

ANALISI A MOTO VARIO, MODELLAZIONE NUMERICA E RIPRISTINO DAL DANNEGGIAMENTO DI UNA CONDOTTA IN CALCESTRUZZO A SERVIZIO DI UNA CENTRALE IDROELETTRICA

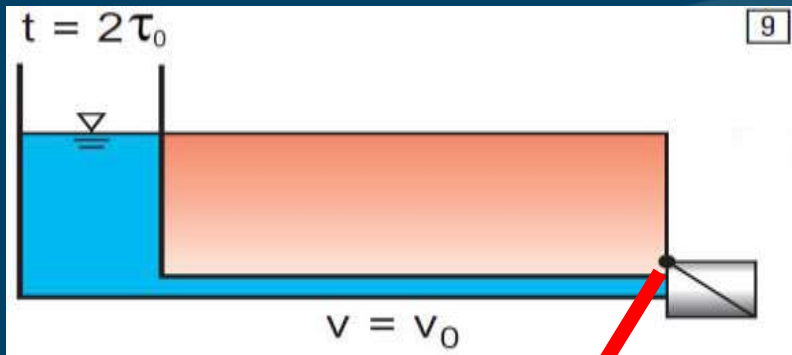
Matteo Nicolini

Torino, 14-15 Ottobre 2015

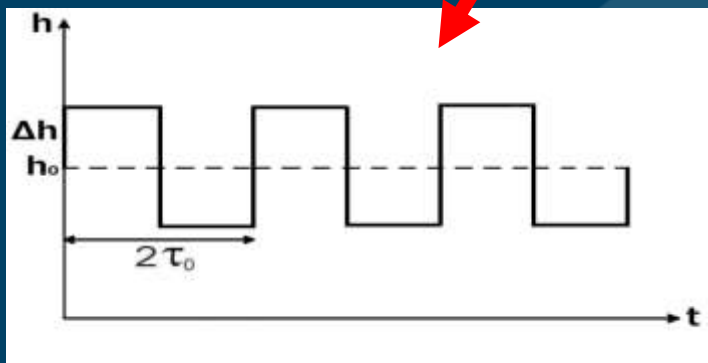


Italian DHI Conference 2015

Il fenomeno del colpo d'ariete



Manovra di chiusura istantanea



Celerità delle onde di pressione

$$a = \frac{\sqrt{\frac{E_b}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_b}{E} \frac{D}{t_w}}}$$

Per condotta infinitamente rigida
 $E \rightarrow \infty$

$$a^* = \sqrt{\frac{E_b}{\rho}} = 1450 \text{ m/s}$$

$$E_b \approx 2.1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

Durata di fase

$$\tau_0 = \frac{2L}{a}$$

Manovra: brusca

lenta

$$T_m < \tau_0$$

$$T_m \geq \tau_0$$

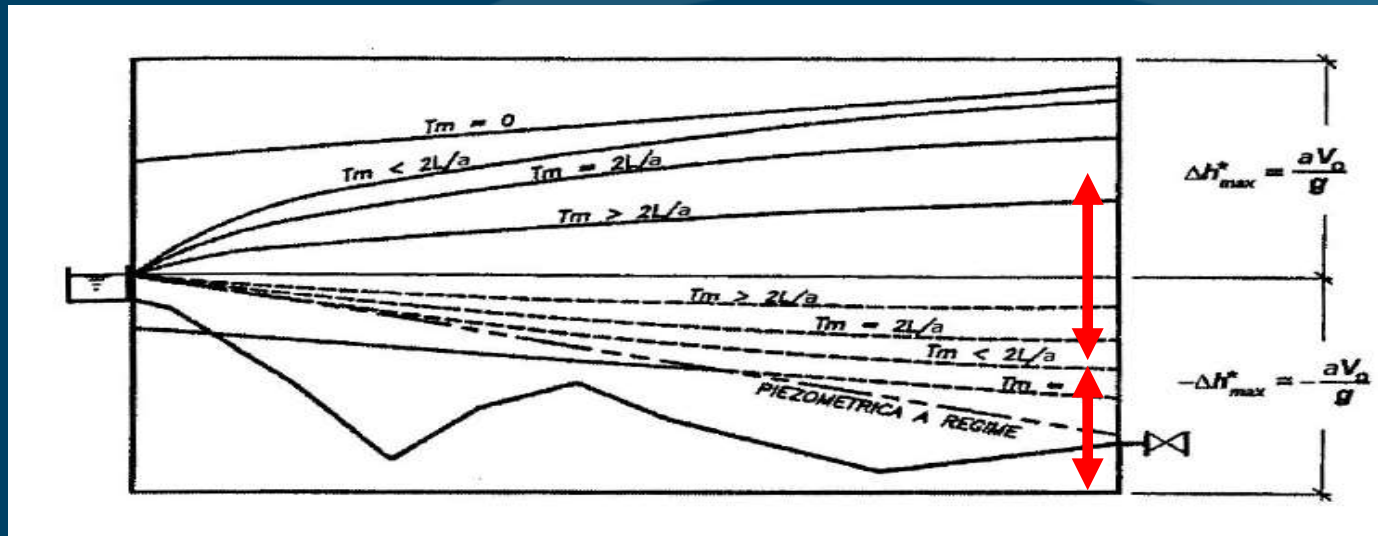
Sovraccarico: manovra brusca (Joukowski)

$$\Delta h = \frac{a}{g} V_0$$

Sovraccarico: manovra lenta (Allievi - Michaud)

$$\Delta h = \frac{2 V_0 L}{g T_m}$$

Applicabilità delle relazioni di letteratura



Hooke)

- *La condotta non è ovunque soggetta allo stesso valore massimo di pressione*
- *Il sovraccarico (rispetto alla piezometrica statica) è sempre inferiore rispetto a quello che si avrebbe se $j=0$*
- *Asimmetria tra i massimi e minimi di pressione*

Obiettivi (1/2): Applicazione di MU Water Hammer a sistemi reali



MIKE URBAN

WATER DISTRIBUTION

Water Hammer Calculation



4 MIKE URBAN WATER HAMMER

Water Hammer (a part of the WD-Tools module) simulates transient (unsteady) flow in any fully pressurized system carrying liquids. MIKE URBAN Water Hammer provides a cost effective tool for engineers seeking fast answers to questions about rapid operation of piping systems. Water Hammer is based on the high-order implicit scheme solving the continuity and momentum equations using the finite difference method. The initial conditions are modeled using MIKE URBAN Steady State Pipe Flow Module.

Water Hammer allows you to model:

- Pump start-up and pump trip-off
- Water hammer protection of pumping stations
- Power failure events

4.1 Water Hammer Calculation

MIKE URBAN Water Hammer computes hydraulic transients in pipe networks. The computations are based on the continuity equation:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

and the equation of motion:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} |Q| Q = 0 \quad (4.2)$$

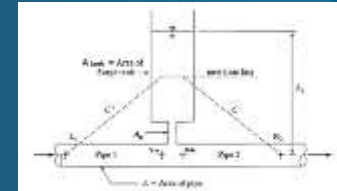
in which Q is the discharge, H - the piezometric head above arbitrary datum, f - the Darcy-Weisbach friction factor, D - the internal pipe diameter, A - the cross-sectional area of the pipe, g - gravitational acceleration, a - wave speed, x - distance along the pipe axis and t - time.

In the governing equation the acceleration terms which are very small compared to the other terms have been disregarded.



Obiettivi (2/2): realizzazione codice di calcolo

- Analisi dei fenomeni di moto vario
- Analisi dei dispositivi di protezione:



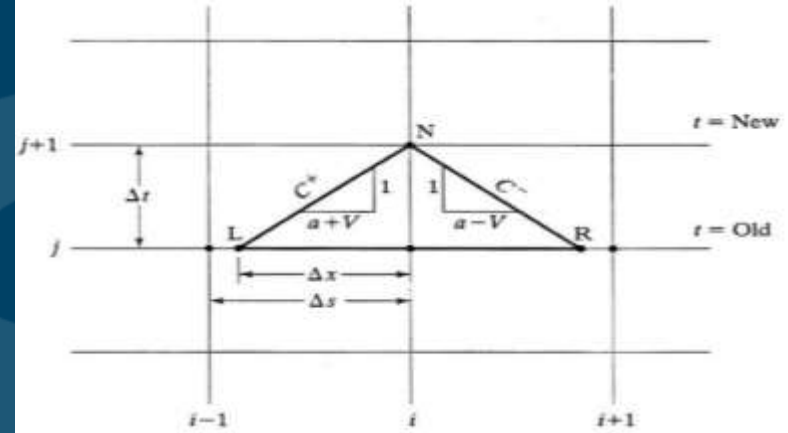
Metodo delle caratteristiche

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dU}{dt} + a \frac{\lambda |U|}{2D} - U \frac{dz}{ds} = 0 & \text{per } \frac{ds}{dt} = U + a \quad [C^+] \\ \frac{dh}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dU}{dt} - a \frac{\lambda |U|}{2D} - U \frac{dz}{ds} = 0 & \text{per } \frac{ds}{dt} = U - a \quad [C^-] \end{cases}$$



Schema di risoluzione esplicito

$$\begin{cases} \frac{U^+ - U_L}{\Delta t} + \frac{g}{a} \frac{h^+ - h_L}{\Delta t} + g \frac{\lambda}{2D} U_L |U_L| - \frac{g}{a} U_L \frac{\Delta z}{\Delta s} = 0 & \text{per } \frac{\Delta x}{\Delta t} = U + a \quad [C^+] \\ \frac{U^+ - U_R}{\Delta t} + \frac{g}{a} \frac{h^+ - h_R}{\Delta t} + g \frac{\lambda}{2D} U_R |U_R| - \frac{g}{a} U_R \frac{\Delta z}{\Delta s} = 0 & \text{per } \frac{\Delta x}{\Delta t} = U - a \quad [C^-] \end{cases}$$



! Stabilità numerica:



Valvole di sfioro della pressione

- Sfioro della portata al di sopra di una pressione di setting, $p_{setting}$
- Eliminazione dei picchi di pressione
- Tipologie:
 - Valvole di sfioro ad apertura anticipata (impianti di sollevamento)
 - Valvole di sfioro rapido (*Surge Relief Valves* – SRV):

