



Corso di Formazione
Pompaggio nei sistemi di fognatura
Rimini, 5 novembre 2015

Il colpo d'ariete nelle condotte prementi per il trasposto di acque di fognatura

Carlo Ciaponi

Università degli Studi di Pavia

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura

Questa presentazione è stata preparata al solo scopo di supportare, attraverso la sua proiezione, la lezione tenuta nell'ambito del Corso di Aggiornamento e non può essere diffusa, riprodotta (nemmeno in parte) o pubblicata senza l'autorizzazione dell'autore

Colpo d'ariete

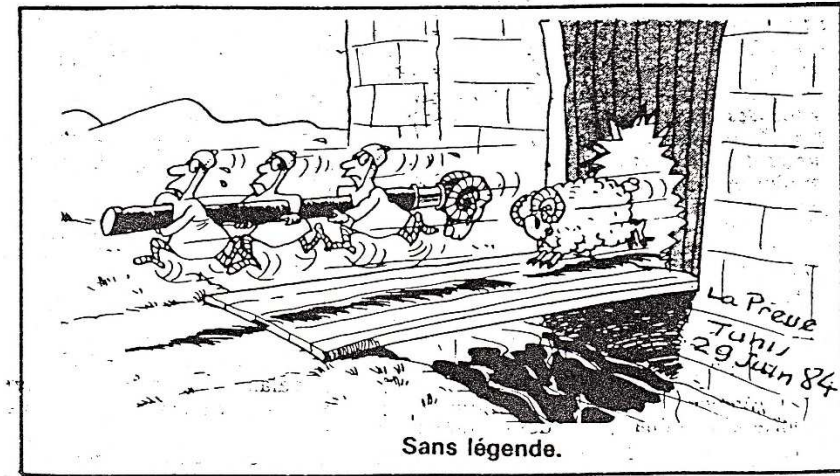
CHE COSA E' ?

Fenomeno idraulico di tipo propagatorio (lungo la condotta), caratterizzato da una variazione rapida lungo la condotta e nel tempo delle grandezze idrauliche (in particolare: Q, V, p)

CAUSA:

Variazione della portata (a partire da una situazione di quiete o di moto stazionario) determinata da:

- Chiusura o apertura di un organo di intercettazione
- Avviamento o arresto di una pompa



EFFETTI:

Insorgenza di sovrappressioni Δp (positive o negative), anche molto grandi, indotte dalla variazione della quantità di moto

ESIGENZA INGEGNERISTICA:

Valutazione delle sovrappressioni Δp per verificarne la compatibilità con la resistenza delle tubazioni e dei relativi accessori



Rottura in seguito ad un transitorio di pressione (superaqueduct of Puerto Rico)



Giunti di espansione deformati da un colpo d'ariete

Colpo d'ariete negli impianti di pompaggio

TRANSITORI IDRAULICI negli impianti di pompaggio associati a fenomeni di colpo d'ariete :

- a) Avviamento delle pompe ($V: 0 \rightarrow V_0$)
- b) Arresto delle pompe ($V: V_0 \rightarrow 0$)

MODALITA' DI INNESCO DEL TRANSITORIO IDRAULICO:

A) Impianto con pompa singola

- **Avvio comandato da quadro** (con circuito per aumento graduale della coppia) →
- **Arresto comandato da quadro** →
- **Arresto incontrollato** (black-out o guasto) →



Transitorio graduale

Transitorio rapido

Transitorio rapido

B) Impianto con gruppo formato da più pompe in parallelo

- **Avvio sequenziale comandato da quadro** (con o senza circuito per controllo coppia) →
- **Arresto sequenziale comandato da quadro** →
- **Arresto incontrollato** (black-out o guasto): tutti i motori si arrestano contemporaneamente →

