UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

Analisi sperimentale della variazione delle perdite idriche nelle reti di distribuzione acquedottistiche

Experimental analysis of leakage variation in water distribution networks

Relatore

Prof. Luciano Soldini

Tesi di Laurea di

Alessandro Cicconi

Correlatrici

Prof.ssa Giovanna Darvini

Dott.ssa Martina Gambadori

A.A. 2025/2026

Sommario

1. INTRODUZIONE 1

2. LA RISORSA IDRICA IN ITALIA 3

2.1. Analisi delle perdite 6

3. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE 8

3.1. Serbatoio di alimentazione 9

3.2. Pompa di mandata 10

3.3. Valvole motorizzate 12

3.4. Valvola a flusso avviato 13

3.5. Inverter 13

3.6. Data Logger 14

3.7. Pressurimetri 14

3.8. Misuratori di portata 15

3.9. Quadro elettrico 16

3.10. Scatola 17

4. DESCRIZIONE DELLA PROVA SPERIMENTALE 21

4.1. Metodologia di prova 21

4.2. Analisi dati 23

5. RISULTATI DELLE PROVE 30

5.1. Grafici delle singole prove 30

5.2. Grafici riepilogativi andamenti delle perdite 39

6. NORMALIZZAZIONE DEI RISULTATI 41

6.1. Normalizzazione dei fori 41

7. MODELLI DI PERDITA (LEGGE DI INTERPOLAZIONE) 49

8. CONCLUSIONI 52

9. BIBLIOGRAFIA 53

1. INTRODUZIONE

Fin dall'antichità, l'uomo si è ingegnato nella progettazione e nella costruzione di opere che permettessero l'approvvigionamento idraulico negli insediamenti. L'acqua è, senza dubbio, uno dei bisogni primari per esso e la sua gestione deve essere trattata con cura.

Nel mondo, specialmente negli ultimi anni, gli eventi naturali anomali di grandi portate sono un tema molto discusso. Tra questi vi è quello riguardante la siccità: sempre più zone vengono colpite da periodi di forte scarsità idrica. Questo accade anche in alcune regioni della penisola italiana, tra cui Sicilia, Calabria e Sardegna.

Tra i principali protagonisti in questo scenario, figura l'insoddisfacente capacità delle infrastrutture idriche, in particolar modo le reti acquedottistiche. Dai dati di letteratura, emerge una problematica legata alla vetustà di queste ultime che, già gravate dalla forte urbanizzazione, porta ad un aumento dei guasti, che a loro volta generano un incremento di costi sia economici che sociali.

Una gestione efficace e sostenibile dell'acqua richiederebbe un continuo monitoraggio, con costante manutenzione e con informazioni capillarmente ottenute da analisi territoriali. La sfida maggiore per questo obiettivo, avendo a che fare con reti acquedottistiche datate, è data proprio dalla presenza di *perdite idriche* in condotta. I problemi ad esse legati sono sia di natura ambientale, per via dello spreco di risorse, ma anche finanziari, energetici e sociali.

Allo scopo di ridurre il numero delle perdite nelle condotte in pressione, nel corso degli anni sono stati condotti studi teorici sulla correlazione tra portata in uscita e pressione all'interno della condotta, grazie anche allo sviluppo di metodi pratici di rilevamento delle perdite. Nel presente lavoro di tesi si vuole analizzare sperimentalmente, in due casi differenti, il fenomeno della perdita in una condotta in pressione.

Per studiare le perdite si eseguiranno delle prove presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università Politecnica delle Marche utilizzando un impianto sperimentale per fluidi in pressione, in cui sono riproducibili le condizioni reali delle reti acquedottistiche e possono essere simulate rotture delle condotte e misurarne le grandezze idrauliche.

Lo scopo del seguente lavoro di tesi sperimentale è di trovare, per ciascuna perdita misurata, una correlazione tra la portata in uscita dal foro e la pressione in condotta al variare della dimensione del foro, della forma del foro e del materiale della condotta. Inoltre, si vuole altresì confermare le teorie e le leggi in uso nella scienza dell'idraulica, confrontando i valori ottenuti da prove sperimentali con la letteratura idraulica a riguardo.

2. LA RISORSA IDRICA IN ITALIA

La situazione idrica in Italia rimane, da diversi anni, affetta da gravi problemi. Secondo dati forniti dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ma soprattutto dall'ISTAT, nel 2024 in Italia sono stati prelevati 8,87 miliardi di metri cubi di acqua per uso potabile: il livello più basso degli ultimi 25 anni e il 3,0% in meno rispetto al 2022. [1]

L'Italia da oltre vent'anni è il Paese UE che preleva più acqua dolce per uso potabile, superando altri paesi, tra cui Francia e Germania (*Figura 1*). Il primato è accompagnato da un forte ricorso alle acque sotterranee, che rappresentano l'84,8% del prelievo totale. Inoltre, si conferma uno dei maggiori utilizzatori d'acqua in Europa, seconda solo all'Irlanda, con un dato pro capite di 150 metri cubi annui per abitante e di 220 litri al giorno (180 litri di media europea). [1]