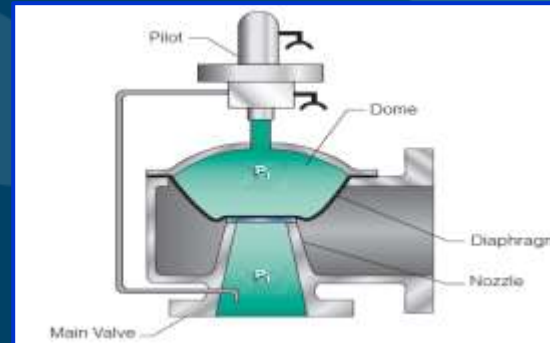
Direct Acting SRV:

forza di contrasto esercitata da un contrappeso o una molla



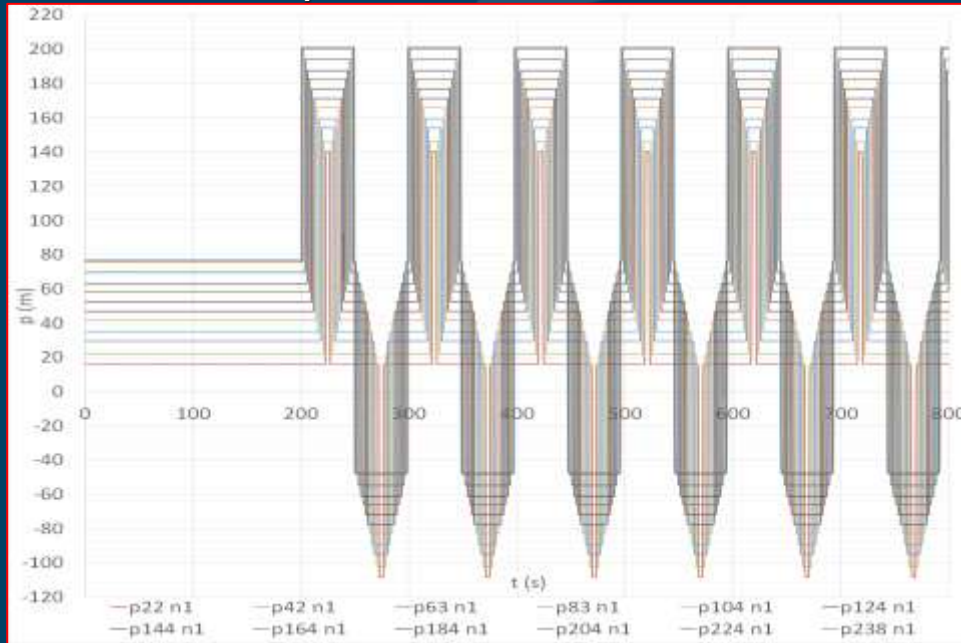
Pilot Operated SRV:

Valvola principale (sfioro) + pilota (regolazione apertura/chiusura)

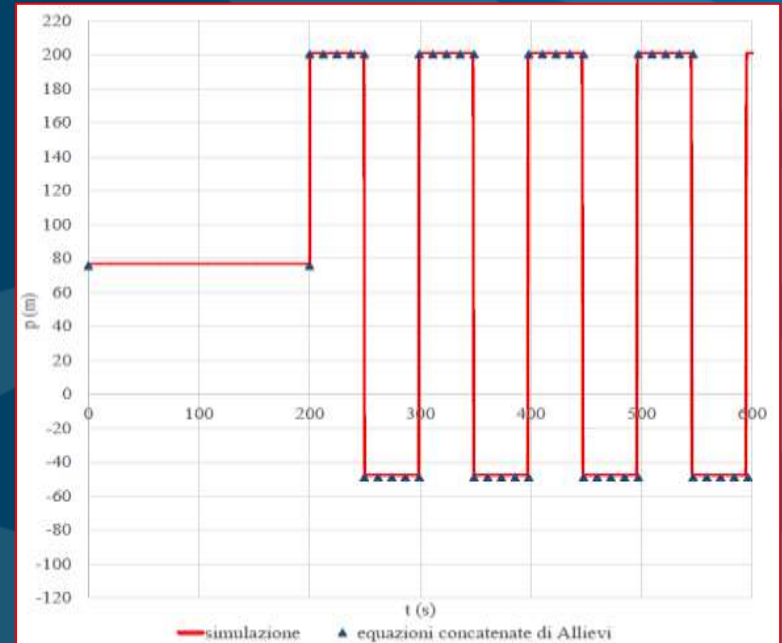


Validazione codici di calcolo: chiusura istantanea

Andamento delle pressioni in alcuni nodi di controllo



Confronto simulazione MU – Risultati teoria di Allievi

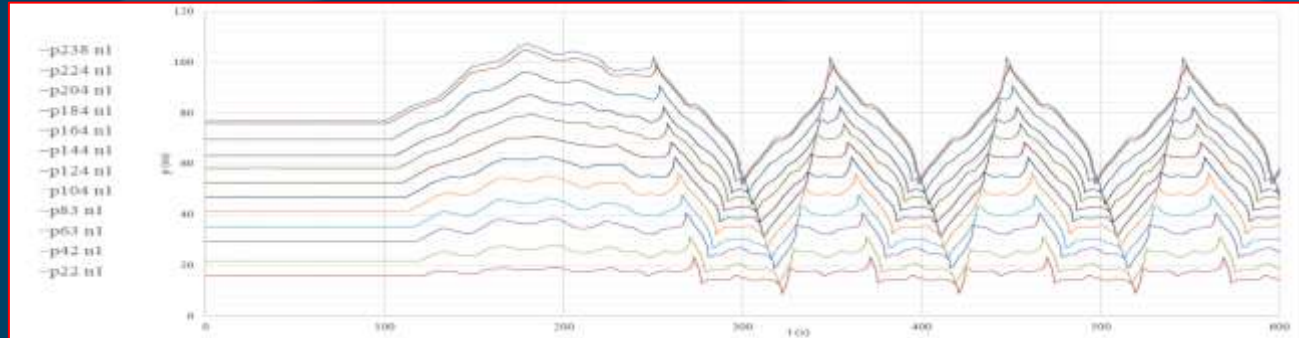


Confronto pressione massima all'otturatore

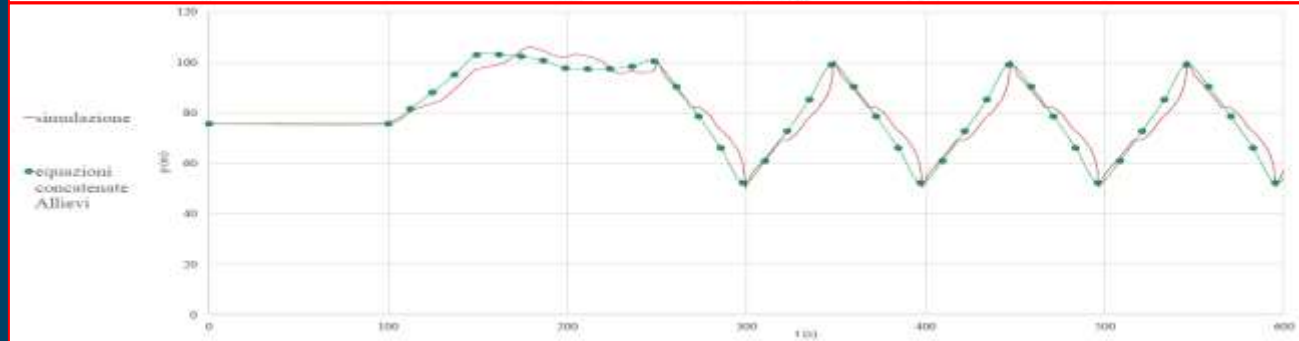
Sezione otturatore	Simulazione MU	Teoria di Allievi
p_{max} (m)	200.10	200.38
p_{min} (m)	-48.65	-48.94

Validazione codici di calcolo: manovra lenta

Andamento delle pressioni in alcuni nodi di controllo



Confronto simulazione MU – Risultati teoria di Allievi

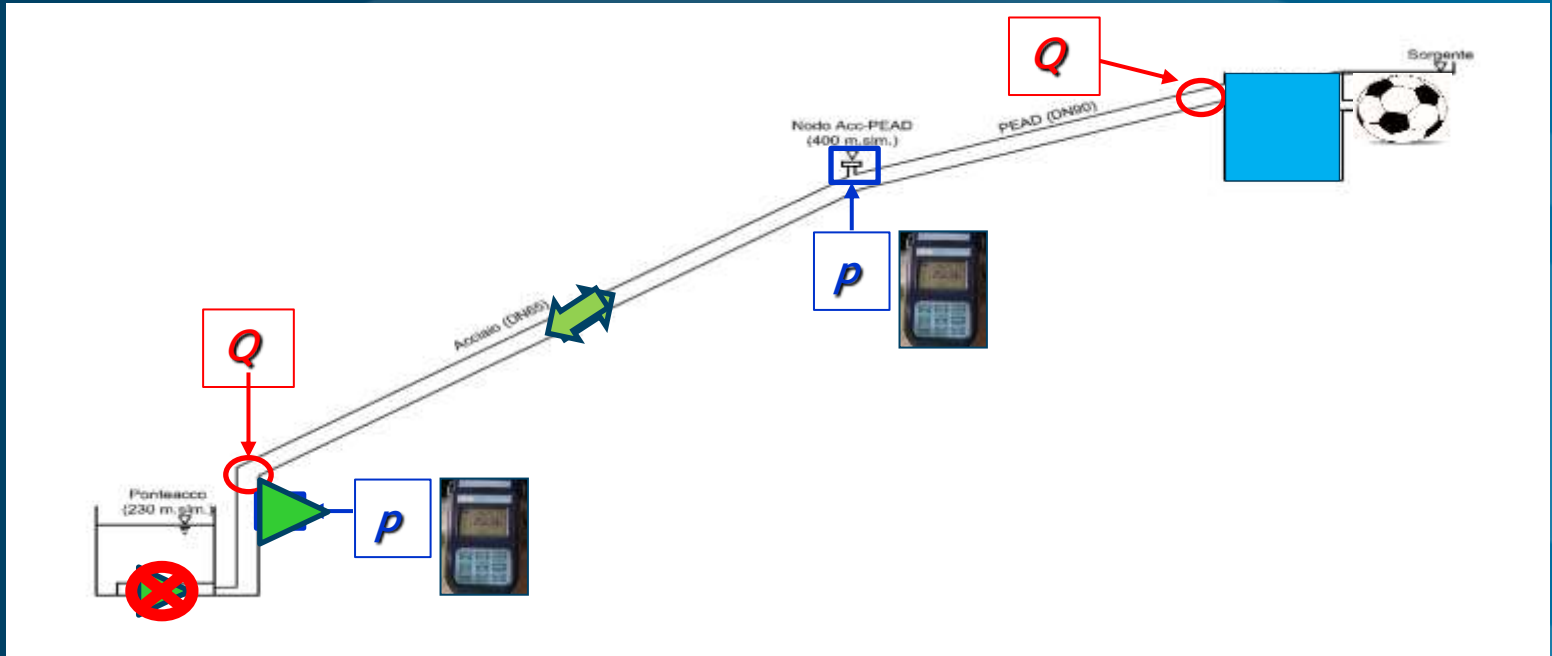


Confronto pressione massima all'otturatore

Sezione otturatore	Simulazione MU	Teoria di Allievi
p_{max} (m)	106.24	103.00
p_{min} (m)	50.53	52.30

