

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Dipartimento di Ingegneria Civile,
Edile e Ambientale

Tesi di Laurea Triennale in
Infrastrutture Idrauliche

Caratterizzazione Sperimentale Statica e Dinamica dell'Equazione di Perdita per Condotte in PVC-a

Candidate

Emanuela Di Marino N49/695

Angela Sarnacchiaro N49/351

Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Maurizio Giugni

Correlatore

Ch.mo Prof. Ing. Francesco De Paola



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Introduzione

- L'acqua è patrimonio dell'umanità, un bene comune fondamentale e una risorsa naturale per tutti, fonte di vita insostituibile per l'ecosistema.



www.greenstyle.it

Introduzione

- Negli ultimi decenni, però, la richiesta di risorsa idrica è incrementata notevolmente in relazione all'aumento della qualità della vita e al continuo aumento demografico ed economico.

Carenza idrica

Sta diventando una preoccupazione in tutta l'UE

La crescita della popolazione accresce il bisogno di acqua dolce

Il cambiamento climatico aggrava la carenza d'acqua a livello regionale

Il risparmio idrico è fondamentale per una gestione sostenibile dell'acqua

(www.adkronos.com)



Introduzione

- E' necessario pertanto adottare politiche mirate al contenimento delle **Perdite Idriche** e degli sprechi, alla salvaguardia dall'inquinamento di tale risorsa attraverso un'adeguata **gestione del Servizio Idrico**.

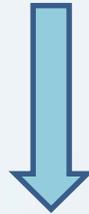


(www.wordpress.com)



Scopo e Finalità della Ricerca

Il presente lavoro è incentrato sull'analisi teorico-sperimentale della correlazione tra pressione e portate disperse in condotte plastiche in PVC-a



FINALITÀ

- Analizzare il processo di Perdite Idriche in condotte in Pressione, provocato da guasti o/e usura delle stesse
- Studiare, mediante la simulazione di differenti condizioni operative, il comportamento di tubazioni ad uso idrico di tipo Plastico attraverso la caratterizzazione dei parametri della Legge di Perdita

Le Perdite Idriche

Le perdite idriche sono costituite da due macro-categorie:

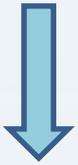
- **Perdite Amministrative (o Apparenti):** dovute ad errori di misura, volumi autorizzati ma non misurati, volumi perduti per sfiori dei serbatoi, consumi non autorizzati;
- **Perdite Reali (o Fisiche):** rappresentano il volume di acqua disperso che non viene utilizzato dagli utenti e sono riconducibili alla non integrità e/o alla mancanza di tenuta degli elementi che costituiscono la rete idrica.

		FATTURATO	MISURATO		
			NON MISURATO	Dalla lettura dei contatori Es. Contratti a forfait	
VOLUME IDRICO IMMESSO IN RETE	CONSUMO AUTORIZZATO	NON FATTURATO (Utilizzato dal Gestore)	MISURATO	Utilizzato dal gestore per scopi propri (sfiori, scarichi, lavaggi, prelievi, ecc.) Difficilmente misurato	
			NON MISURATO		
	PERDITE IDRICHE	PERDITE APPARENTI		ERRORI DI MISURAZIONE	Errori nel misurare il volume impresso in rete o i consumi dell'utenza
				CONSUMO NON AUTORIZZATO	Furti sulla rete (Allacciamenti abusivi)
		PERDITE REALI o FISICHE		PERDITE DI SOTTOFONDO	Volumi modesti
				PERDITE DA ROTTURE SEGNALATE	Volumi notevoli (evidenti all'esterno)
	PERDITE DA ROTTURE NON SEGNALATE	Volumi notevoli (non evidenti all'esterno)			

IWA (www.federica.unina.it)

Le Perdite Idriche

Il problema di efficienza delle reti idriche italiane è evidenziato dai dati allarmanti provenienti dal censimento realizzato dall'ISTAT



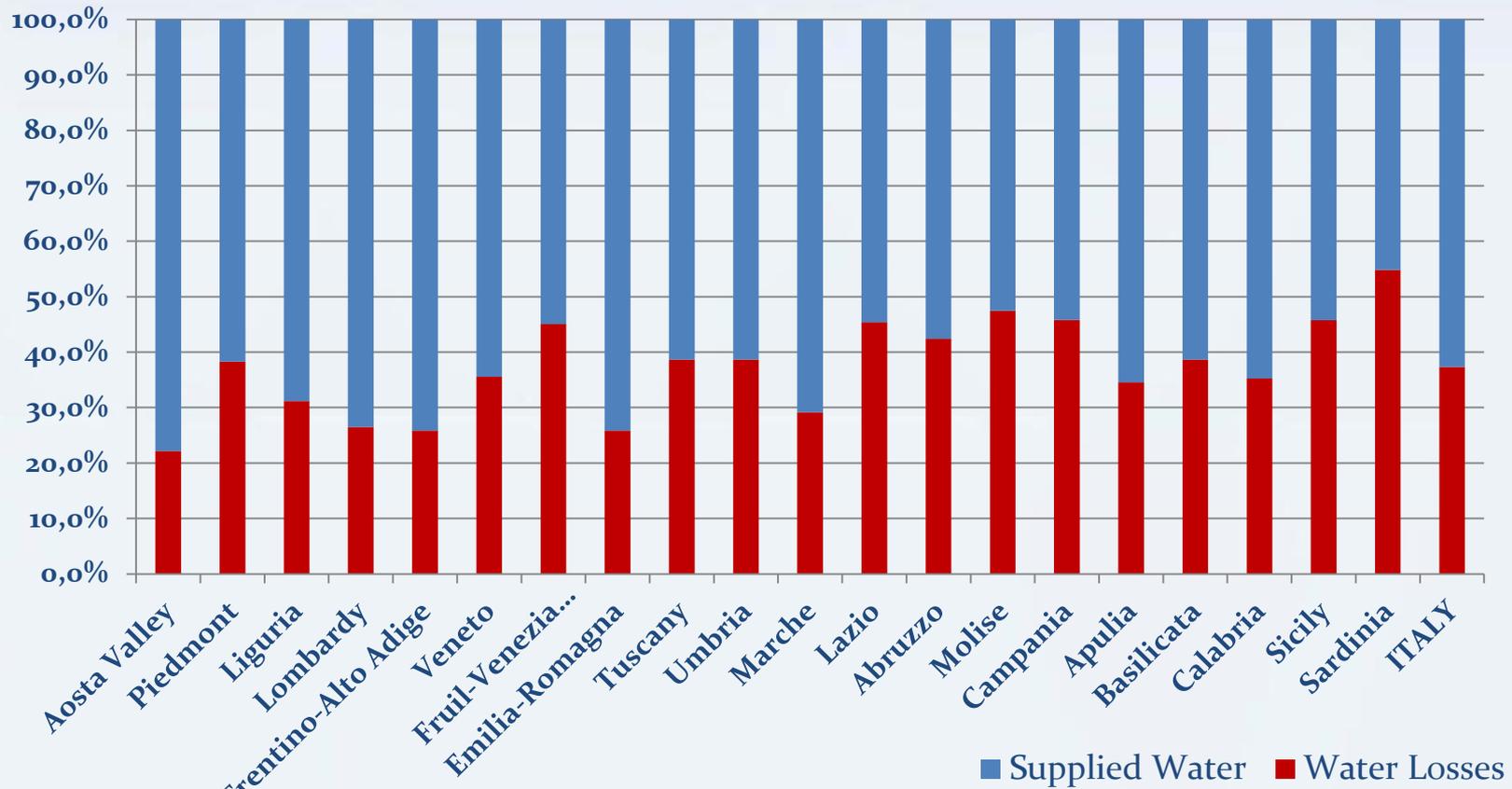
In termini assoluti, a fronte di “perdite apparenti” pari a circa **83 milioni di m³** (il 3% del totale dell'acqua immessa in rete), le perdite reali o fisiche sono state di circa **925 milioni di m³** (il 35% del totale dell'acqua immessa in rete) (Politecnico di Milano)



Esempi di perdite fisiche (www.federica.unina.it)



Le Perdite Idriche



Percentuale di perdite idriche e acqua fornita nelle regioni Italiane (ISTAT, 2014)



L'Emergenza della Regione Campania

Il problema delle perdite idriche coinvolge fortemente anche le città della Regione Campania, ivi compresa la Città Metropolitana di Napoli.

Si stima che per la città partenopea le perdite idriche dovute all'obsolescenza e alla scarsa manutenzione delle infrastrutture di distribuzione si attestino intorno al 34,3% (*dati ISTAT 2015*).

