P_a è la pressione atmosferica.

In questo caso non si verifica la cavitazione e la sovrappressione massima è quella calcolabile con la formula di Allievi.

Se invece:

$$\frac{av}{g} > H_g + J + P_a$$

In questo caso si verifica la cavitazione e la sovrappressione è:

$$\Delta H_{max} = Y \frac{av}{g}$$

Y è un fattore compreso tra 1 e 3 e dipende dalla sua relazione con un altro parametro X. Si considerano valide le seguenti relazioni:

$$Y = \frac{X + 2}{X}$$

$$X = \frac{\frac{av}{g}}{H_g + J + P_a}$$

10.1.5 Altri metodi di calcolo

Oltre ai metodi di calcolo precedentemente citati, ne esistono degli altri più complessi matematicamente come il metodo delle caratteristiche e degli elementi finiti. Esistono programmi commerciali che permettono di eseguire le verifiche per mezzo di questi metodi.

10.2 L'aria nelle tubazioni

Una valutazione importante che deve essere fatta nel dimensionamento delle tubazioni è il calcolo dell'aria che queste ultime possono contenere. L'aria può essere introdotta quando si riempie la tubazione, quando si avvia una pompa oppure quando si vuota la tubazione.

L'aria, essendo un elemento di basso peso molecolare, si posiziona sempre nelle parti alte delle condotte. Qui si può accumulare e far diminuire considerevolmente la sezione di passaggio dell'acqua e quindi la portata.

Inoltre quest'aria può raggiungere anche pressioni elevate e portare alla rottura del tubo. La pressione finale raggiunta dall'aria dipende dal diametro del tubo, dalla velocità di circolazione dell'acqua, dal volume di aria accumulato e dalla situazione della massa d'aria.

Per valutare l'entità di tale sovrappressione, si utilizza la formula di Boyle Mariotte.

Si consideri un volume di 100 litri, in una tubazione di 250mm di diametro e a 1000 m di lunghezza, supponendo che la pressione ad un estremo della condotta sia di 2 atm. Si ipotizzi inoltre che la velocità dell'acqua sia di 1,5 m/s.

La massa d'acqua sarà:

$$\frac{P}{g} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} L \gamma}{g} = 5001 \text{ kg}$$

E quindi l'energia cinetica associata:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = 5626 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Questa energia cinetica si trasforma in lavoro di compressione dell'aria che si trova nella tubazione secondo la legge di Boyle Maiotte:

$$PV = P'V'$$

Si possono quindi uguagliare le espressioni del lavoro fornito e assorbito:

$$\frac{1}{2} m v^2 = P V \ln \frac{P'}{P}$$

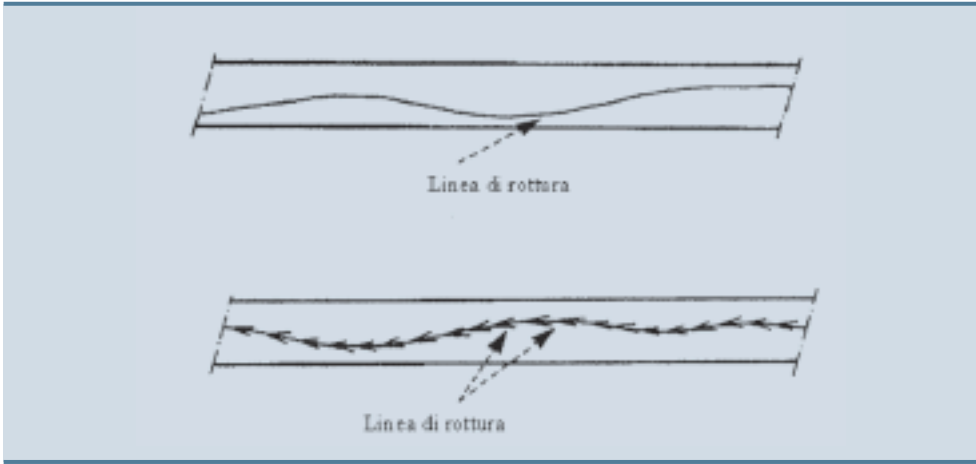
Da cui si ottiene:

$$P' = 33,3 \text{ atm}$$

Questa pressione facilmente produrrà la rottura della tubazione.

Se la tubazione non è interrata essa esploderà, altrimenti si verificherà una rottura del tipo rappresentato in figura.

Figura 10.3



Per evitare tali inconvenienti, si dovrà cercare di eliminare la totalità dell'aria al suo interno e utilizzare i mezzi necessari affinché, una volta eliminata l'aria, questa non possa penetrare nuovamente. Si dovranno quindi collocare delle valvole di sfiato nelle parti alte delle condotte in modo da evitare la presenza di aria.