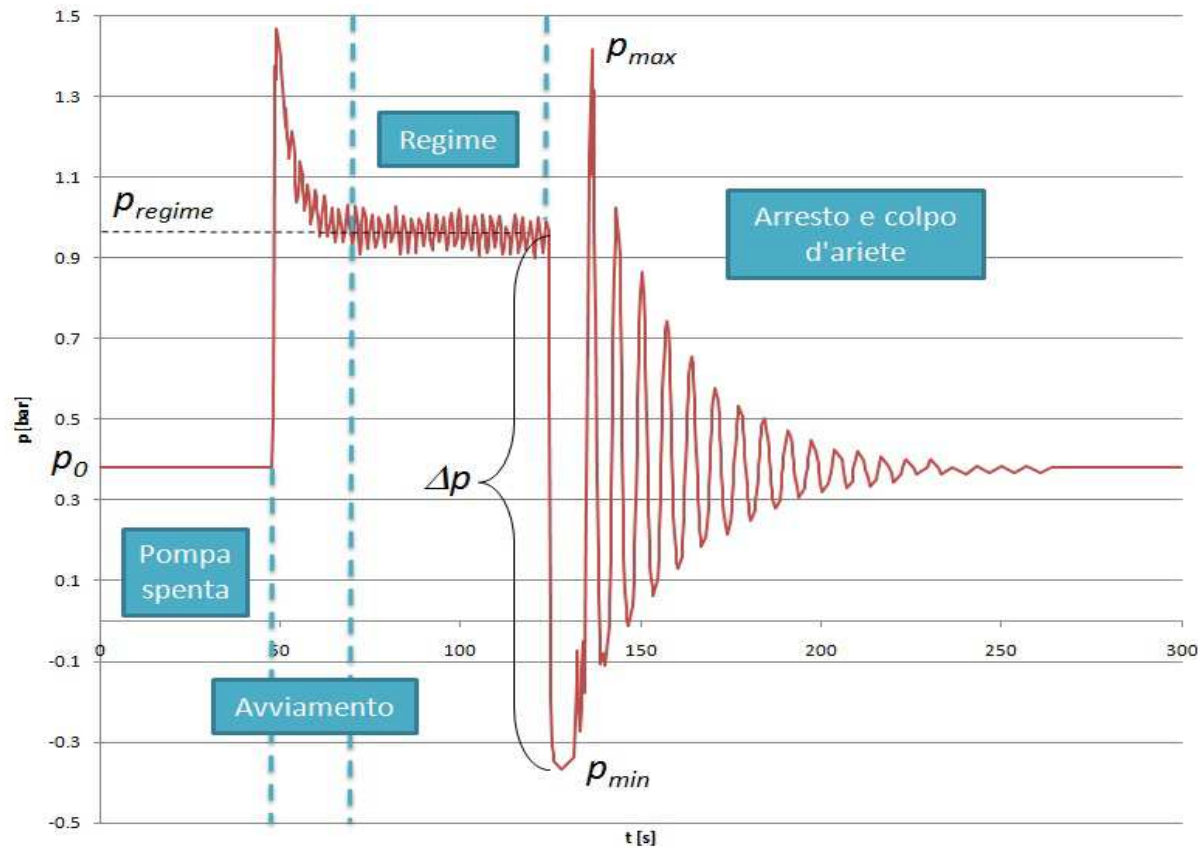
Transitorio graduale

Transitorio graduale

Transitorio rapido

ARRESTO della o delle POMPE = SITUAZIONE PIU' CRITICA da assumere nelle verifiche

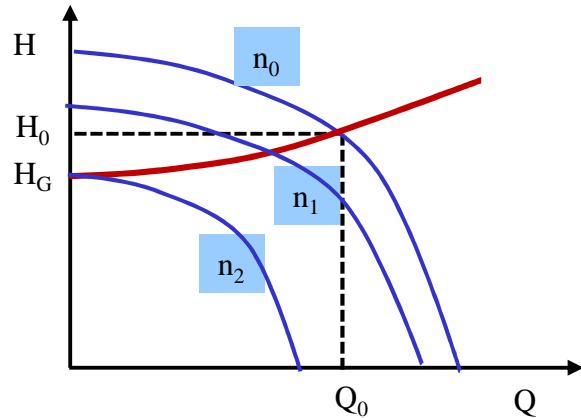
Misure di colpo d'ariete in un impianto di pompaggio per fognatura (L 810 m; D = 150 mm; $\Delta H_G = 7$ m; tubazione in ghisa sferoidale)



p_0	0,38 bar
p_{regime}	0,95 bar
Δp	1,33 bar
p_{min}	-0,38 bar
p_{max}	1,32 bar
Q_{regime}	23 l/s
V_0	1,3 m/s
H_{TOT}	13,3 m
T_C	4 s
periodo	6,75 s
c	480 m/s