Tale fenomeno influisce non solo dal punto di vista economico ed ambientale, ma presenta anche risvolti negativi in termini di sicurezza.

Le ingenti portate idriche defluenti da condotte lesionate infatti provocano di frequente smottamenti, collassi del manto stradale, con conseguenti danni a parti degli edifici.



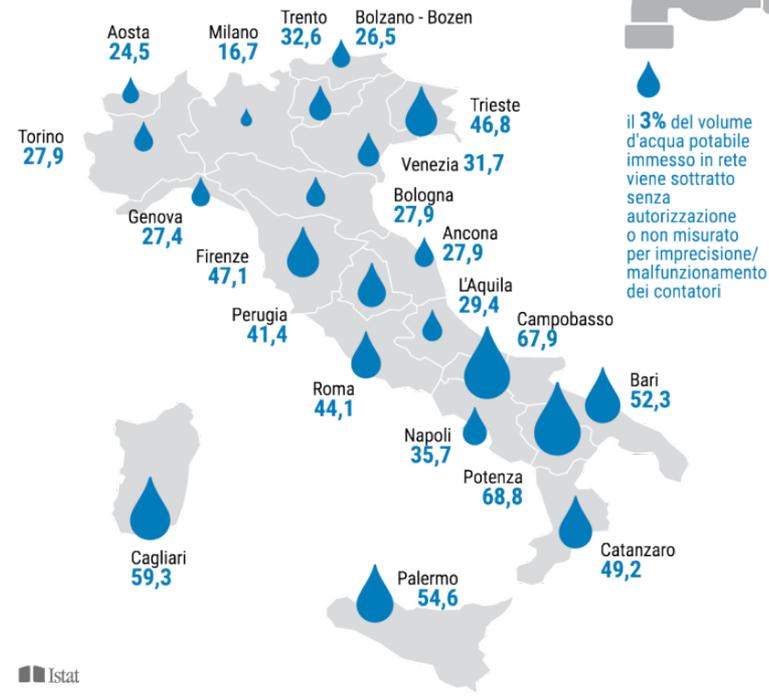
Rilievo del collasso stradale in Via Pigna (NA) in data 10/04/2018, provocato dalla rottura di una condotta idrica

Le Perdite Idriche

I fattori maggiormente influenti per la determinazione dei fenomeni di rottura sono:

PERDITE IDRICHE DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE DI ACQUA POTABILE NEI COMUNI CAPOLUOGO DI REGIONE

Anno 2015, rapporto percentuale tra perdite totali e volume di acqua immesso in rete





Le Perdite Idriche

Tipologie di intervento

- *Manutenzione Ordinaria e Straordinaria (Campagne di Ricerca Perdite e Interventi di Riabilitazione)*
- *Controllo Attivo delle Pressioni (Pressure Management)*
- *Gestione delle Infrastrutture (Distrettualizzazione e Rinnovo delle Reti)*

Quadro Normativo

Legge n. 36/1994 (“Legge Galli”), recante Disposizioni in Materia di Risorse Idriche;

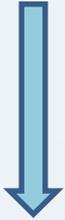
D.P.C.M. 04.03.1996: Disposizioni in Materia di Risorse Idriche

D.M. 99/1997: Regolamento sui criteri e sul metodo in base ai quali valutare le perdite degli acquedotti e delle fognature

D.Lgs. 152/2006 (“Testo Unico Ambientale”)

Gestione delle Perdite Idriche

In particolare, tra gli interventi di gestione, il *Controllo Attivo* è indirizzato alla regolazione del cielo piezometrico mediante:

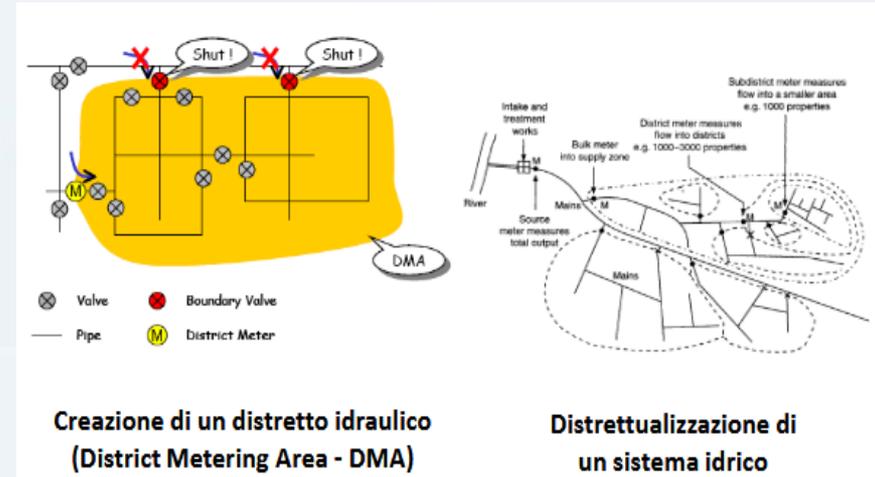


**Valvole di Riduzione della Pressione
PRVs (Pressure Reducing Valves)**



www.directindustry.fr

Distrettualizzazione



www.federica.unina.it

Dall'espressione della Legge di Perdita si osserva come alla riduzione delle pressioni in rete corrisponda una diminuzione delle portate disperse

Legge di Perdita

Il fenomeno della perdita idrica in condotte in Pressione è descritto dalla relazione intercorrente tra Portata Persa e Pressione di esercizio in rete.

Dalla letteratura ingegneristica in ambito acquedottistico, lo studio dell'efflusso di un fluido attraverso una luce a battente si effettua mediante la classica legge di Torricelli, ovvero la legge della foronomia



$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

- μ coefficiente d'efflusso [-]
- h carico in una generica sezione a monte della luce [m]
- A area della sezione dell'orifizio [m²]

La legge che ben correla la relazione Pressione-Portata, è una legge di tipo monomio (**Leakage Law**)

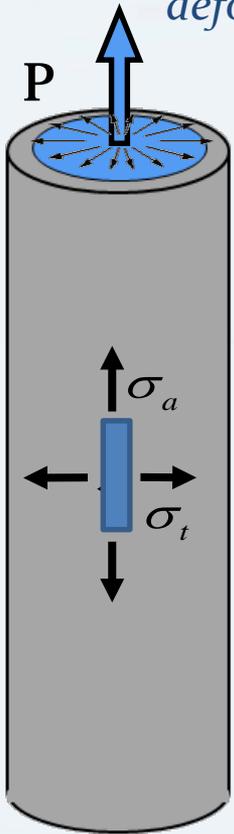


$$Q = \alpha \cdot P^\beta$$

- α coefficiente dimensionale noto in letteratura come *Emitter Coefficient* (l/s · bar)
- β esponente adimensionale noto in letteratura come *Leakage exponent*.

Legge di Perdita

Un approccio alternativo è espresso dalla formulazione **FAVAD** (*Fixed And Variable Area Discharge*), ricavata considerando lo *stato tensionale* agente sulle pareti della tubazione e le *deformazioni elastiche* indotte nell'intorno del foro di perdita dalle pressioni.



$$q = \mu A_n \sqrt{2g} [h^\nu + Ah^{(1+\nu)} + Bh^{(2+\nu)}]$$

$$A = \frac{\rho \cdot g \cdot (\delta^2 + 2)}{E(\delta^2 - 1)}$$

$$B = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot (\delta^2 + 2)}{E^2(\delta^2 - 1)}$$

q Portata attribuita alla perdita [m^3/s]

h Pressione [m]

A_n Luce d'efflusso indeformata [m^2]

μ Coefficiente d'efflusso [-]

ν Parametro del modello da calibrare [-]

A, B Coefficienti dipendenti dalla geometria e dal materiale [-]