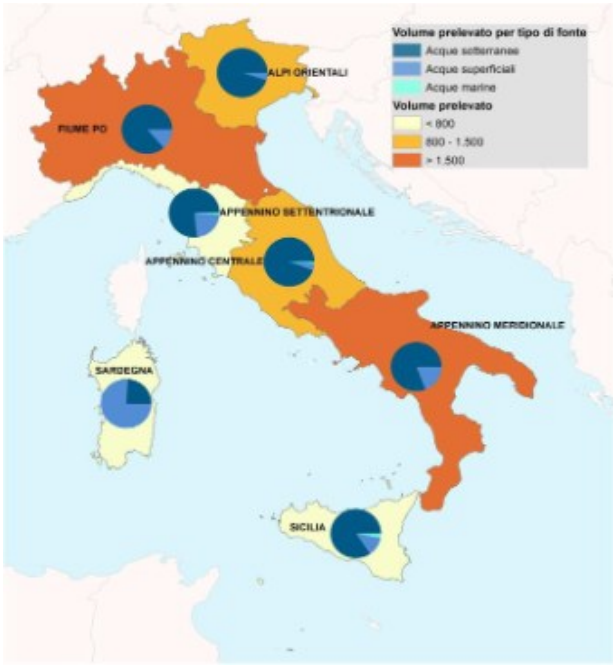


Figura 1: *Censimento delle acque per uso civile (ISTAT).*

Nel 2024, i residenti coinvolti da misure di razionamento dell'erogazione dell'acqua sono stati oltre un milione, circa il 6% della popolazione, in aumento rispetto ai 760mila dell'anno precedente. I comuni sono passati da 14 a 17, con maggiori criticità nel mezzogiorno, in particolar modo in Sicilia.

Nel 2025, invece, il 10,2% delle famiglie ha dichiarato di aver riscontrato un'irregolarità nel servizio di erogazione dell'acqua nell'abitazione. Nello stesso anno, tre famiglie su dieci dichiarano di non fidarsi dell'acqua di rubinetto; dato che nelle isole sale ad oltre cinque su dieci. [1]

Nel 2025 ci sono state precipitazioni (291 miliardi di m^3) inferiori del 9% rispetto all'anno precedente; la risorsa idrica rinnovabile disponibile, stimata in circa 128 miliardi di m^3, è inferiore del 19% rispetto al 2024 e, in generale, si colloca in una tendenza negativa osservata dal 1951 ad oggi. [2]

Il settore che più pesa nel consumo idrico italiano è quello dell'agricoltura (56-66%), seguito da quello dell'uso civile (24-31%) e infine quello industriale (12-13.6%). Nel 2024, per quanto riguarda il settore dell'agricoltura, oltre il 90% delle aziende agricole italiane ha segnalato difficoltà legate all'irrigazione. Nel mezzogiorno la quota sale al 97,5%, nelle isole il 98,8%. A livello nazionale, la principale fonte è l'acquedotto o il consorzio di bonifica, rifornente il 61,3% della superficie irrigata totale. Nel Centro e nel Sud Italia, invece, prevalgono metodi di autoapprovvigionamento, che soddisfano il 69,2% della superficie irrigata (*Figura 2*). [1]

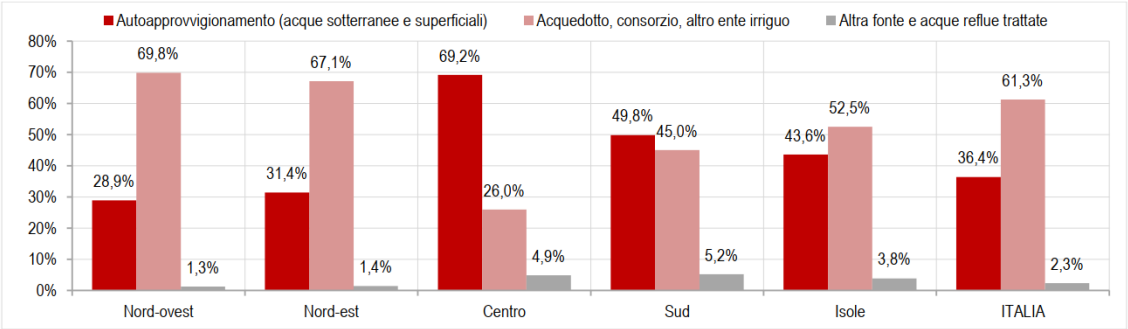


Figura 2: *Indagine sulla struttura delle aziende agricole (ISTAT).*

La parte più delicata del problema è quella delle infrastrutture. Secondo i dati ISTAT, oltre il 42% dell'acqua immessa in rete viene dispersa, con uno spreco stimato pari a 3,4 miliardi di metri cubi all'anno. Le perdite si manifestano in maniera molto disomogenea sul territorio, con un profondo divario tra Nord (33,5-37,2%) e Sud (50,5-51,9%).