Validazione codici di calcolo: in pratica (1/5)

P
R
O
V
E



1) Sollevamento a moto permanente

2) Gravità a moto permanente

3) Gravità: manovre di chiusura valvola \longleftrightarrow *Moto vario*

Validazione codici di calcolo: in pratica (2/5)

Dati idrostatici di pressione

Setting quote

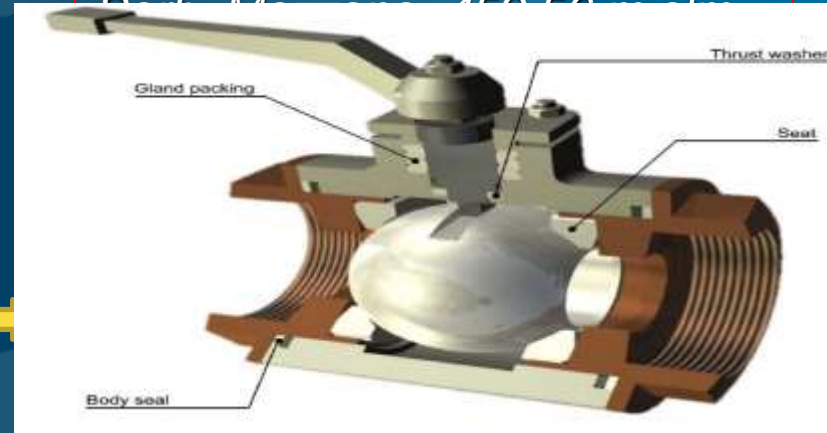
Funzionamento a gravità ($\theta=90^\circ$)

Dati sperimentali:
 $Q = 4.47 \text{ l/s}$
 $p_{PT} = 18.74 \text{ bar}$
 $p_{Acc/PEAD} = 4.66 \text{ bar}$

Coefficienti K della valvola per i diversi θ

θ [°]	Q [l/s]	p_{PT} [bar]	p_{max} [bar]	K []
20	0.10	22.57	5.85	15000
25	0.38	22.52	5.84	950
30	0.65	22.46	5.82	330
35	0.95	22.35	5.79	150
40	1.33	22.18	5.73	75
45	1.73	21.94	5.66	42.0
50	2.19	21.59	5.55	24.5
55	2.72	21.10	5.40	14.2
60	3.18	20.60	5.24	9.1
65	3.61	20.05	5.07	6.0
70	3.87	19.70	4.96	4.64
75	4.11	19.34	4.85	3.57
80	4.32	19.02	4.75	2.80
85	4.45	18.81	4.69	2.37
90	4.47	18.74	4.66	2.23

Seat Material: 150-50



Funzionamento impianto di sollevamento

A [%]	K []
0	-
10	296.59
20	85.65
30	36.99
40	18.34
50	9.88
60	5.92
70	4.36
80	3.21
90	2.49
100	2.23



Validazione codici di calcolo: in pratica (3/5)

Calibrazione dei moduli elastici dell'ACCIAIO e del PEAD



Range di ricerca:

- ACCIAIO: 170 – 250 GPa; (5GPa)
- PEAD 1.00 – 2.00 GPa; (0.05 GPa)

Valutazione dei modelli (Prova P053)

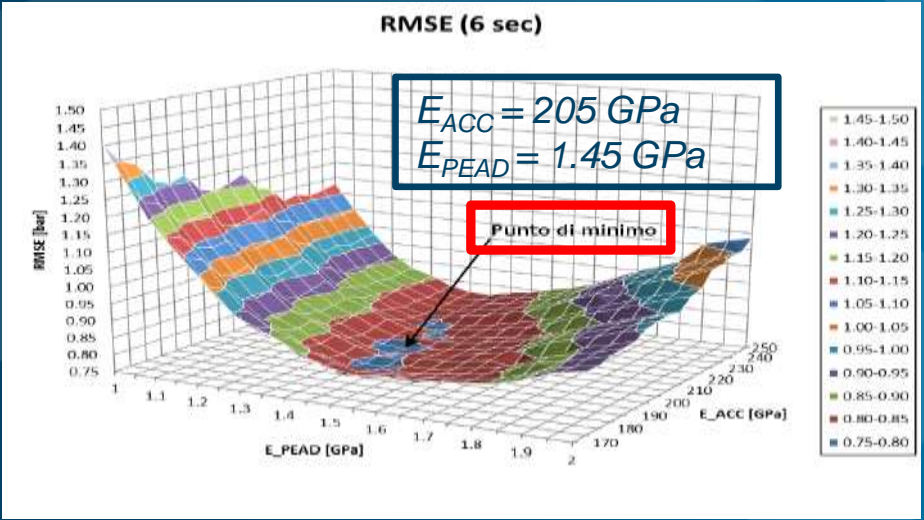
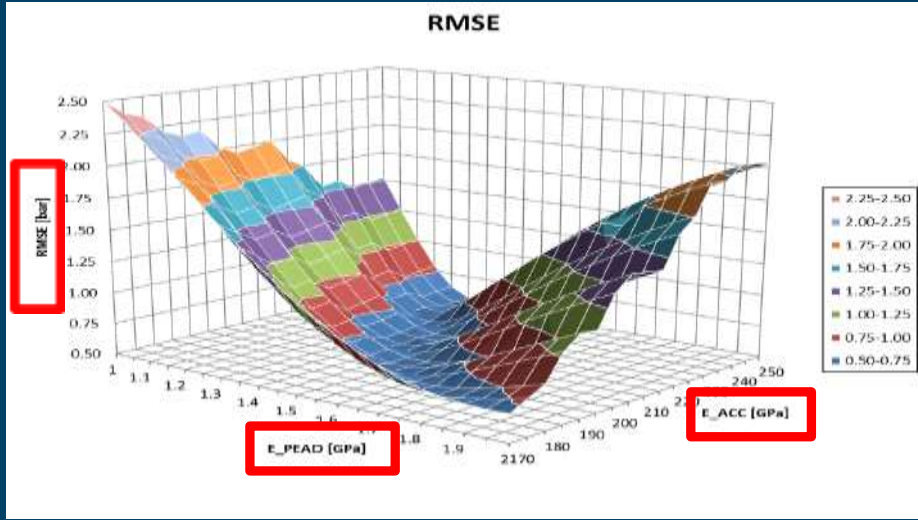


$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\epsilon_i)^2}{N}}$$

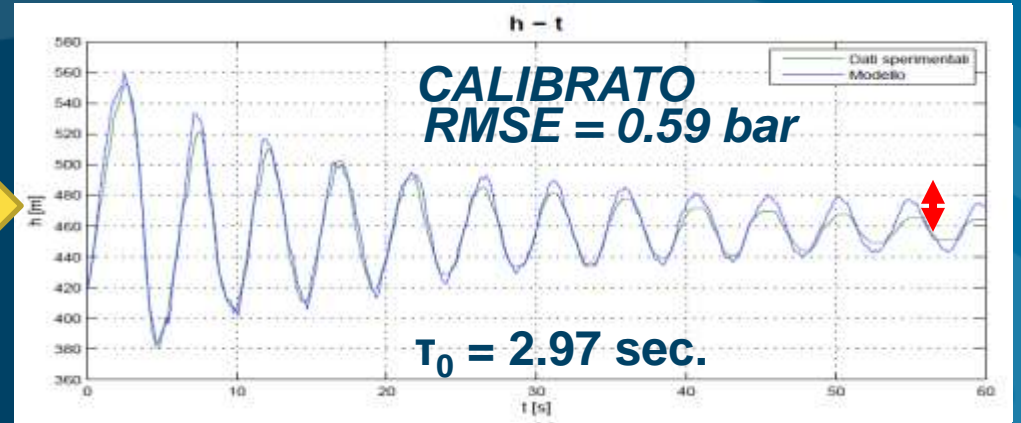
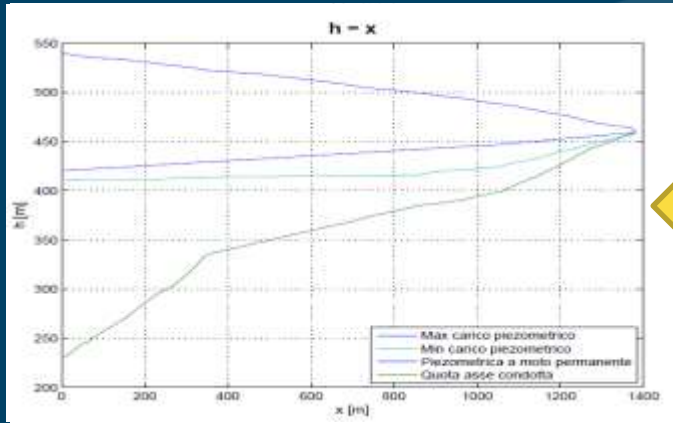
RMSE (60 secondi)

RMSE (6 secondi)

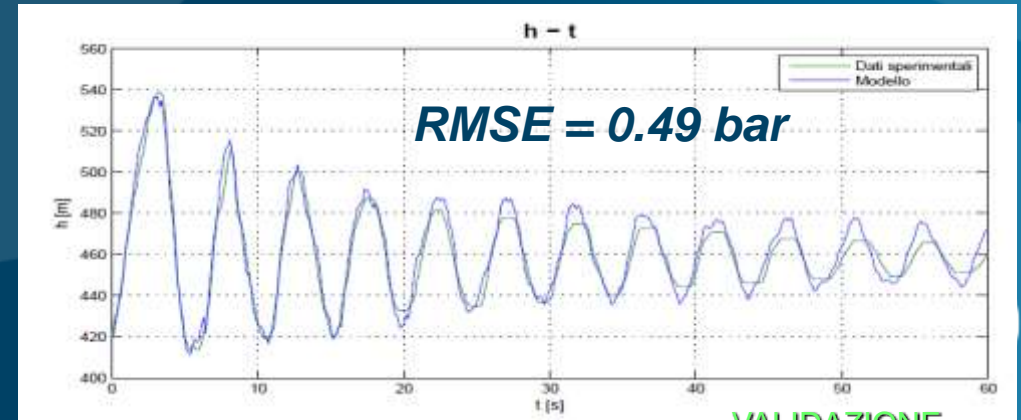
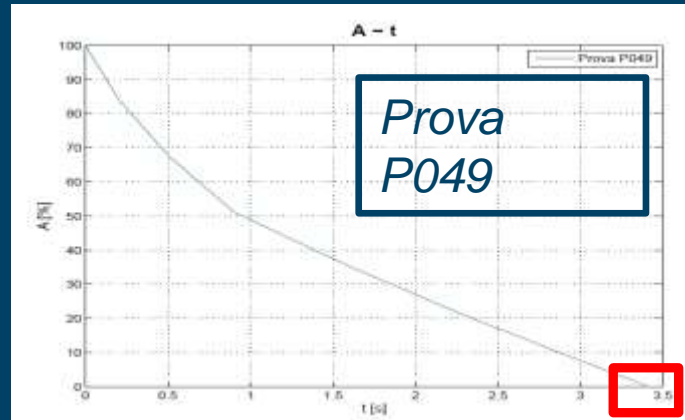
$$\epsilon_i = h^*(t_i) - h(t_i)$$