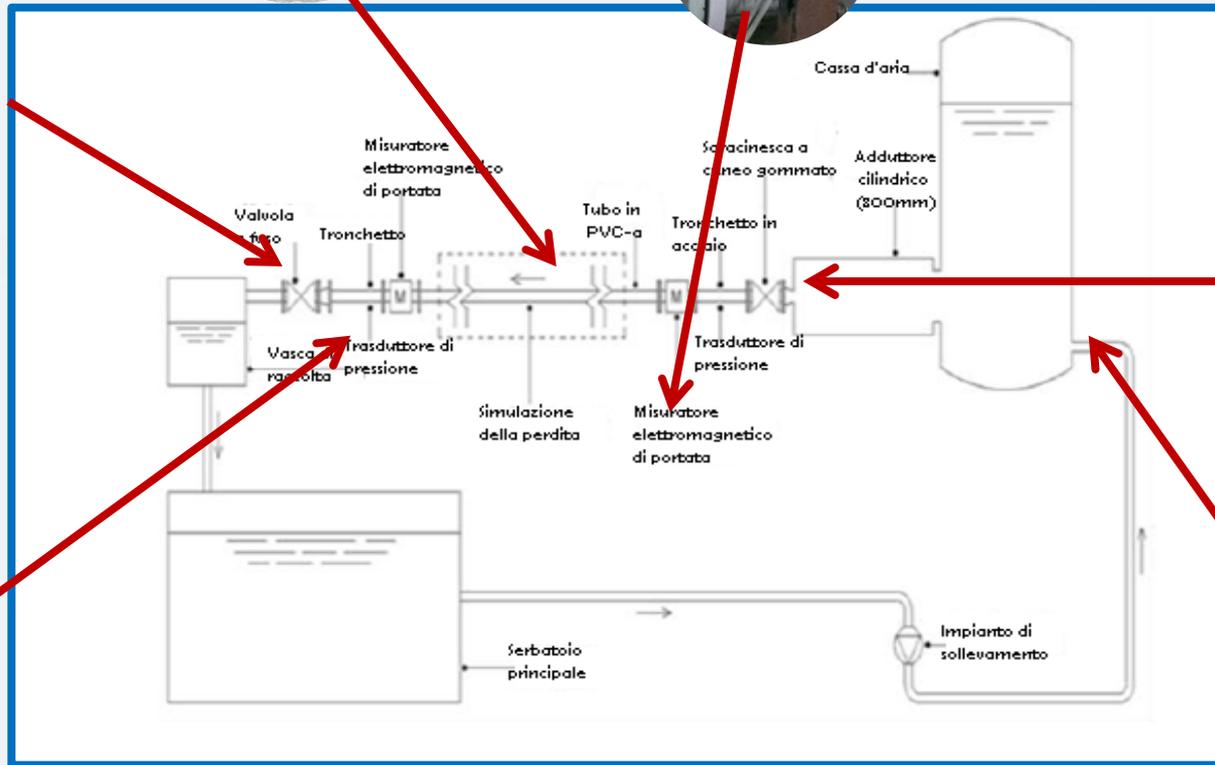
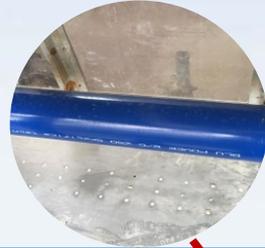
δ Rapporto tra raggio interno e raggio esterno della condotta

E Modulo Elastico tubazione

- Tubazione omogenea, isotropa, di lunghezza indefinita, chiusa alle estremità, soggetta a Pressione interna P
- Assialsimmetria del carico sollecitante e della geometria della tubazione
- Tensioni principali di parete espresse tramite formulazione di Lamé
- Comportamento elastico lineare del materiale



Installazione Sperimentale



Procedura d'Acquisizione Dati

Strumenti di Misura

Trasduttore di
pressione

Segnale analogico

Misuratore elettromagnetico
di portata

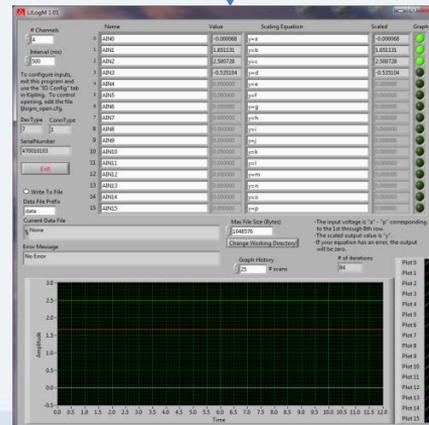
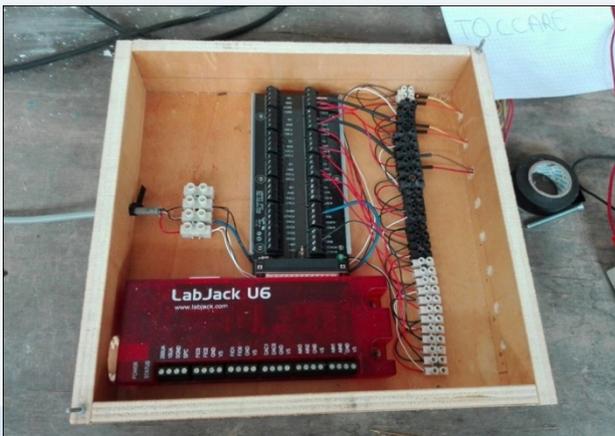
Segnale analogico

Scheda di
acquisizione

Segnale digitale

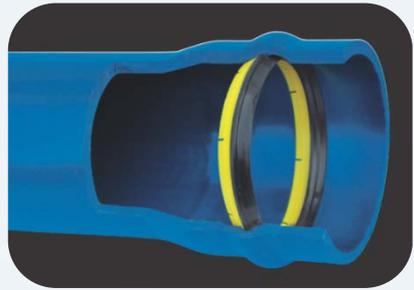
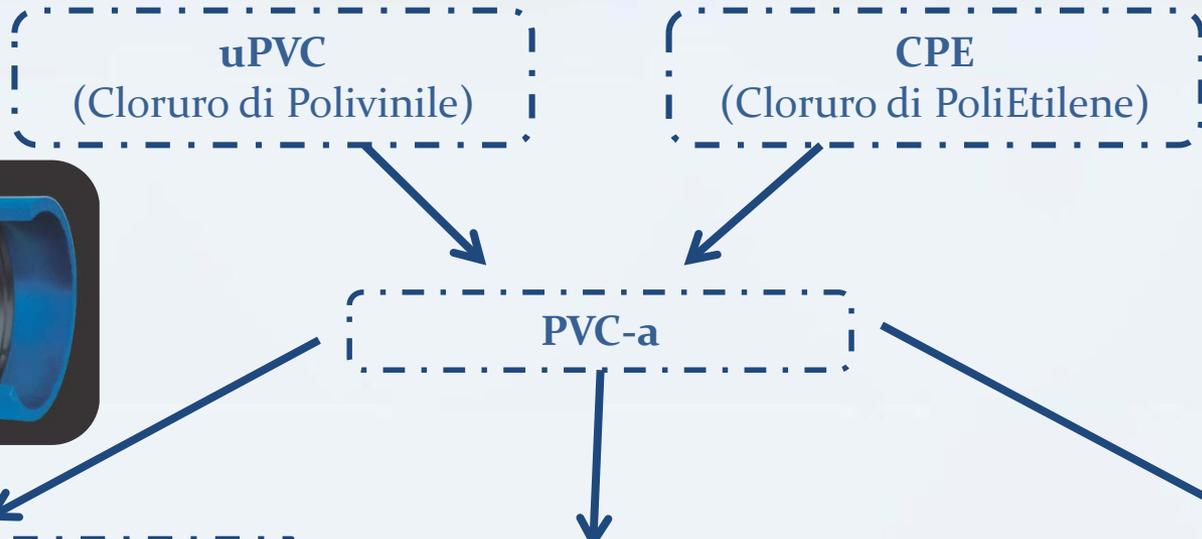
LabJack

Calibrazione



Tubazione in PVC-a

Lo studio sperimentale è stato condotto su una tubazione Blu Power in **PVC-a**, lega polimerica di ultima generazione.