Verifica del colpo d'ariete per arresto della pompa

L'arresto della pompa

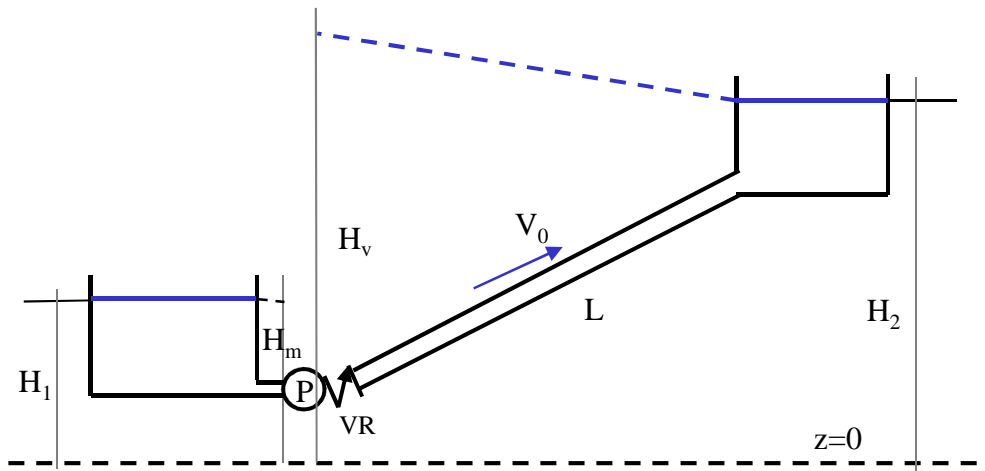


A seguito dell'interruzione dell'alimentazione elettrica, il gruppo motopompa (m.p.) non si arresta istantaneamente, ma diminuisce il numero dei giri in relazione all'inerzia delle masse rotanti.

Al diminuire del numero dei giri n la curva caratteristica della pompa si abbassa e fornisce via via prestazioni (Q, H) minori. Quando la curva scende sotto l'orizzontale passante per H_G , la pompa non è più in grado di vincere la prevalenza geometrica e il flusso si arresta.

La pompa in realtà continua a girare diminuendo progressivamente il numero dei giri, ma esercita sull'acqua solo un'azione di mescolamento. Il flusso può anche arrestarsi, per intervento della valvola di ritegno nella fase di contraccolpo, quando nella sezione iniziale la velocità V assume segno contrario a quello di regime

Verifica dell'impianto di pompaggio



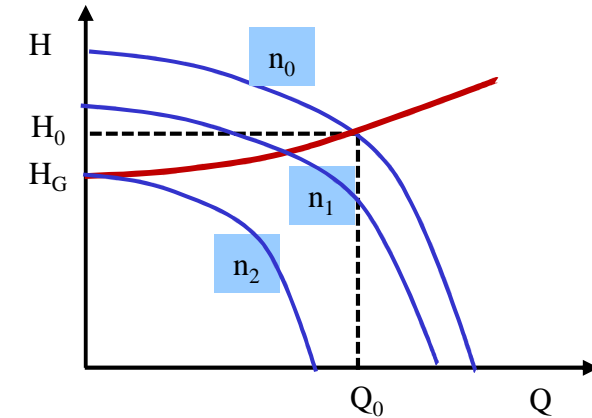
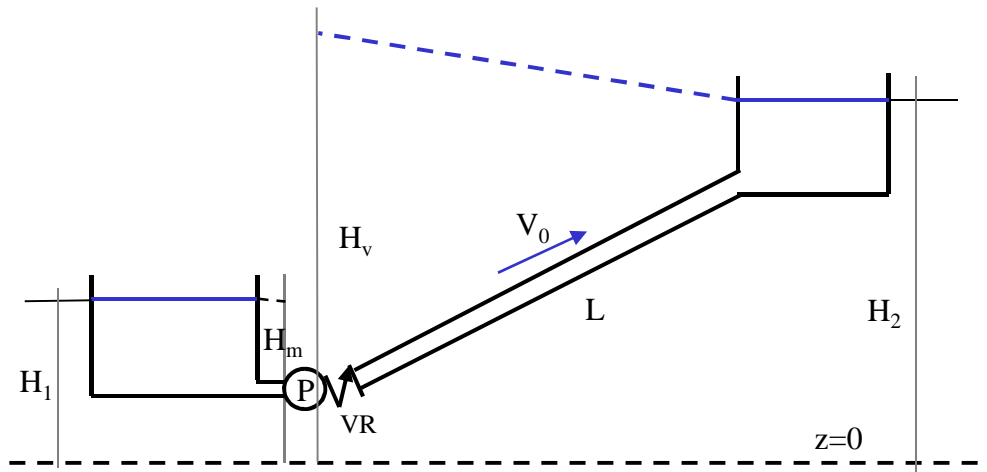
Metodo di calcolo: integrazione equazioni con metodo delle caratteristiche, introducendo come condizione al contorno di monte la modalità di arresto del flusso per effetto della pompa che rallenta e per l'intervento della valvola di ritegno