Validazione codici di calcolo: in pratica (4/5)

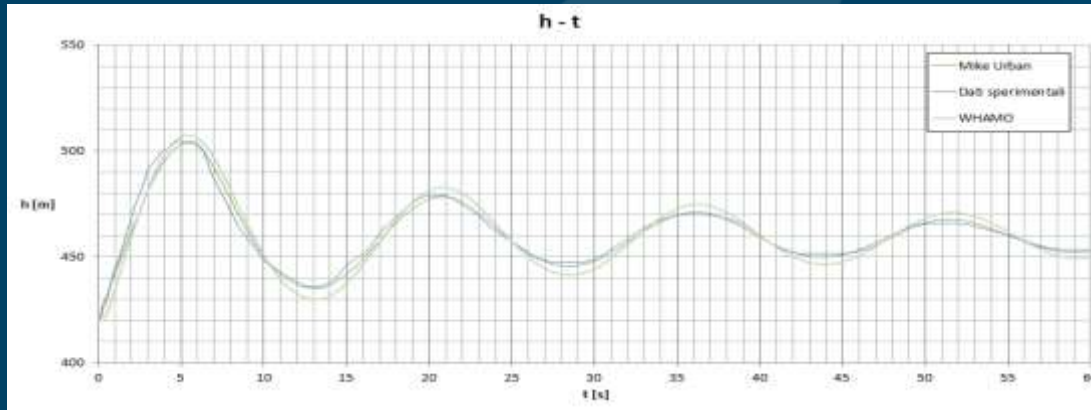
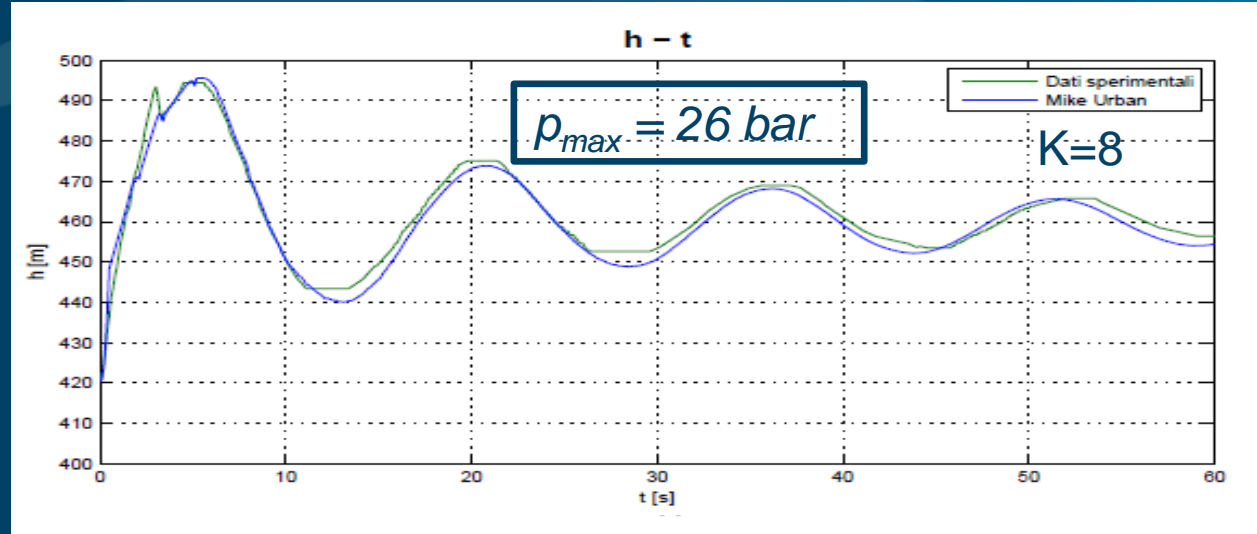
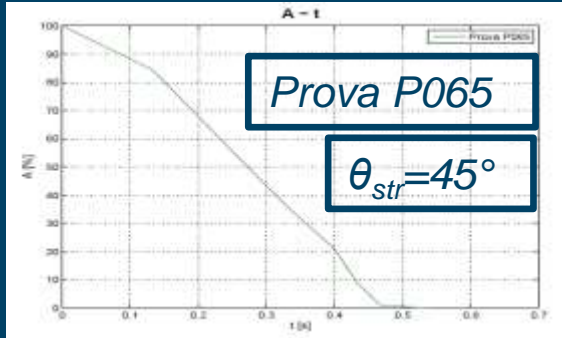


CALIBRAZIONE

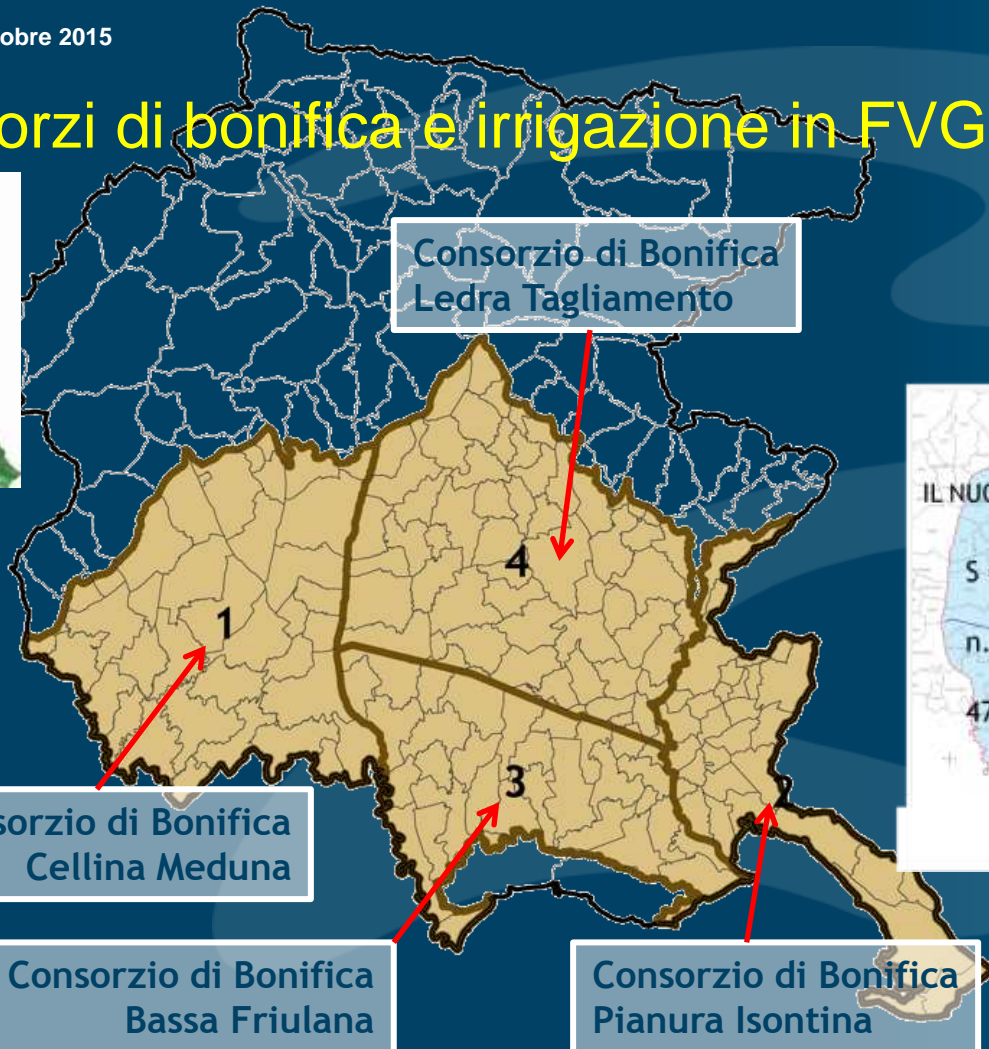


VALIDAZIONE

Validazione codici di calcolo: in pratica (5/5)