Caratteristiche Blu Power Crack Resistant:			
Peso specifico	γ	1.400	Kg/m ³
Modulo di Young	E	2.500	Mpa
Coefficiente di Poisson	ν	0,38	-
Coefficiente di dilatazione termica	α	7×10^{-5}	-

- ❖ Resistenza alla corrosione chimica ed elettrochimica
- ❖ Ridotta scabrezza
- ❖ Elevata resistenza alla propagazione della cricca

- ❖ Estrema duttilità
- ❖ Peso inferiore a parità di diametro rispetto ai tradizionali tubi in resina
- ❖ Atossicità certificata



Test Sperimentali

Prove Statiche

Prove Dinamiche

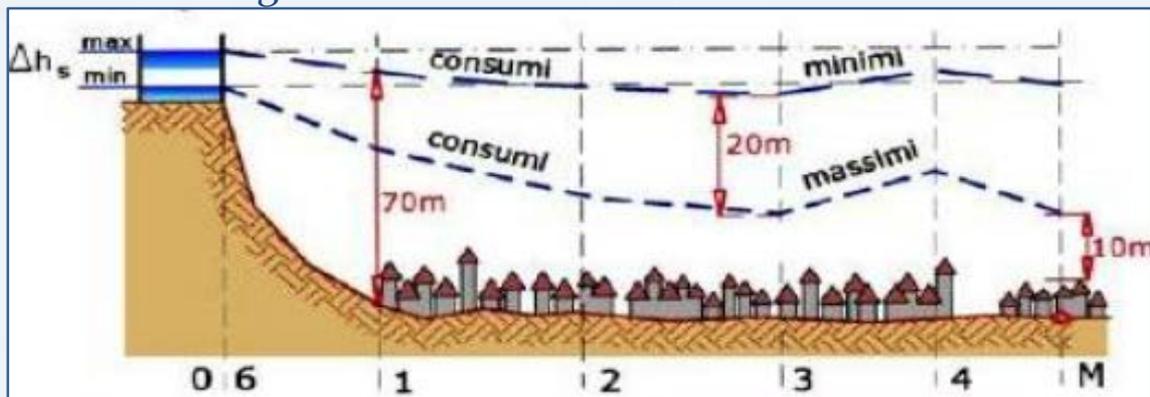
Stima dei coefficienti
 α e β - *Leakage Law*
 μ e ν - *FAVAD*

Caratterizzazione del legame
intercorrente tra Pressioni e
Perdite Idriche

Valutazione del
comportamento meccanico
del materiale costituente la
tubazione

Prove Statiche - Modellazione Teorica

Mediante questa tipologia di prova sono state simulate le condizioni di funzionamento notturno di una rete di distribuzione idrica, caratterizzate da pressioni pressoché costanti, a seguito della ridotta domanda idrica dell'utenza.



Piezometriche nell'ora di massimo e minimo consumo per rete con serbatoio di testata

Lo studio ha posto in evidenza il legame funzionale tra pressione e portata dispersa attraverso un foro longitudinale di forma rettangolare (2 cm x 2.5 mm) in una tubazione sollecitata da carichi piezometrici applicati staticamente, nel range di pressioni, tipico delle reti di distribuzione idrica, da 1,0 a 7,0 bar.



Foro di perdita realizzato in tubazione

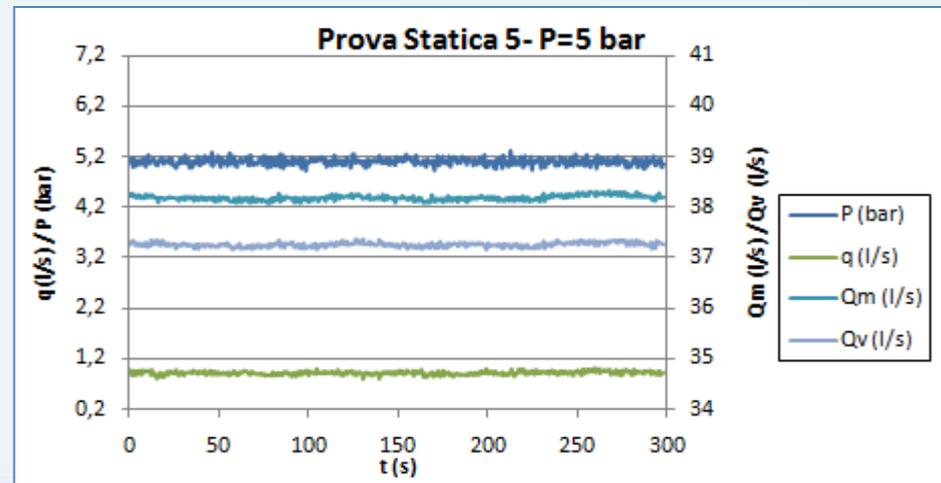
Prove Statiche - Analisi di Laboratorio

Per ciascuna prova è stato registrato nel tempo
(con frequenza di acquisizione dati pari a 0.5 s)
e successivamente diagrammato l'andamento delle:

Portate a monte Q_m (l/s) e a valle Q_v (l/s) della perdita, rilevate mediante Misuratori Elettromagnetici di Portata.

Pressioni P (bar) rilevate mediante un Trasduttore di Pressione.

Le Portate Perse q (l/s) sono state calcolate come differenza tra portate di Monte e di Valle.

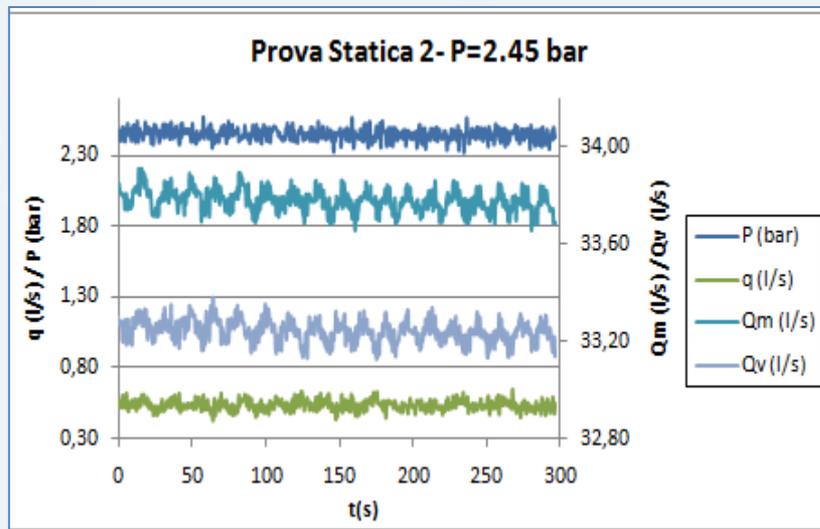


Elaborazione dati relativi alla singola prova

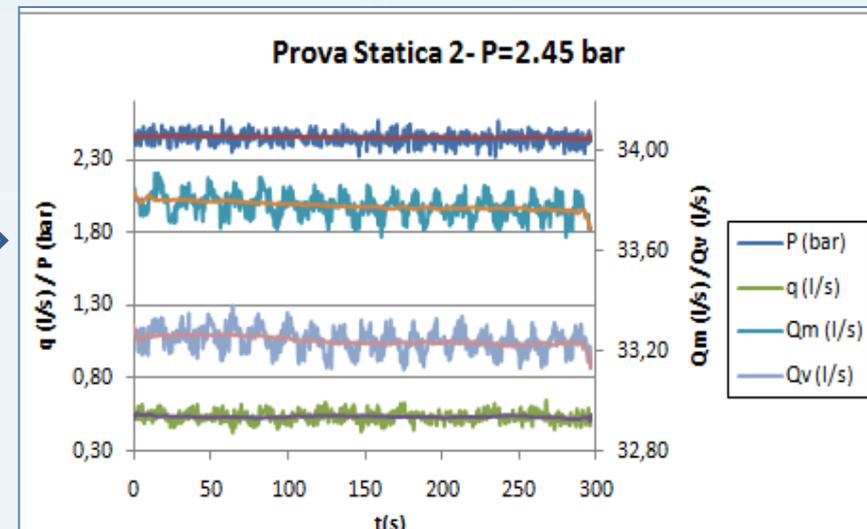
Prove Statiche - Dati Registrati

L'acquisizione dei dati, soprattutto per pressioni basse, ha mostrato una significativa variabilità, da attribuire alla presenza di errori sistematici nella strumentazione.

E' stato quindi necessario, per alcune prove, eseguire una filtrazione tramite *Media Mobile* dei dati.