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + k V |V|^{\alpha-1} = 0 \quad (1) \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2) \end{array} \right.$$

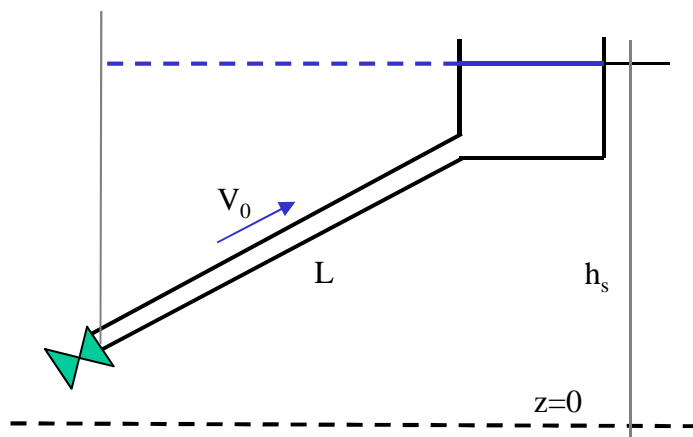
Equazione che mette in relazione l'energia cinetica delle masse rotanti con la potenza ceduta alla corrente

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{I \cdot \omega^2}{2} \right) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \Delta H}{\eta}$$

SCHEMATIZZAZIONE COMPLETA



SCHEMATIZZAZIONE SEMPLIFICATA



CONDIZIONI CONTORNO DI VALLE:

- Serbatoio a livello costante

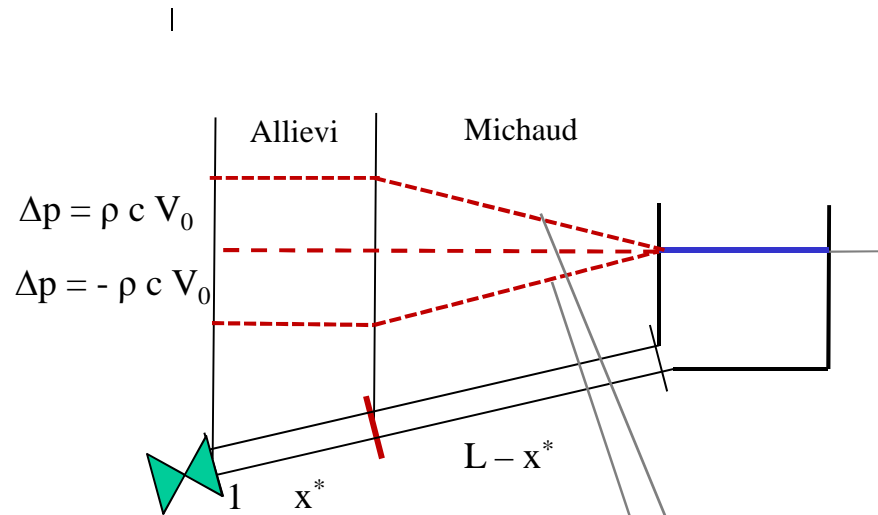
CONDIZIONI CONTORNO DI MONTE:

- **otturatore con chiusura lineare di durata T_c**

CONDIZIONI INIZIALI:

- moto permanente con $V = V_0$
- in tutte le sezioni $h = h_s$ (**$J L = 0$**)
- otturatore aperto