I Consorzi di bonifica e irrigazione in FVG



Consorzio di Bonifica
Ledra Tagliamento

Consorzio di Bonifica
Pianura Friulana

Consorzio di Bonifica
Cellina Meduna

Consorzio di Bonifica
Bassa Friulana

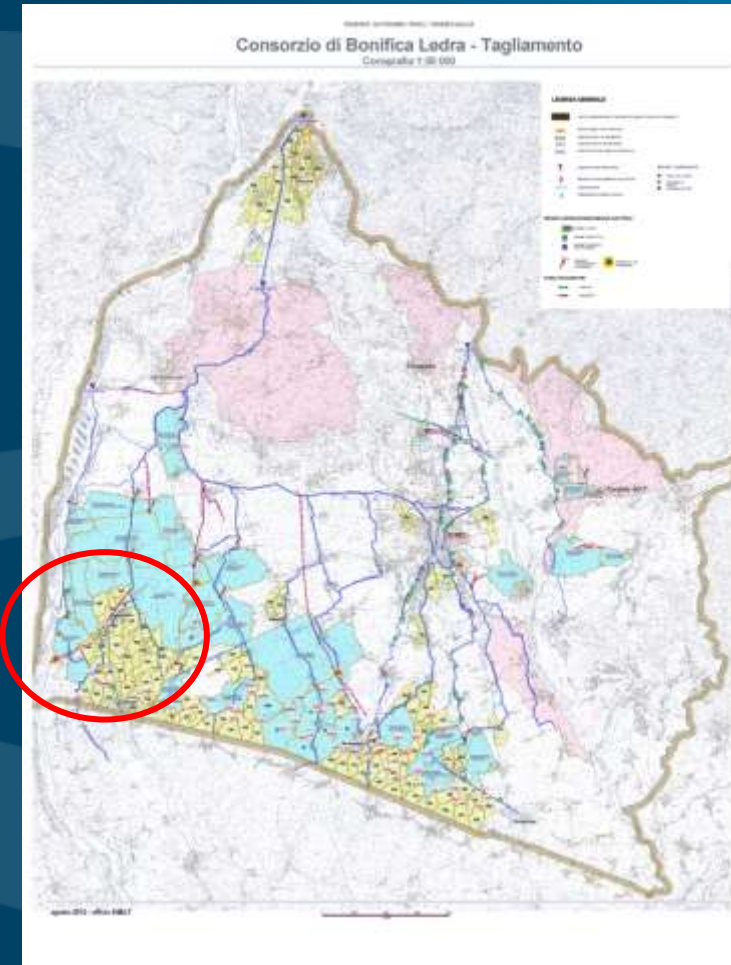
Consorzio di Bonifica
Pianura Isontina



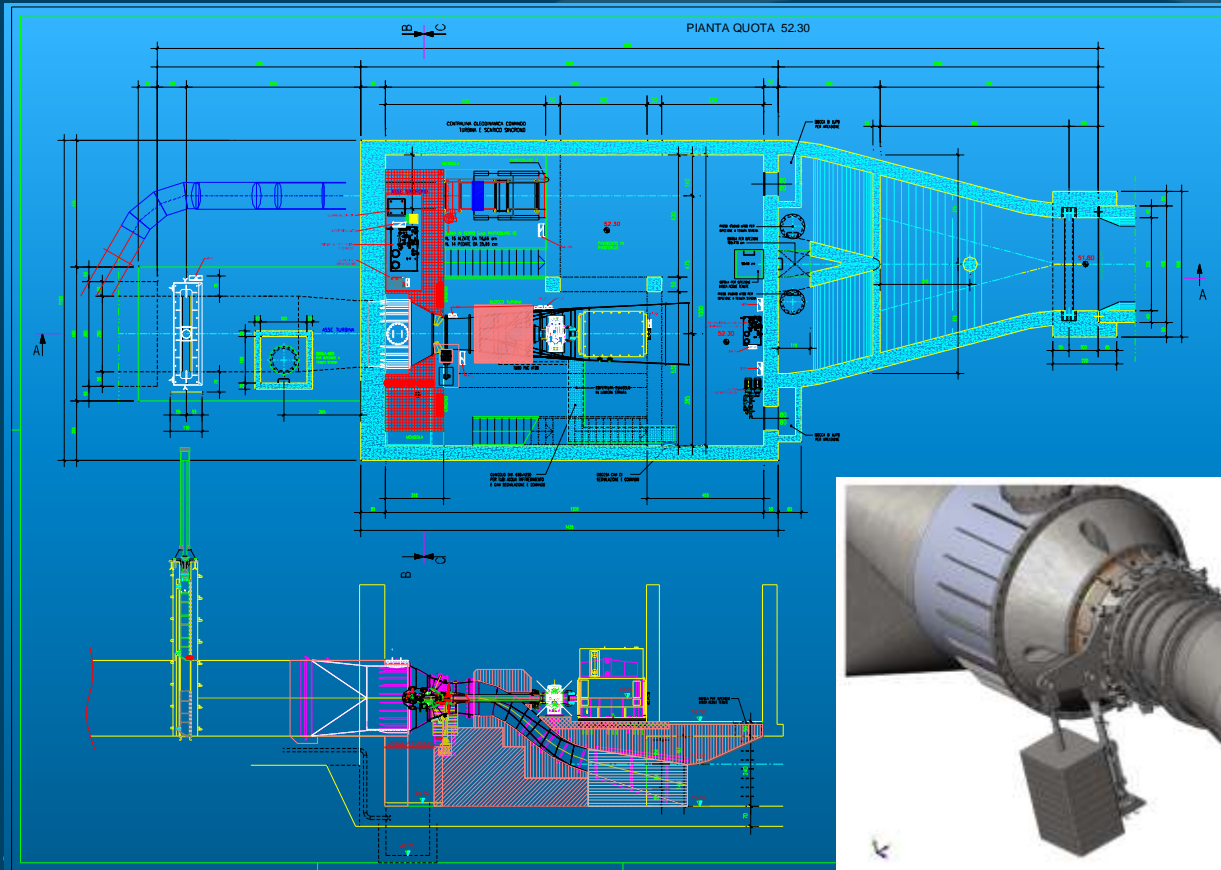
Ubicazione dell'area di studio



- *Caratteristiche condotta ($Q_{max} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$):*
 - *Lunghezza: 7000 m*
 - *Materiale: calcestruzzo armato*
 - *Sezione: 2600 mm x 2600 mm (quadrata con smussi)*
 - *Spessore: variabile da 300 mm a 500 mm*
 - *Quota media pelo libero vasca di carico: 82.40 m slm*
 - *Quota media restituzione: 56.00 m slm*



Pianta e sezione turbina e scarico sincrono



- *Caratteristiche salienti:*
 - *Kaplan ad asse orizzontale a S*
 - *Doppia regolazione delle pale della girante e delle pale del distributore*
 - $Q_{max} = 6.50 \text{ m}^3/\text{s}$
 - *Salto netto: 24.10 m*
 - *Potenza massima: 1398 kW*
 - *Generatore sincrono trifase 1800 kVA (tensione 3000 V)*



Complesso scarico sincrono by-pass atto a limitare la sovrappressione a valori non superiori al 10% del salto statico massimo (26.40 m)

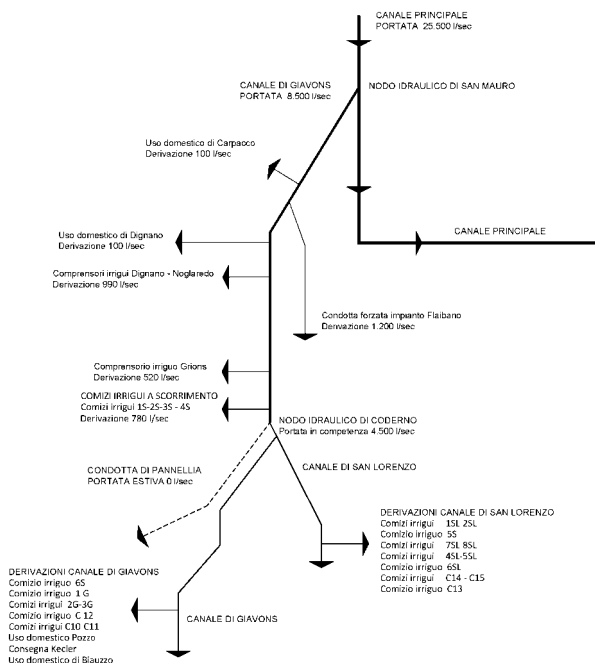
Conseguenze del colpo d'ariete (1/2)



Conseguenze del colpo d'ariete (2/2)

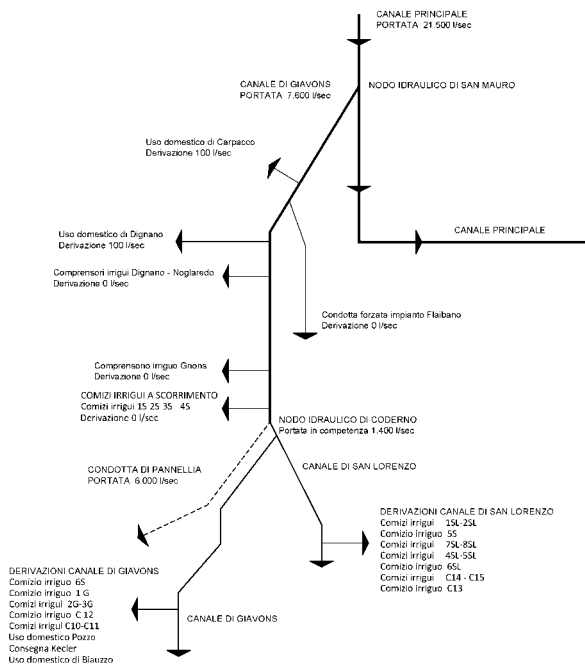
Il bilancio della derivazione del Canale di Givovns

Il bilancio sotto riportato è relativo al periodo irriguo di massima derivazione.



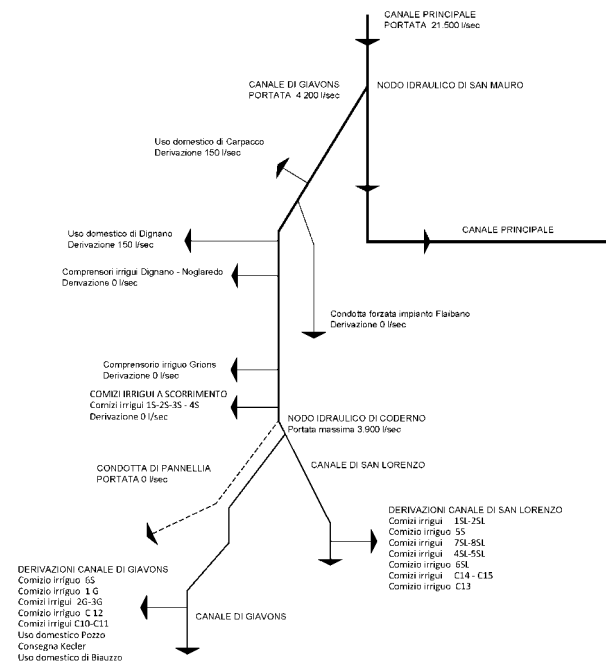
Il bilancio della derivazione del Canale di Givovns

Il bilancio sotto riportato è relativo al periodo non irriguo.



Il bilancio della derivazione del Canale di Givovns

Il bilancio sotto riportato è relativo al periodo non irriguo post sinistro.



Il modello in Mike Urban



Mike Urban Water Hammer: formule per la celerità

Theoretical Background

area of pipe, g - the gravitational acceleration, a - the wave speed, x - the distance along pipe axis and t - the time.

In the governing equations the acceleration terms which are very small compared to the other terms have been disregarded.

Wave Speed

For pure liquids Halliwell (1963) presented the general expression for the wave speed

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left(1 + \frac{K}{E} \right) \psi}} \quad (4.6)$$

in which E is the Young's modulus of elasticity of the conduit walls, K is the bulk modulus of the fluid, ρ is the density of the fluid and ψ is a non-dimensional parameter.