Dati acquisiti



Dati filtrati tramite media mobile

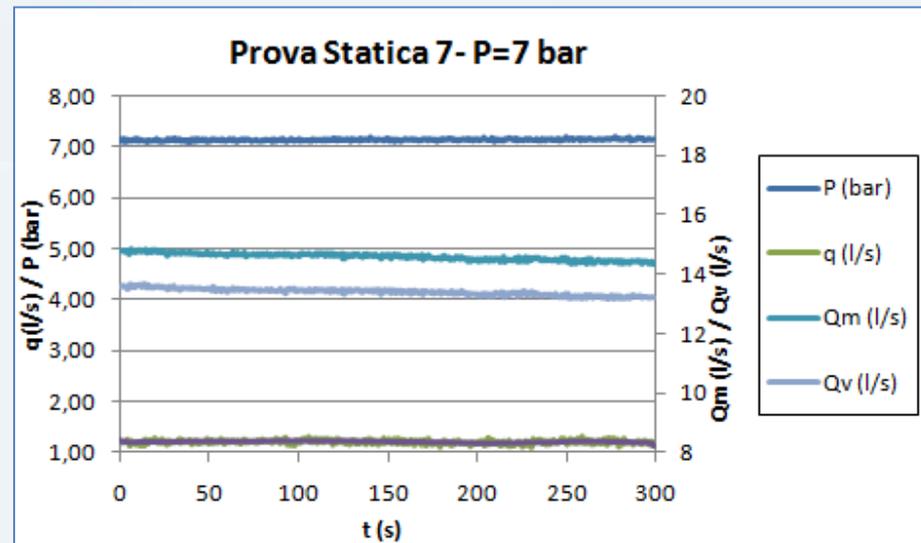
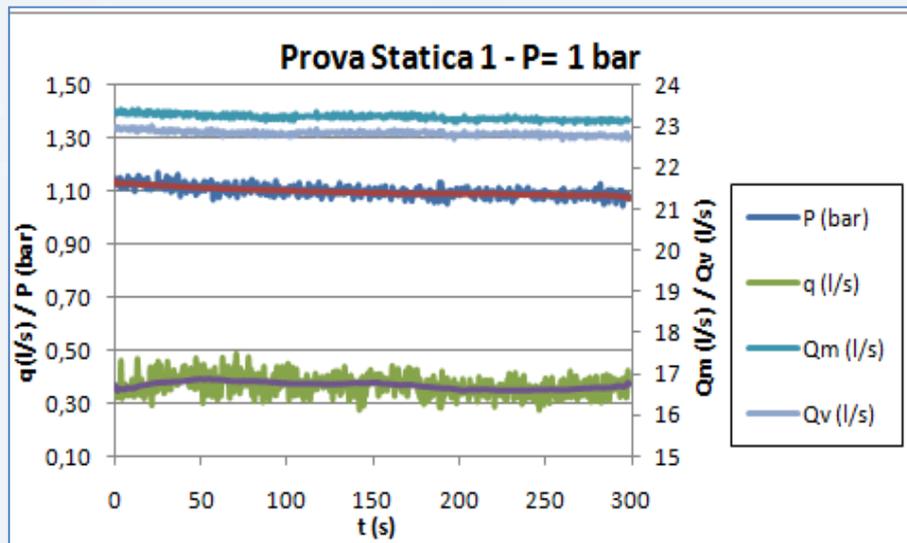
Prove Statiche - Dati Registrati

Sono stati effettuati circa **30 test statici**, aventi tutti durata media di **5 minuti**.

Inoltre sono stati eseguiti mantenendo sempre completamente aperta la saracinesca a monte e fissando di volta in volta il grado di apertura della valvola a fuso a valle dell'installazione sperimentale.

P (bar)	Q _m (l/s)	Q _v (l/s)	q (l/s)
1.100	23.228	22.861	0.368

P (bar)	Q _m (l/s)	Q _v (l/s)	q (l/s)
7.139	14.585	13.383	1.203



Dai dati acquisiti si può notare che, congruentemente con le ipotesi teoriche effettuate in precedenza, la portata persa aumenta all'incrementarsi della Pressione.

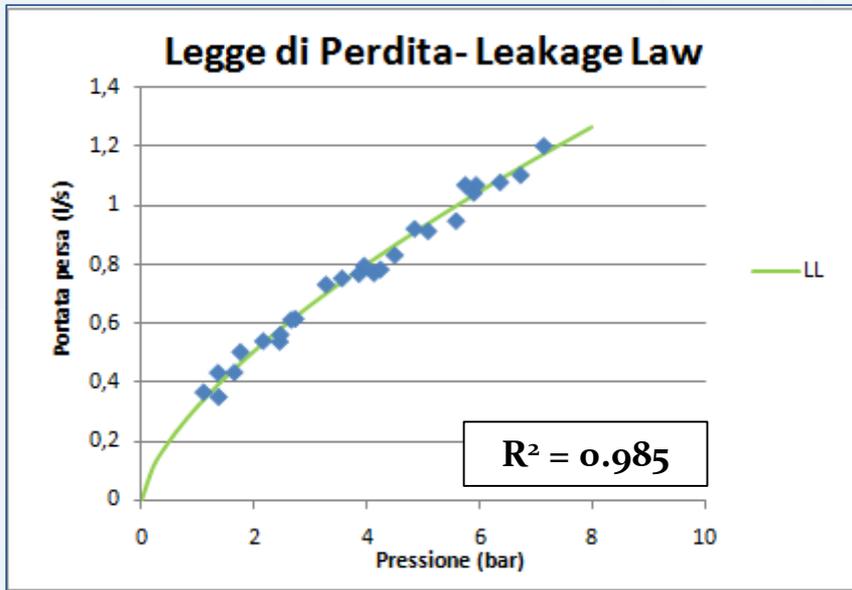


Prove Statiche - Risultati Sperimentali

Eseguendo l'interpolazione dei dati di Pressione e Portata mediati nel tempo, è stato possibile ricavare i coefficienti numerici:

α e β per la Leakage Law

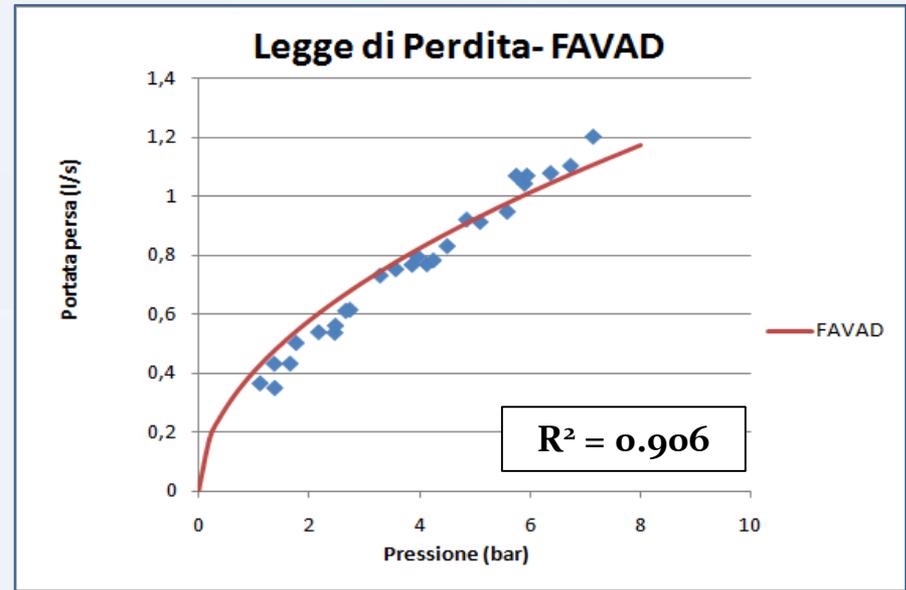
μ e ν per la legge FAVAD



$$Q = 0,319P^{0,662}$$

$$\alpha = 0,319$$

$$\beta = 0,662$$



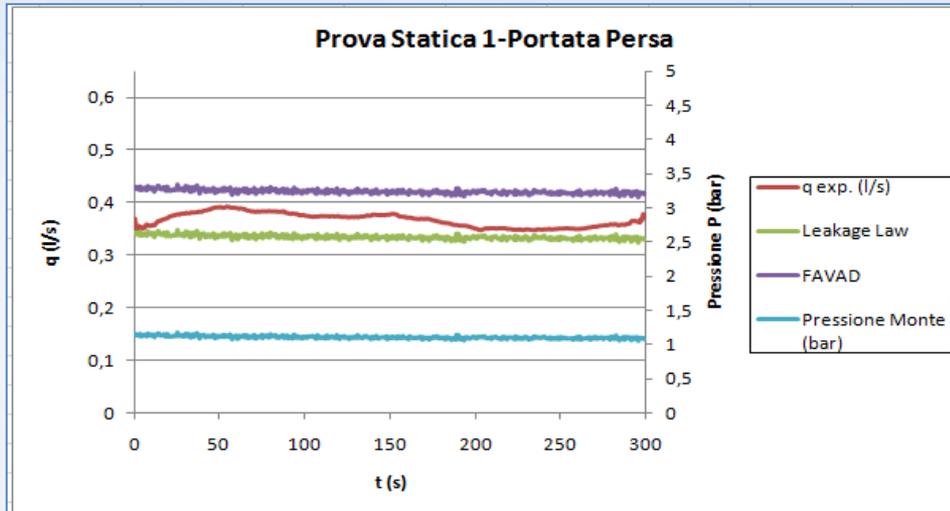
$$Q = 0,57A_n\sqrt{2g}[h^{0,510} + Ah^{1,50} + Bh^{2,510}]$$