Calcolo speditivo del colpo d'ariete nelle condotte prementi



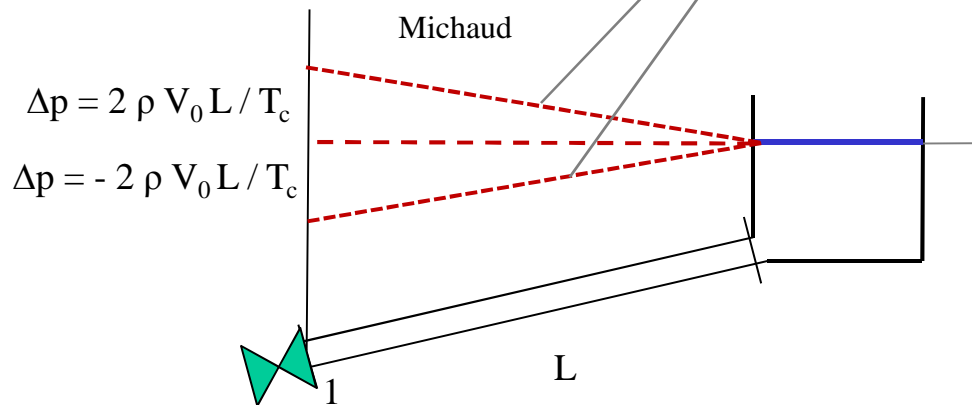
1) Chiusura brusca all'otturatore

$$T_c < \frac{2L}{c}$$

La chiusura è brusca nelle sezioni di ascissa $x < x^*$

$$x^* = \frac{2L - c T_c}{2}$$

Piezometriche di colpo d'ariete



2) Chiusura lenta all'otturatore

$$T_c \geq \frac{2L}{c}$$

La chiusura è lenta in tutte le sezioni

E' necessario stimare la durata T_c di arresto del flusso nella sezione 1

Stima del tempo di arresto T_c

Metodo approssimato di Mendiluce

$$T_c = C + K \frac{V_0 L}{g H_m} \quad [s]$$

H_m = prevalenza manometrica della pompa

C	H_m/L
1,00	0,00÷0,20
0,75	0,21÷0,28
0,50	0,29÷0,32
0,25	0,33÷0,37
0,00	0,38÷0,40 (*)

$$K = 1 \quad \text{per } L \geq 2.000 \text{ m}$$

$$K = 2 - 0,0005 L \quad \text{per } L \leq 2.000 \text{ m}$$

(*) per $H_m/L > 0,4$ è prudente considerare istantaneo l'arresto del flusso, ovvero $T_c = 0$

Metodo approssimato di Abreu, Cabrera, Iglesias e Izquierdo

$$T_c = \frac{\Gamma L V_0}{g H_G} \quad (1)$$

$$X = \frac{\frac{6}{5}\Gamma - 1}{1 - \frac{H_m}{H^*} \left(1 - \frac{1,5}{\Gamma}\right)} \quad (2)$$

$$X = \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \frac{g I \eta_0 N_0^2}{\gamma L V_0 Q_0} \quad (3)$$

Significato dei simboli:

Γ = rapporto fra il tempo di arresto T_c e il tempo di inerzia della colonna rigida
 X = parametro di inerzia = rapporto fra le inerzie della m.p. e della colonna liquida
 H_G = prevalenza geometrica [m]
 H_m = prevalenza manometrica (totale) [m]
 H^* = prevalenza a portata nulla [m]
 L = lunghezza della condotta [m]
 V_0 = velocità a regime [m/s]
 Q_0 = portata a regime [m³/s]
 I = momento di inerzia delle masse rotanti rispetto all'asse di rotazione [kg/m²]
 η_0 = rendimento del gruppo m.p. a regime
 N_0 = velocità rotazionale del gruppo m-p. a regime [giri/minuto]
 γ = peso specifico del liquido [N/m³]
 g = accelerazione di gravità [9,8 m/s²]

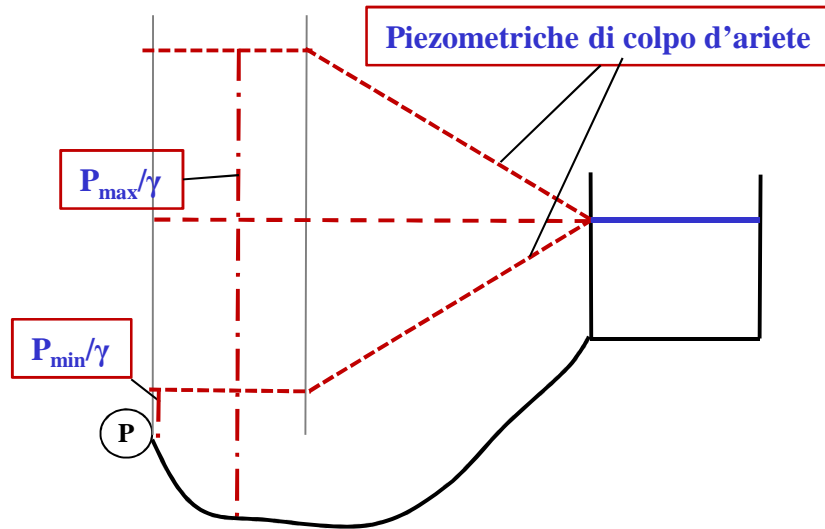
PROCEDURA DI CALCOLO:

- 1) Calcolo di X con la (3)
- 2) Calcolo di Γ risolvendo l'equazione implicita (2)
- 3) Calcolo di T_c con la (1)

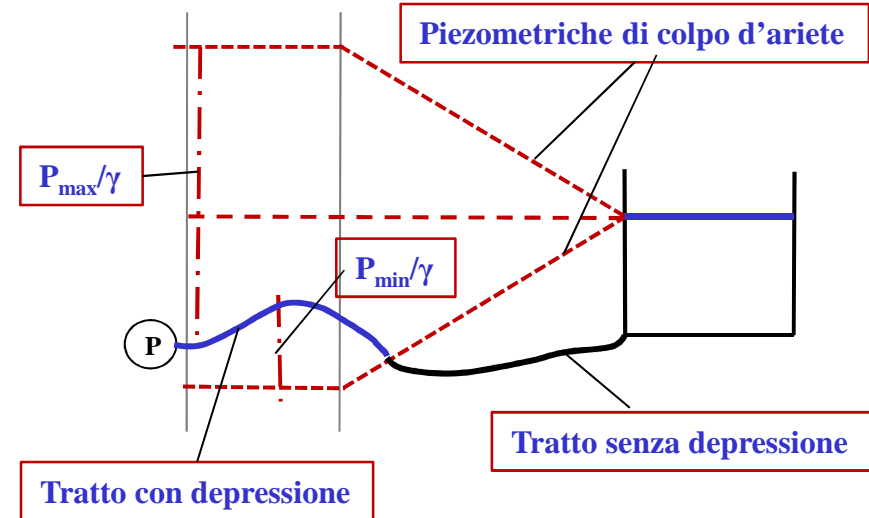
N.B. La procedura di calcolo richiede la conoscenza del momento di inerzia I delle masse rotanti del gruppo moto-pompa

Interpretazione dei risultati del calcolo speditivo

1) Entrambe le piezometriche sovrastano la condotta



2) La condotta interseca la piezometrica



N.B. Limite fisico della depressione:

$$\frac{p^*}{\gamma} = \frac{p}{\gamma} + \frac{p_{atm}^*}{\gamma} \geq \frac{p_v^*}{\gamma} \quad \Rightarrow \quad \frac{p}{\gamma} \geq -\frac{p_{atm}^*}{\gamma} + \frac{p_v^*}{\gamma}$$

Il calcolo può dare un valore di p_{min} che non rispetta la condizione sopra indicata.

In questo caso, i valori numerici di Δp vanno considerati non corretti; **il calcolo va semplicemente assunto come indicatore di una situazione di depressione vicino al limite fisico** (cavitazione vaporosa)

Effetti delle sovrappressioni (\pm) di colpo d'ariete

Δp positivi

Effetto: sollecitazioni di trazione sullo spessore della condotta.

Occorre verificare che con $p_0 + \Delta p$, lo spessore della condotta sia sufficiente a garantire $\sigma < \sigma_{amm}$

Per materiali a comportamento elastico:

$$\sigma_{max} = \frac{p_{max} D}{2 s} \leq \sigma_{amm} \quad (\text{Formula di Mariotte})$$

Δp negativi

Effetto: può creare depressione in condotta se $p - \Delta p < 0$

La depressione determina:

- Rilascio di gas disciolti (tanto più grande quanto più grande è la depressione) **CAVITAZIONE GASSOSA**
- Vaporizzazione dell'acqua quando $p^* \approx p_v^*$ **CAVITAZIONE VAPOROSA**