Rigid Conduit

$$\psi = 0 \quad (4.7)$$

Thick-Walled Elastic Conduit ($D/e < 10$)

- anchoring at both ends = full restraint

$$\psi = 2 \left(1 + \nu \right) \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{2 \nu R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) \quad (4.8)$$

in which ν is the Poisson's ratio, R_o is an external diameter, R_i is an internal diameter.

MIKE URBAN Water Hammer

- upstream anchoring = upper restraint

$$\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + 15 R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{\nu (R_o^2 - 3 R_i^2)}{R_o^2 - R_i^2} \right) \quad (4.9)$$

- frequent expansion joints = expansion joints

$$\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \nu \right) \quad (4.10)$$

Thin-Walled Elastic Conduit ($D/e > 10$)

- anchoring at both ends = full restraint

$$\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2) \quad (4.11)$$

in which D is the conduit diameter and e is the wall thickness.

- upstream anchoring = upper restraint

$$\psi = \frac{D}{e} (1 - 0.5 \nu) \quad (4.12)$$

- frequent expansion joints = expansion joints

$$\psi = \frac{D}{e} \quad (4.13)$$

Theoretical Background

Tunnels Through Solid Rock, Parmakian 1963

- Unlined tunnel

$$\psi = 1 \quad E = G \quad (4.14)$$

where G is the modulus of rigidity of the rock.

- Steel-lined tunnel

$$\psi = \frac{DE}{GD + Ee} \quad (4.15)$$

in which e is the thickness of the steel liner and E is the modulus of elasticity of steel.

Reinforced Concrete Pipe

This pipe can be replaced by an equivalent steel pipe having equivalent thickness.

$$e_s = E_s e_c + \frac{A_s}{I_s} \quad (4.16)$$

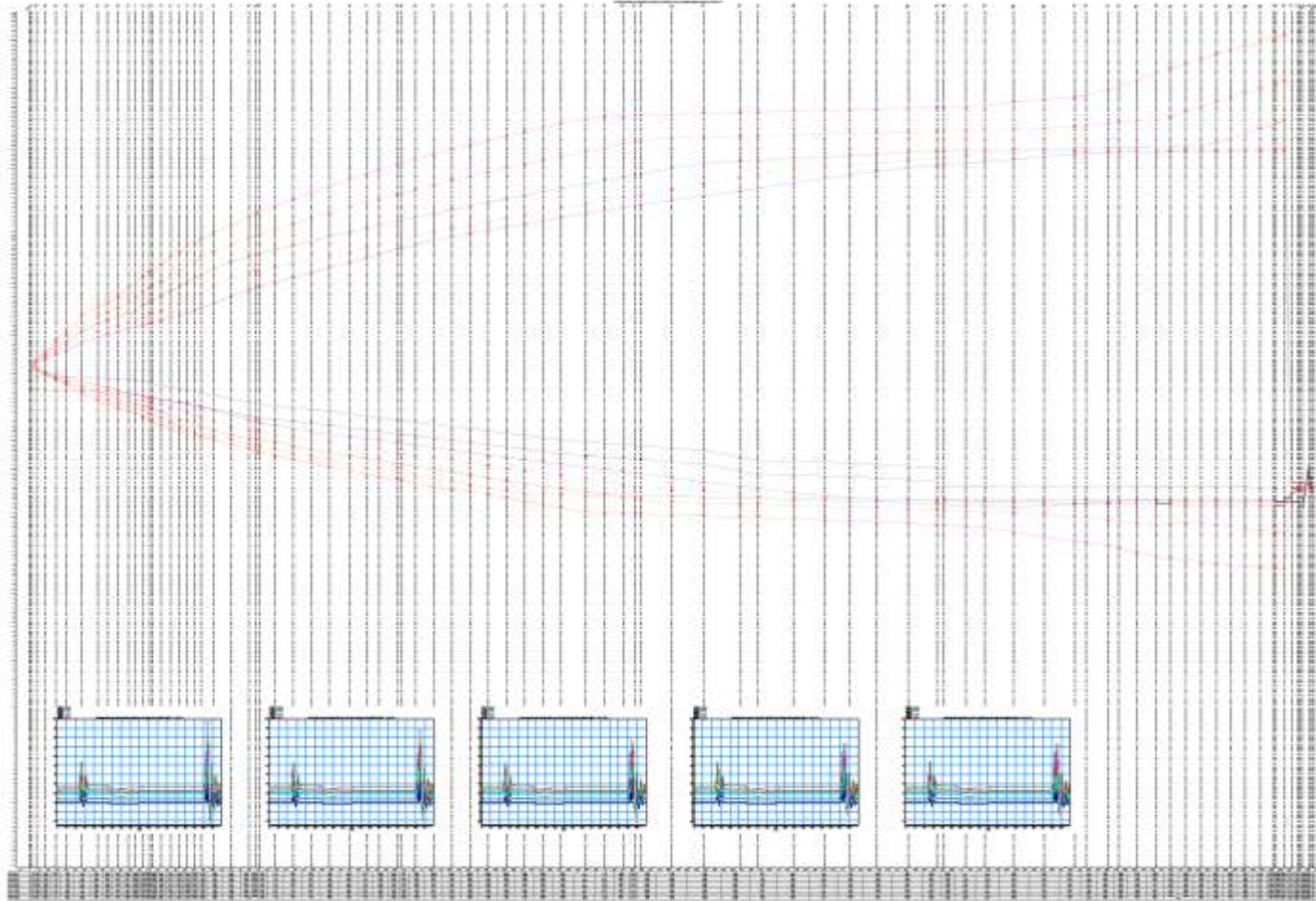
in which e_c is the thickness of the concrete pipe, A_s is the cross-sectional area of steel bars, I_s is the spacing of steel bars, E_s is the ratio of the modulus of elasticity of concrete to steel (0.06 - 0.11, but 0.05 for cracks).

Diagrams

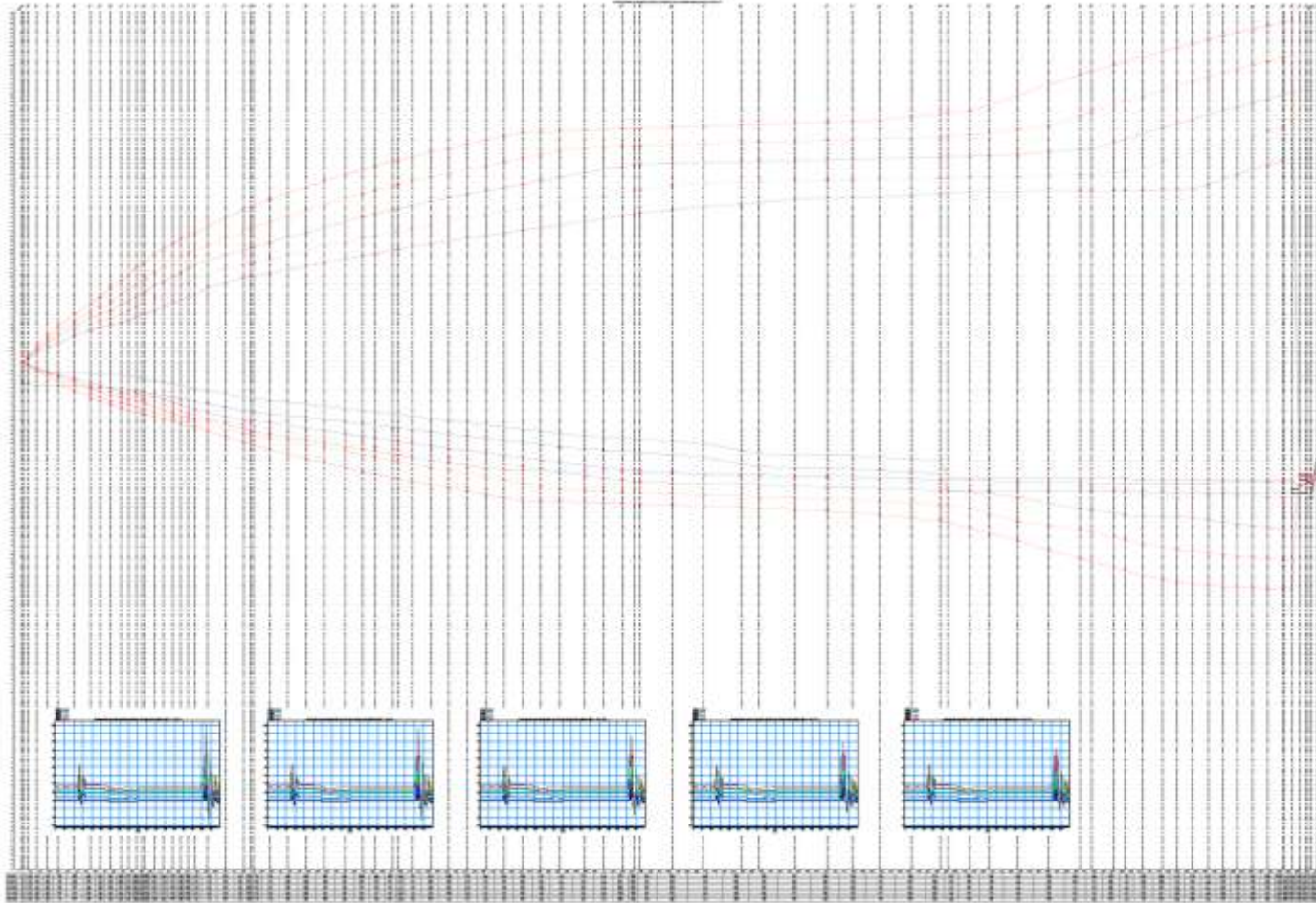
The following diagrams can be used in order to estimate the wave speed.

Values of Young's Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio for a range of common materials are available in the following table.