$$\mu = 0,570$$

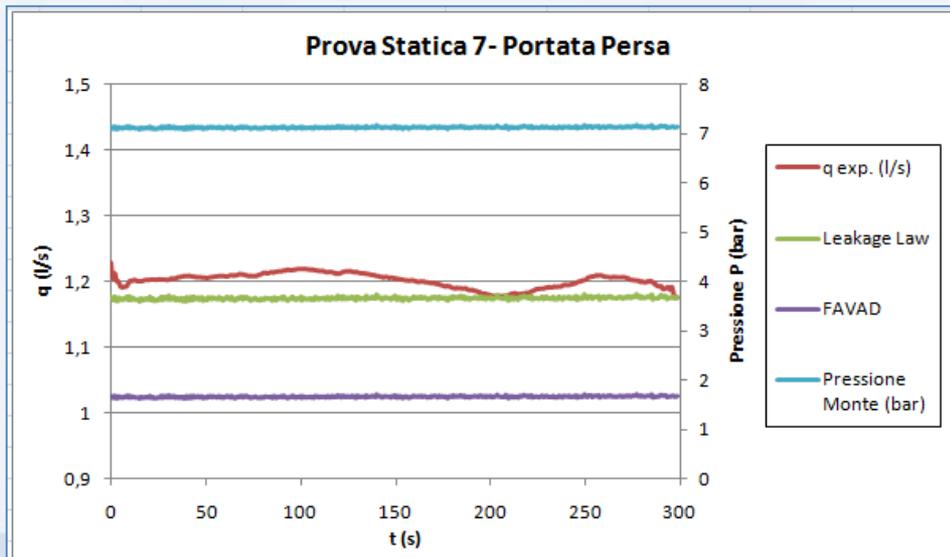
$$\nu = 0,510$$



Analisi delle Portate Perse

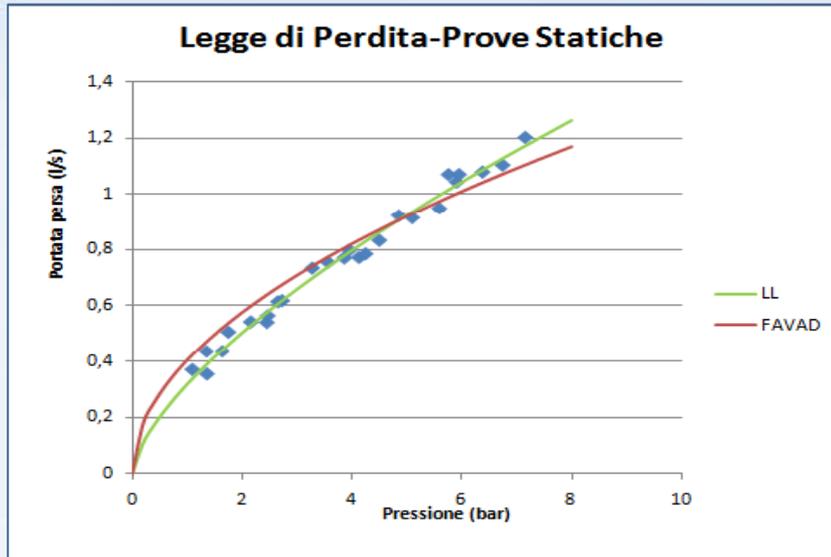


Dopo aver calibrato i due modelli di interesse, è stato possibile confrontare gli andamenti nel tempo delle Portate Perse registrati, con quelli ottenuti dalla loro applicazione.



Si noti come la formulazione elastica FAVAD vada a sovrastimare il valore delle portate perse a basse pressioni, mentre sottostimi significativamente la portata persa ad alte pressioni.

Risultati – Prove Statiche



Dalla sperimentazione è emerso come la legge che correla in maniera più efficace la relazione Pressioni-Portate Perse per tubazioni in PVC-a sottoposte ad un set di prove statiche è la **Leakage Law**. Tale risultato denota l'indipendenza del fenomeno da eventuali deformazioni elastiche dell'orifizio di perdita.

Probabilmente tale comportamento può essere ricondotto a due principali condizioni:

- tutte le prove effettuate sono state di breve durata, non permettendo l'instaurarsi nel materiale di deformazioni viscoelastiche, crescenti nel tempo in presenza di sollecitazioni meccaniche costanti;
- la tubazione oggetto delle attività sperimentali, essendo di nuovo utilizzo, non era stata soggetta a stati sollecitanti pregressi; l'orifizio, quindi, non ha subito precedenti deformazioni.



Test Sperimentali

Prove Dinamiche

Simulano la variazione di portata giornaliera, funzione della domanda idropotabile dell'utenza servita dalla rete idrica cittadina.

Le prove sono state eseguite regolando con diversi gradi di apertura la valvola a fuso posta a valle della tubazione simulante la perdita idrica, così da comportare la variazione delle portate erogate durante i test sperimentali.

Per tali prove è stata eseguita l'acquisizione e la registrazione dei dati con riferimento a 5 differenti Pattern di consumo, per un totale di **15 Test Dinamici**:

Pattern 1: prova di durata **25 min** e Pressione P variabile (tra 5,8 bar e 7 bar)

Pattern 2: prova di durata **20 min** e Pressione P variabile (tra 2,9 e 4 bar)

Pattern 3: prova di **40 min** e Pressione P variabile (tra 3 e 4,5 bar)

Pattern 4: prova di **9 min** e Pressione P variabile (tra 2 e 4 bar)

Pattern 5: prova di **14 min** e Pressione P variabile (tra 5 e 6,7 bar)

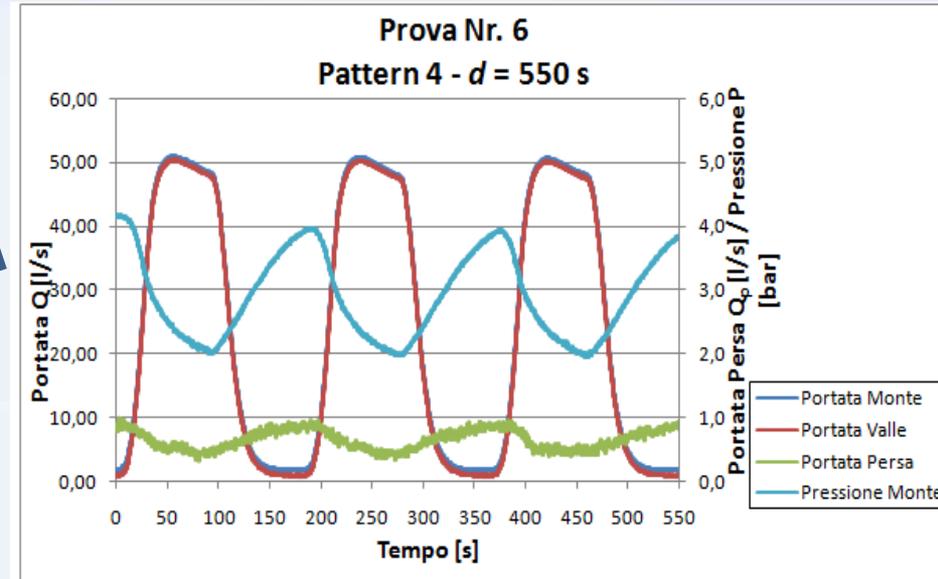
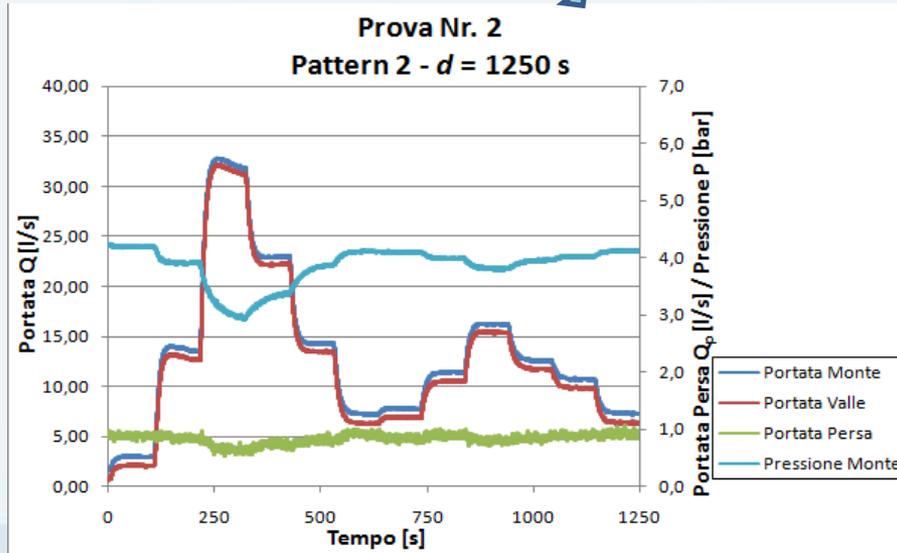