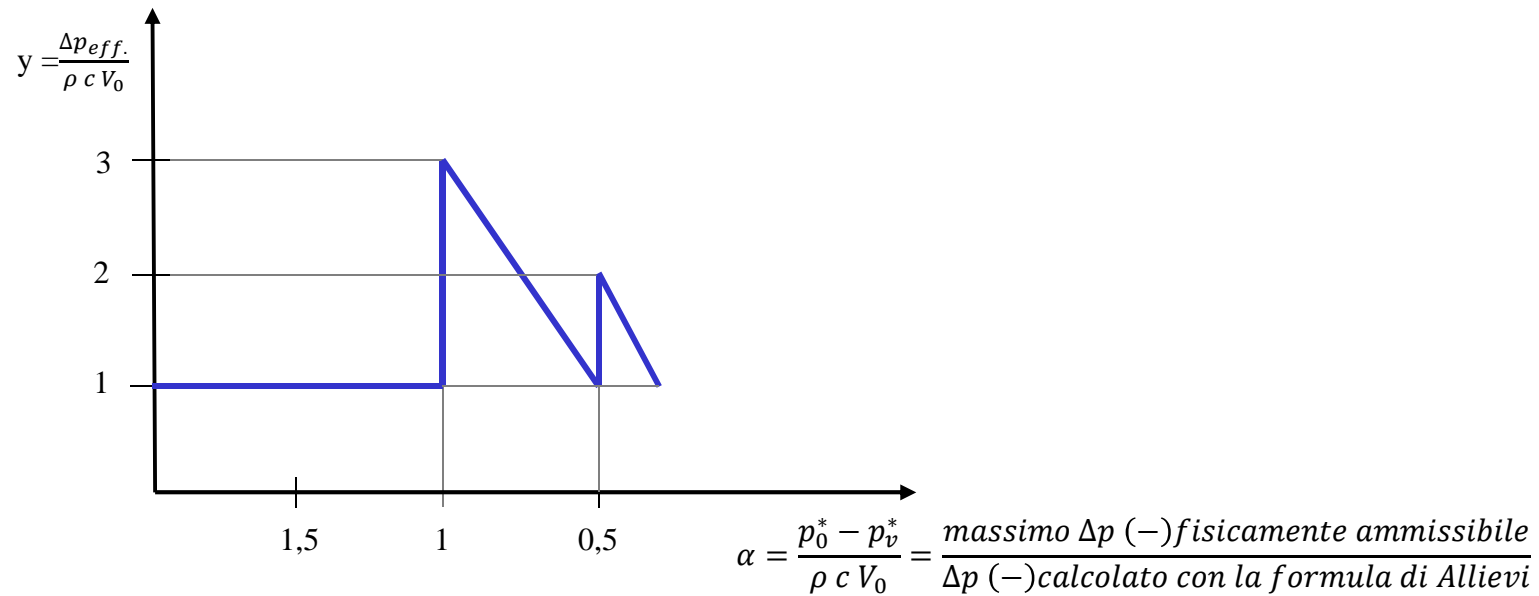
AVVERTENZA IMPORTANTE

In presenza di cavitazione il fenomeno non è più retto dalle classiche equazioni del moto vario e conseguentemente non sono più validi i risultati che si ottengono dalla loro integrazione. In particolare non sono più valide le relazioni (Allievi - Michaud) usate per stimare ΔP

sovrappressioni in condizioni di cavitazione vaporosa

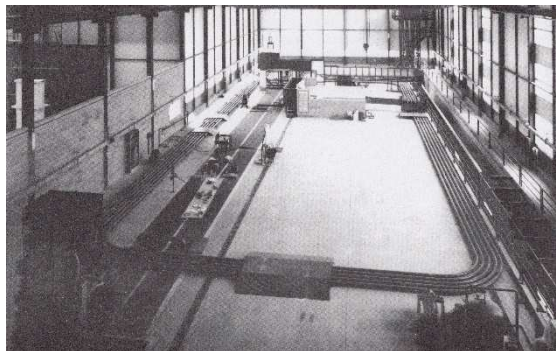
Modello teorico [Siccardi & Raiteri, 1971]

- mezzo elastico senza dissipazioni;
- arresto istantaneo;
- ipotesi di distacco di vena con fronte normale all'asse della tubazione