Piezometriche di colpo d'ariete (ipotesi parete sottile)



Piezometriche di colpo d'ariete (ipotesi parete grossa)



Andamento pressioni con misure sovrapposte (1/2)

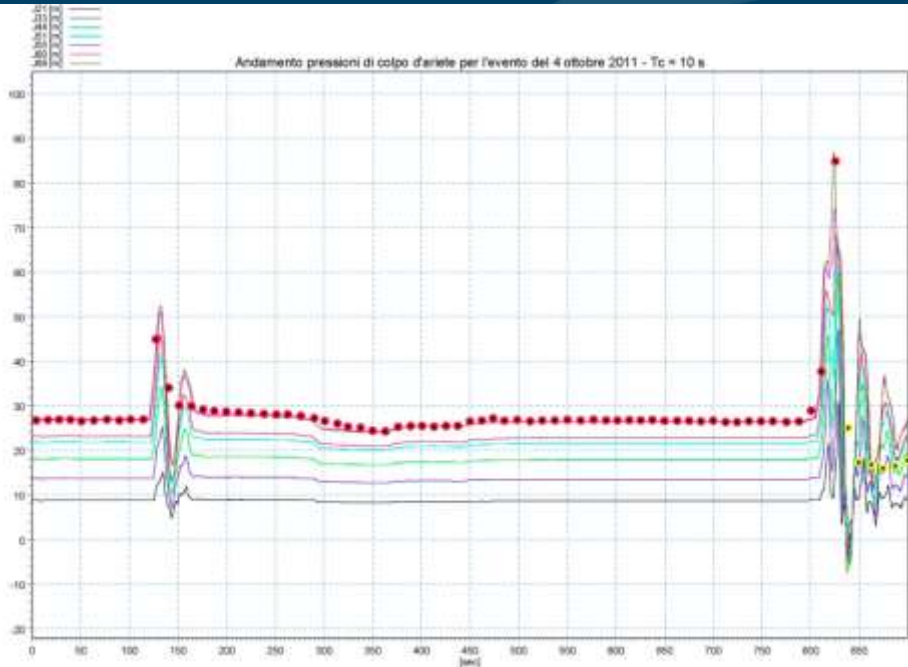


Ipotesi chiusura in 8 s

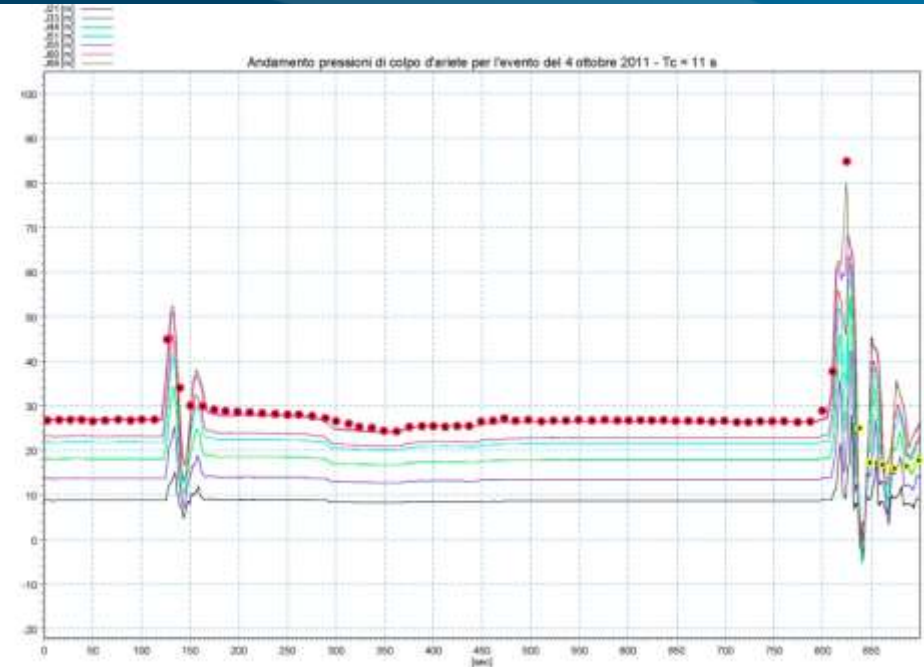


Ipotesi chiusura in 9 s

Andamento pressioni con misure sovrapposte (2/2)