Prove Dinamiche

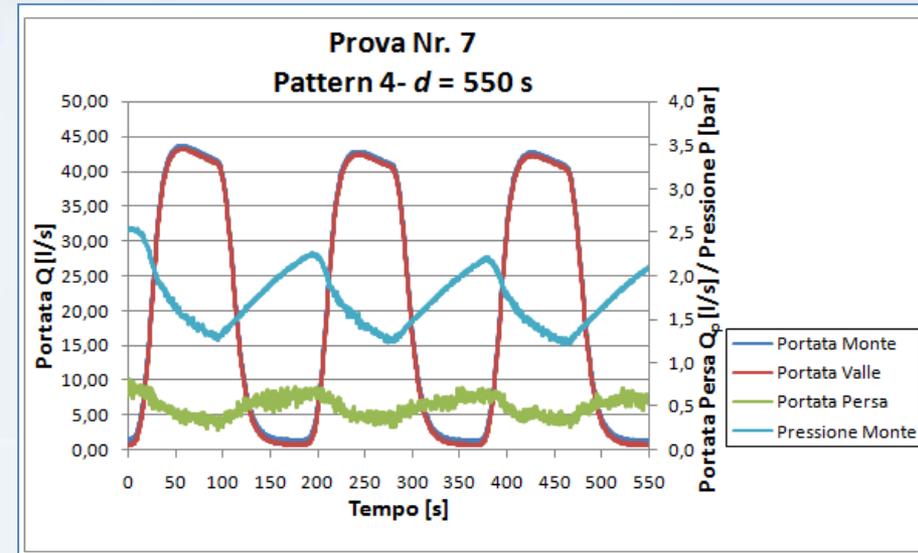
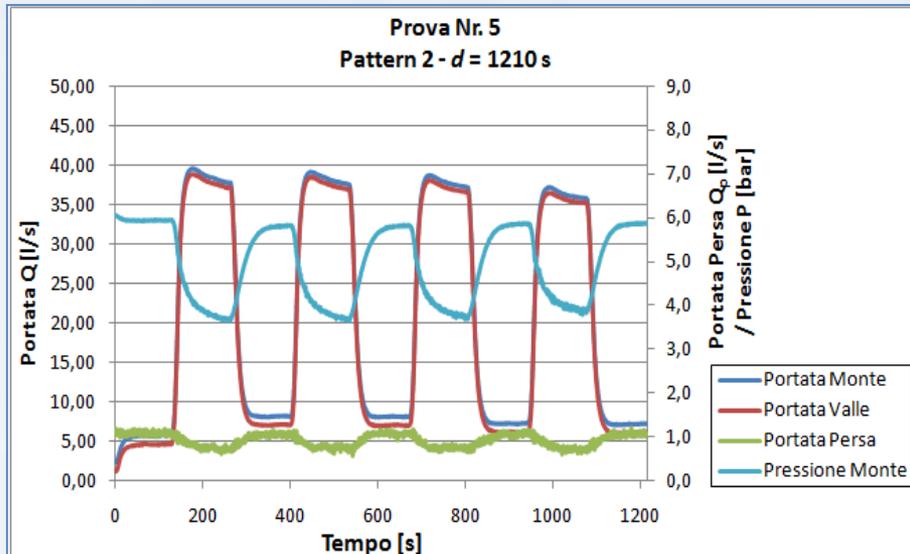
Si riportano, a titolo esemplificativo, due delle 15 Prove Dinamiche effettuate

*Prova 2
4 bar 20 min*

*Prova 6
4 bar 9 min*



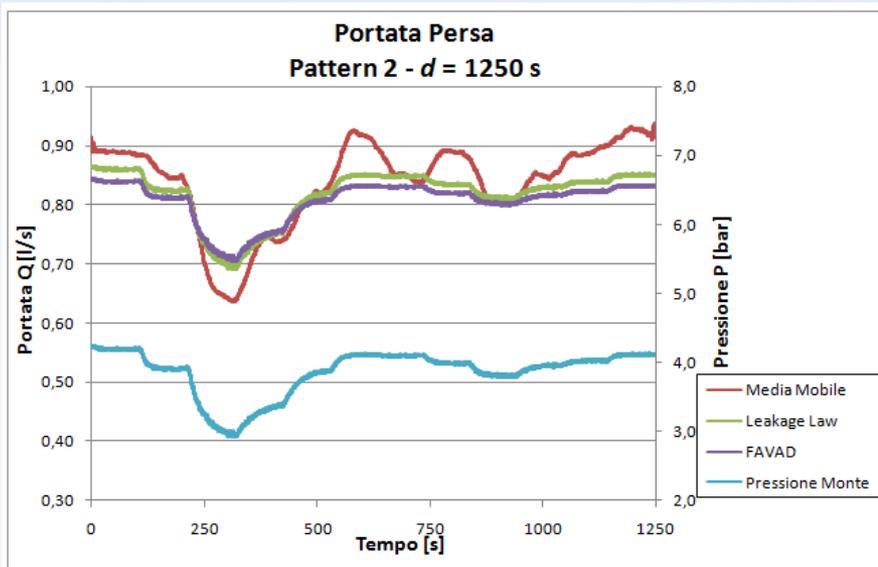
Prove Dinamiche



- ❑ Come si evince dai grafici, l'andamento delle portate disperse si attesta su valori limitati nell'ordine di 1,0 l/s, a seguito delle limitate dimensioni dell'orifizio. Il trend desunto è correlato alle Pressioni, secondo un andamento tale da definire un incremento al crescere del carico piezometrico e viceversa. Sono state osservate, infatti, Portate Perse minori di 1,0 l/s (circa 0,6 l/s) per prove con durata e Pressione di esercizio minori (Prova n° 7).
- ❑ E' inoltre da sottolineare come, a seguito di manovre brusche (apertura/chiusura) a causa dei transitori di moto vario ingenerati, si instaurino significative variazioni istantanee di portata.

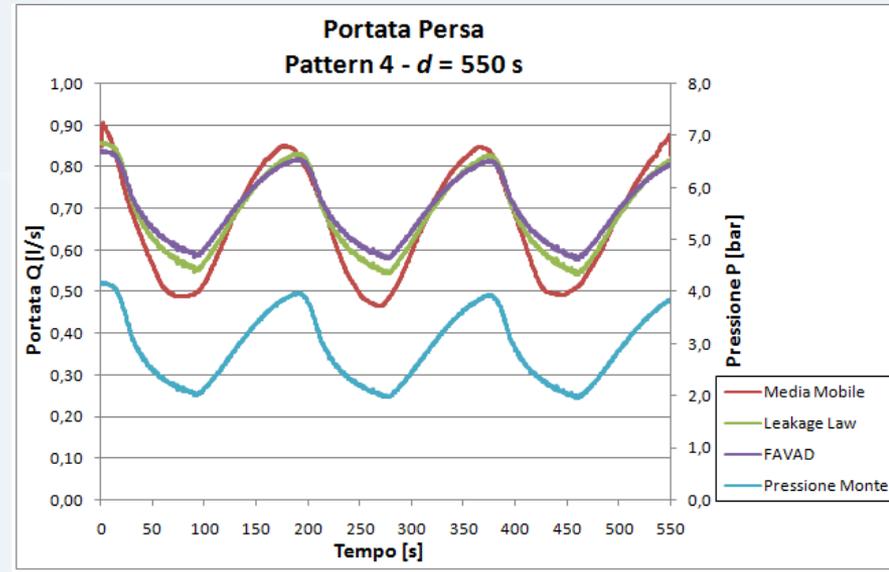


Prove Dinamiche



Mediante la calibrazione dei coefficienti (α , β , ν), si definiscono gli andamenti delle leggi di perdita (*Leakage Law* e *FAVAD*)

E' stato possibile calibrare i coefficienti implementando un codice di calcolo in Visual Basic, atto a minimizzare la sommatoria degli scarti quadratici tra valori sperimentali e numerici.