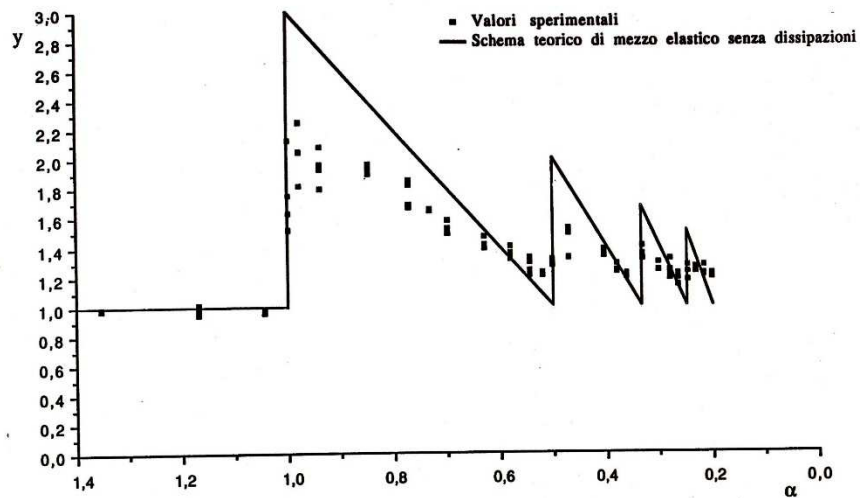
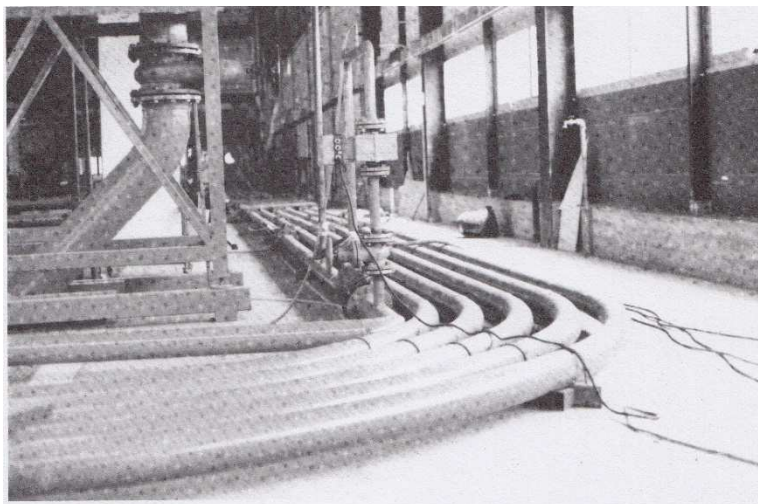
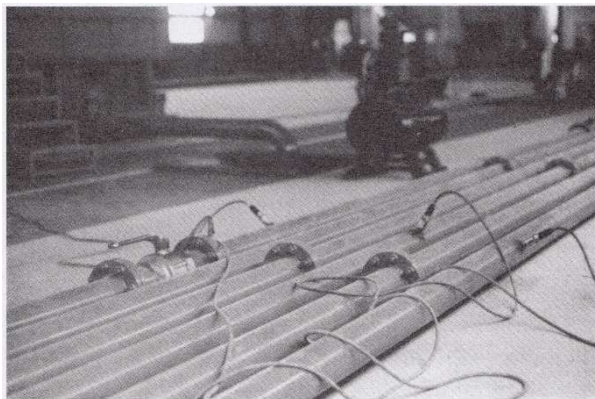


sovrappressioni in condizioni di cavitazione vaporosa

Risultati sperimentali [Ciaponi, Barbero, Papiri, 1989; Barbero e Ciaponi, 1991; Barbero e Ciaponi, 1994]



Condotta: acciaio DN 100 mm; L = 496 m



REGOLA IMPERATIVA: le situazioni di cavitazione in condotta vanno evitate

CONCLUSIONI

- 1) La verifica degli impianti di pompaggio agli effetti del colpo d'ariete deve rientrare nella normale pratica progettuale
- 2) Essa può essere condotta anche con metodi di calcolo piuttosto semplici (metodi speditivi) che consentono di stimare la posizione delle «piezometriche di colpo d'ariete» e quindi le pressioni massime e minime che si instaurano in condotta
- 3) Negli impianti di pompaggio per acque di fognatura, spesso caratterizzati da basse prevalenze geometriche, la sovrappressione negativa di colpo d'ariete può indurre condizioni di cavitazione gassosa e/o vaporosa in condotta (situazione più pericolosa)
- 4) La cavitazione va evitata perché:
 - Lo sviluppo di gas determina irregolarità nel movimento della corrente anche a transitorio terminato
 - La cavitazione vaporosa determina, nella fase di contraccolpo, valori di sovrappressione positiva anche molto più grandi rispetto a quelli calcolabili con la formula di Allievi.
- 5) Nel caso in cui il calcolo evidenzi valori di depressione (cavitazione gassosa o addirittura vaporosa) è necessario attenuare il fenomeno di colpo d'ariete, attraverso opportuni sistemi di protezione.