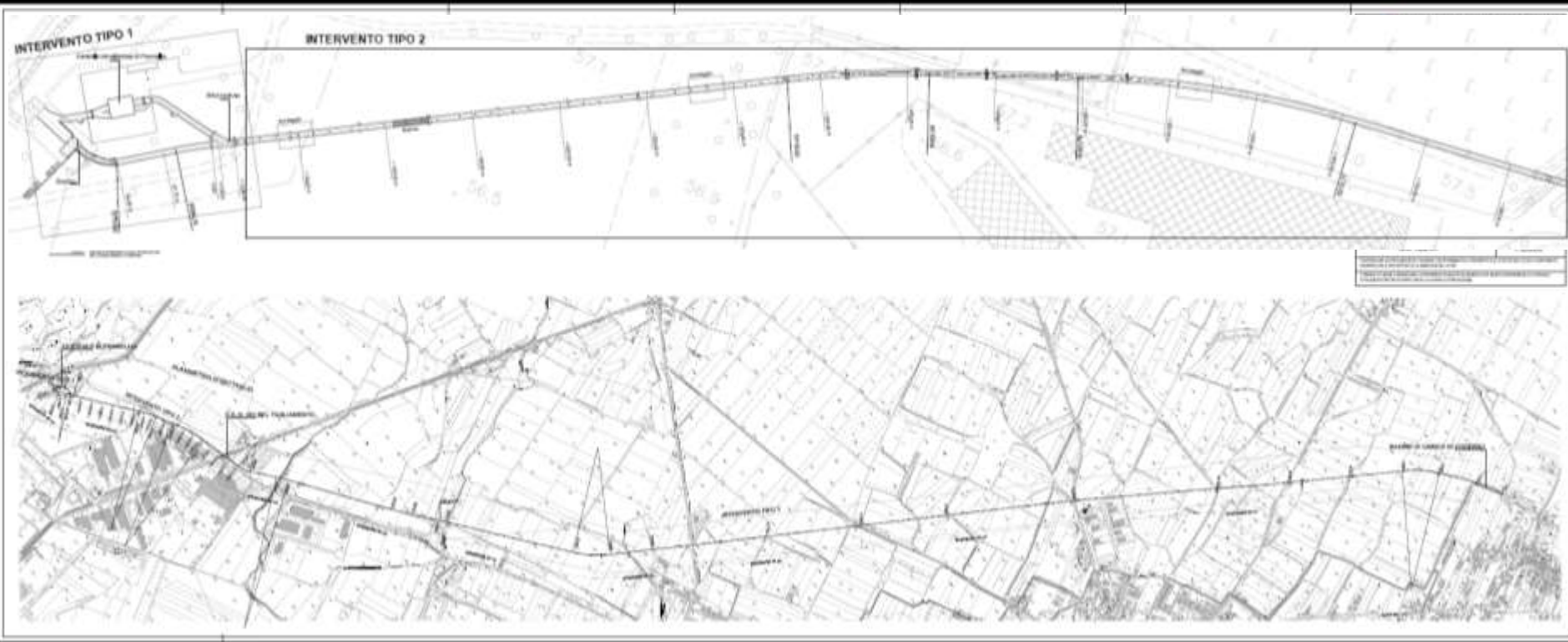


Ipotesi chiusura in 10 s

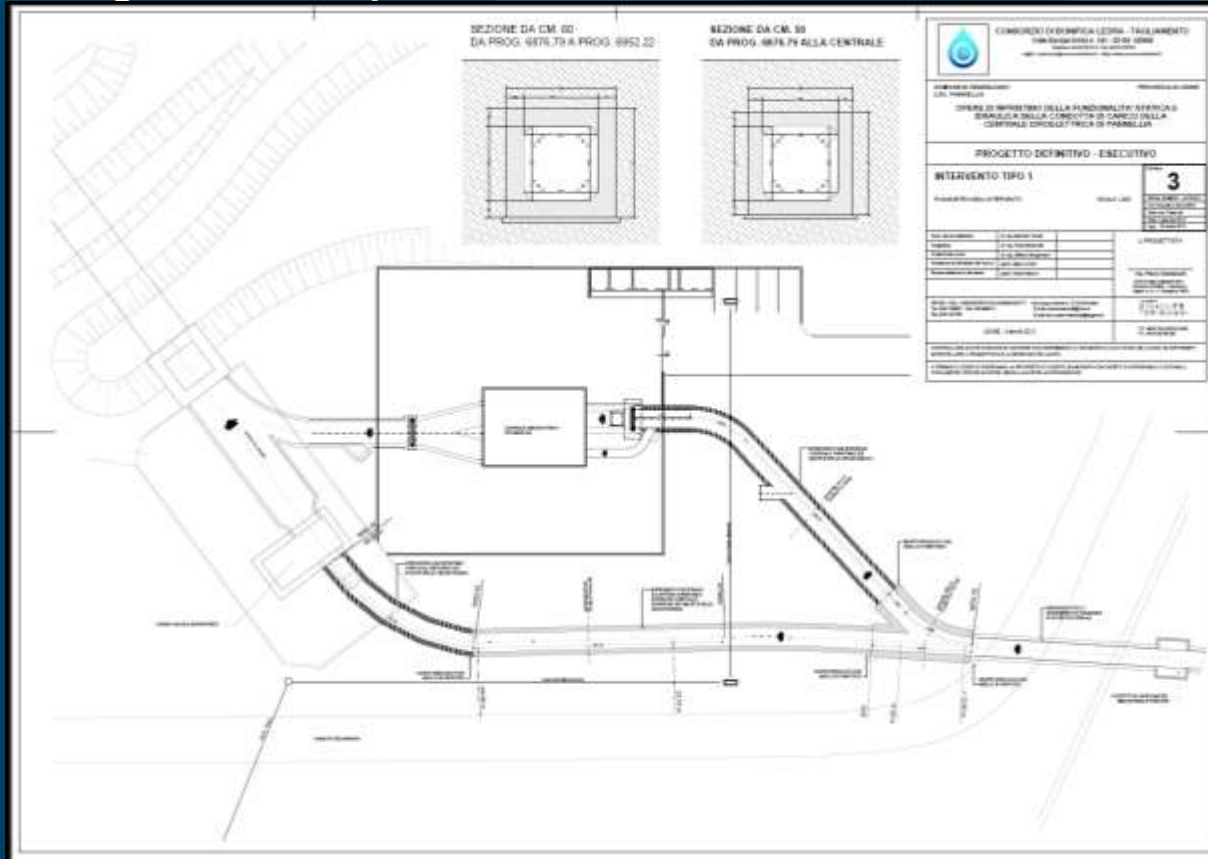


Ipotesi chiusura in 11 s

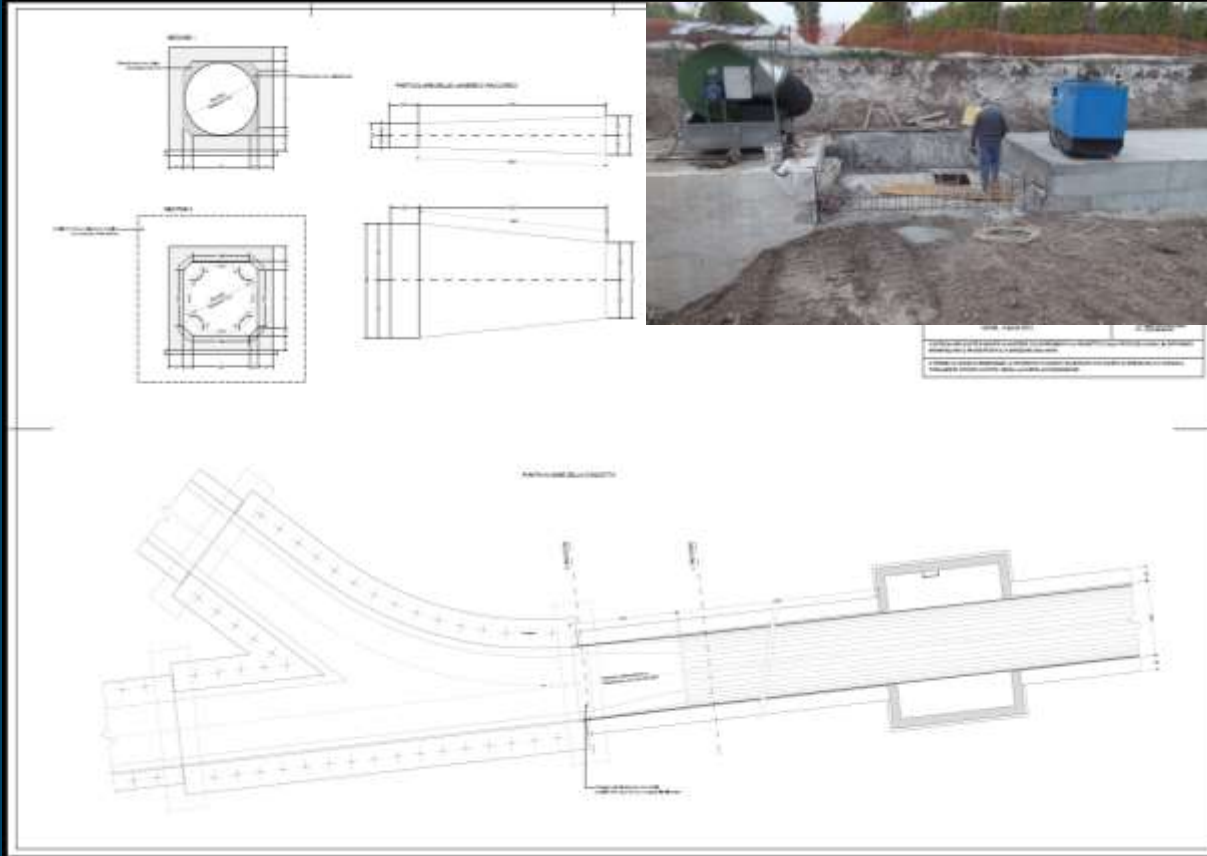
Progetto di ripristino della condotta



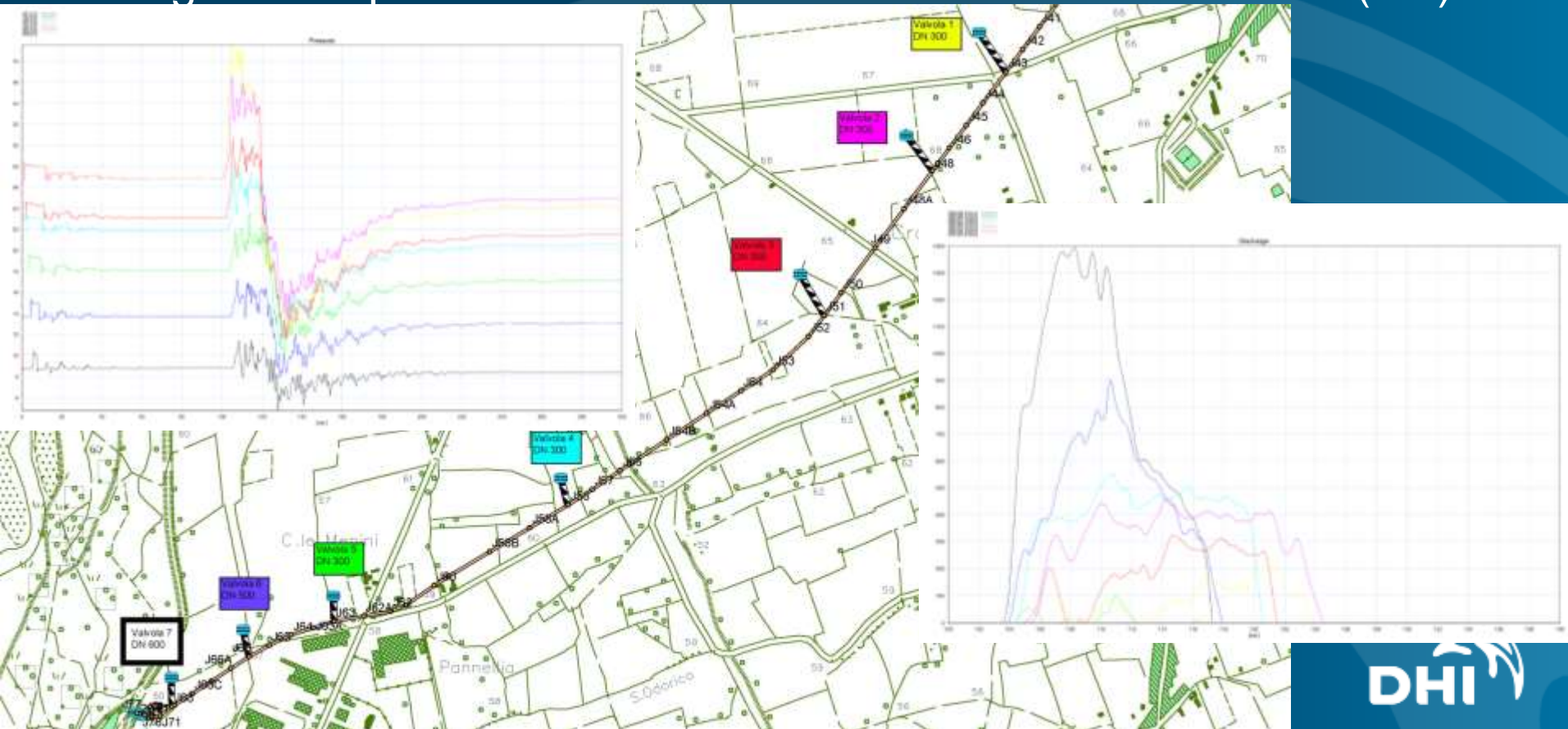
Progetto di ripristino: intervento 1



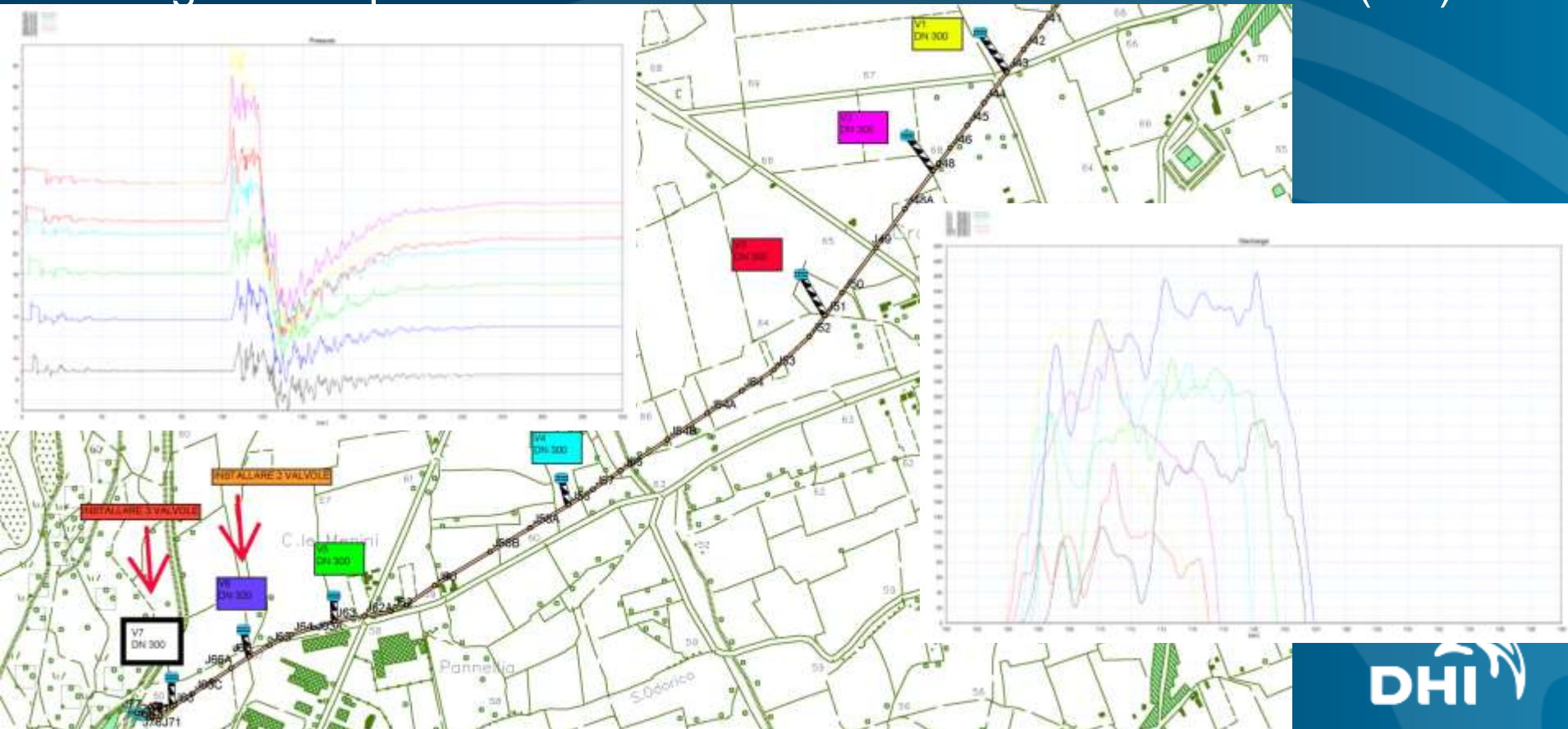
Progetto di ripristino: intervento 2



Progetto di ripristino: simulazione inserimento valvole SRV (1/2)



Progetto di ripristino: simulazione inserimento valvole SRV (2/2)



Grazie

Matteo Nicolini

Torino, 14-15 Ottobre 2015