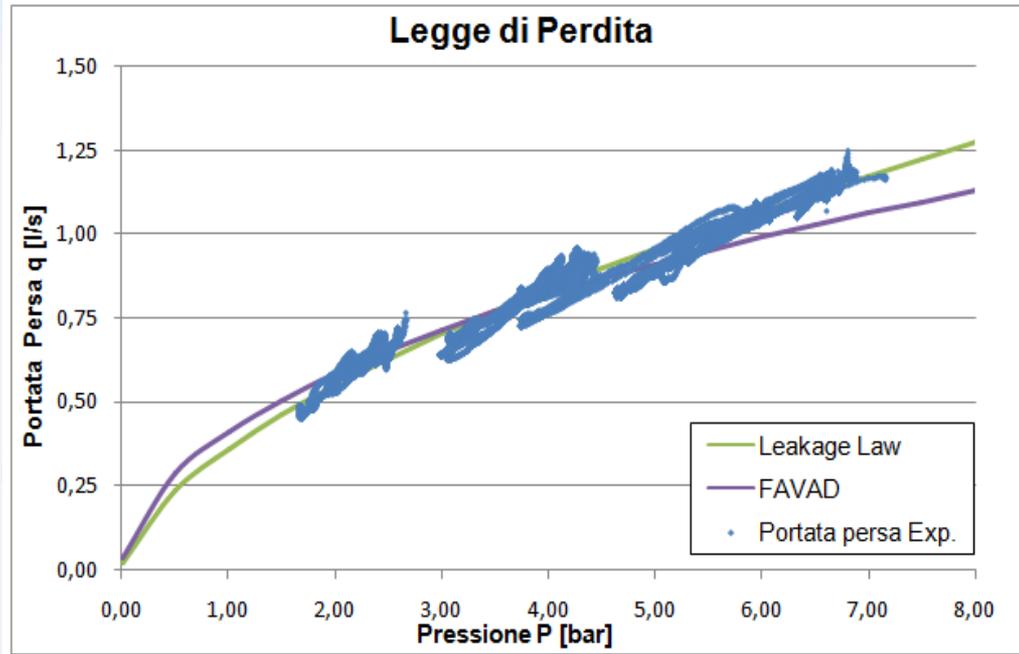


Coefficienti Calibrati

$$\alpha = 0,359 \quad \beta = 0,610 \quad \nu = 0,520$$



Prove Dinamiche



Per singola prova dinamica, ricavando una funzione interpolante della curva sperimentale, l'andamento può essere definito da una funzione pseudo-lineare



Per Pressioni fino a circa **3 bar**, la migliore correlazione numerico - sperimentale si ottiene con la **FAVAD**.
Per pressioni maggiori, invece, è risultata più efficace la **Leakage Law**

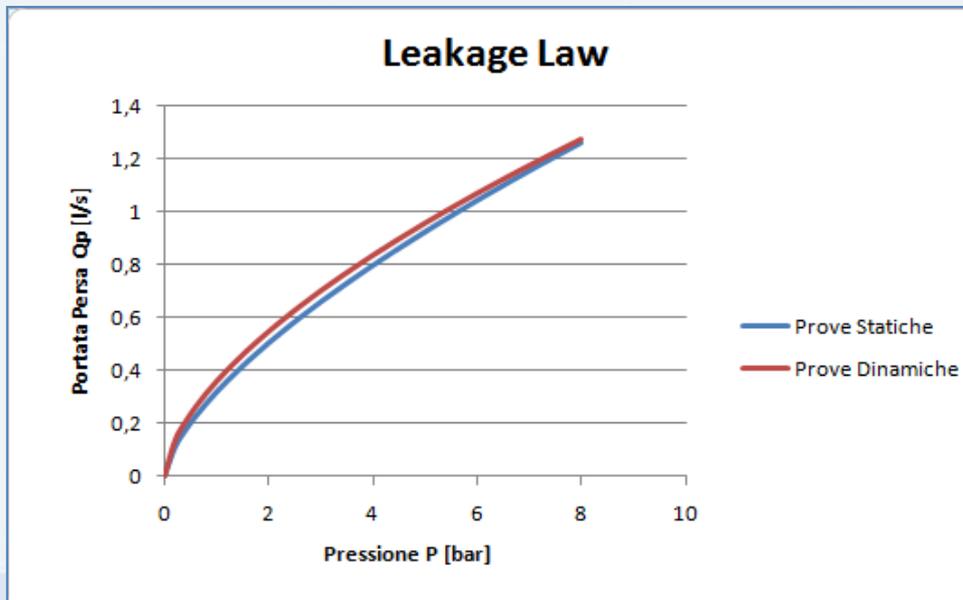
L'andamento lineare può essere dettato dai cicli di carico/scarico a cui è soggetta la tubazione plastica nelle singole prove, definendo una variazione, seppur limitata, dell'orifizio rispetto alla sua configurazione indeformata.



Conclusioni

La campagna sperimentale oggetto del presente elaborato ha riguardato la caratterizzazione dei coefficienti delle Leggi di Perdita per tubazioni in PVC-a, conseguendo i seguenti risultati:

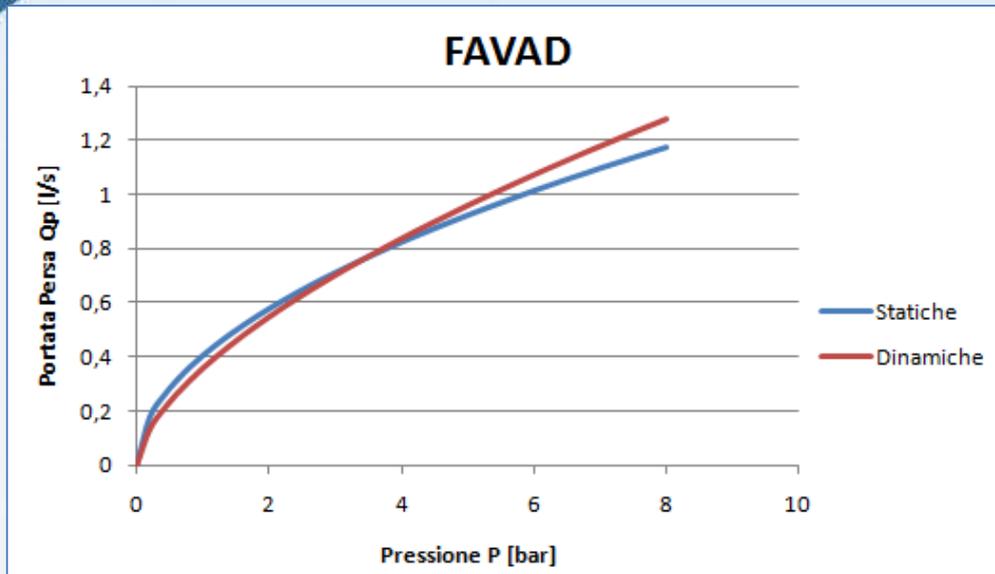
- L'elaborazione dei dati desunti dalle sperimentazioni di laboratorio non ha evidenziato differenze significative tra i coefficienti α , β e ν ricavati per Prove Statiche, rispetto a quelli ricavati da Prove Dinamiche.



Tipologia di Prova	α	β	ν
Statica	0.319	0.66	0.51
Dinamica	0.359	0.61	0.52

- il coefficiente β è risultato sistematicamente superiore al valore torricelliano 0,50, confermando i dati relativi alla letteratura ingegneristica di settore per materiali plastici.

Conclusioni



La legge di perdita FAVAD è risultata tra le due, la meno efficace nell'interpolazione dei dati sperimentali.

Si evince quindi che, nel range di pressioni investigato, l'effetto della deformazione dell'orifizio dovuta al comportamento visco-elastico del materiale, risulta pressoché trascurabile.

Si evidenzia inoltre come, anche per un materiale plastico quale il PVC-a, i valori di portata dispersa da tubazione lesionata, siano influenzati principalmente dalla Pressione, piuttosto che dal comportamento tenso-deformativo del materiale.

Si ritiene dunque che, oltre alle consuete campagne di monitoraggio, localizzazione e intervento, un efficace ed efficiente criterio per la riduzione dei valori delle Perdite Idriche possa essere rappresentato dal *Controllo Attivo* del sistema di distribuzione, mirato alla riduzione delle perdite tramite la minimizzazione dei carichi piezometrici in eccesso.



Grazie per l'attenzione.