In alcune province le percentuali sono anche più elevate. Ciò è dovuto anche e soprattutto all'età delle reti idriche: si stima che il 25% abbia oltre 50 anni e che il 68% della rete di cui si conosce l'età abbia più di 30 anni.

In risposta a tutte le problematiche sopra descritte, sono stati avviati alcuni piani di investimento, come ad esempio il PNIISSI e i fondi PNRR destinati a queste tematiche.

Il PNIISSI (Piano Nazionale di Interventi Infrastrutturali e per la Sicurezza nel Settore Idrico) è uno strumento strategico, adottato con DPCM del 17 ottobre 2024, prefissa come obiettivo primario quello di ridurre le perdite di risorse idriche. Include 418 proposte per un valore complessivo di circa 12 miliardi di euro. Il primo stralcio, già finanziato, conta 66 interventi distribuiti in 19 regioni per oltre 954 milioni di euro.

Il MIT ha già programmato e finanziato 565 interventi per un importo di circa 5 miliardi di euro. È stato attivato uno strumento finanziario aggiuntivo, con un bando da un milione di euro per sostenere la riduzione delle perdite attraverso la digitalizzazione delle reti.

In sintesi, i dati riguardanti la situazione idrica in Italia parlano di un paese con consumi idrici tra i più elevati d'Europa, aggravati da un sistema di distribuzione obsoleto e inefficiente con un elevato spreco di risorse. Le risposte istituzionali, sebbene imponenti, sono soltanto una fase iniziale di riparazione in relazione al lavoro che andrebbe portato avanti.

2.1. Analisi delle perdite

Le perdite idriche possono essere classificate in due categorie principali, quelle *reali* e quelle *apparenti*. Le prime sono dovute a problemi fisici delle infrastrutture mentre le seconde sono dovute ad errori di misurazione, guasti dei contatori o a consumi non autorizzati (3-5% delle perdite totali in Italia).

Le perdite reali sono caratterizzate da volumi d'acqua che fisicamente fuoriescono dal sistema. Generalmente rappresentano la componente maggiore sulle perdite totali, e tale considerazione vale anche in Italia. Tra le cause principali di perdite reali figurano:

- *obsolescenza delle infrastrutture*: in Italia, una quota rilevante della rete è stata posata ed installata tra gli anni '50 e '60. Dalle stime (ISTAT), risulta che il 60% delle reti idriche abbia più di 30 anni e che il 25% superi i 50 anni di vita operativa. L'obsolescenza delle condotte idriche porta inevitabilmente ad un aumento della probabilità di guasti e perdite.
- *rotture e guasti nelle condotte*: le rotture (o *bursts*) sono il risultato più evidente dell'obsolescenza. Sono generalmente causate da corrosione ed usura, dallo sfilamento dei giunti tra i tubi, da assestamenti che sollecitano le condotte e dall'uso di materiali meno performanti.
- *pressione di esercizio non ottimale*: l'uso di una pressione instabile o eccessiva può portare all'insorgere di criticità, a causa dell'aumento dello stress meccanico sulle tubazioni. Una gestione intelligente è una delle contromisure più efficaci.

Studi condotti evidenziano che l'entità della perdita aumenta all'aumentare della pressione. Riuscire a controllare la pressione di rete, riducendola quando non vi è necessità di pressioni elevate è un rimedio pratico e attuabile per contrastare il fenomeno delle perdite. Gli studi in tale campo sono mirati, per l'appunto, all'indagine della correlazione tra portata in uscita e pressione all'interno della condotta. Per ridurre le perdite, è necessaria l'individuazione dei

parametri che influenzano l'entità del volume perso e la definizione delle relazioni che descrivono il fenomeno.

Nell'idraulica, l'equazione che relaziona la portata Q_L in perdita da un foro al variare della pressione P, e che verrà usata anche in questo lavoro di tesi, è:

$$Q_L = aP^b$$

Questa equazione verrà ripresa, approfondita ed utilizzata nel capitolo 7, relativo ai modelli di perdita.

Nell'indagine sperimentale condotta, simulante una perdita idrica in un sistema in pressione, per tener conto di queste variazioni, si è operato su due materiali distinti (condotta in PVC e condotta in ghisa) e con due diversi tipi di rotture (foro circolare per la condotta in PVC e taglio longitudinale per la condotta in ghisa).

3. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE

L'impianto sperimentale utilizzato per questo lavoro di tesi è stato realizzato presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona (*Figura 3*). Si tratta di un impianto idraulico per fluidi in pressione, composto da un anello principale con tubi in PVC DN110 PN16 dalla lunghezza totale di 20 metri, in cui è inserita una condotta di by-pass, della lunghezza di 6 metri, che può essere sostituita e modificata secondo le necessità delle prove sperimentali. Per le prove oggetto della presente tesi sono state utilizzate una condotta in ghisa sferoidale DN 100 ed una in PVC DN110 PN16. L'impianto simula il funzionamento, sia in condizioni di normale esercizio che in condizioni di rottura, di una reale rete acquedottistica. [3]

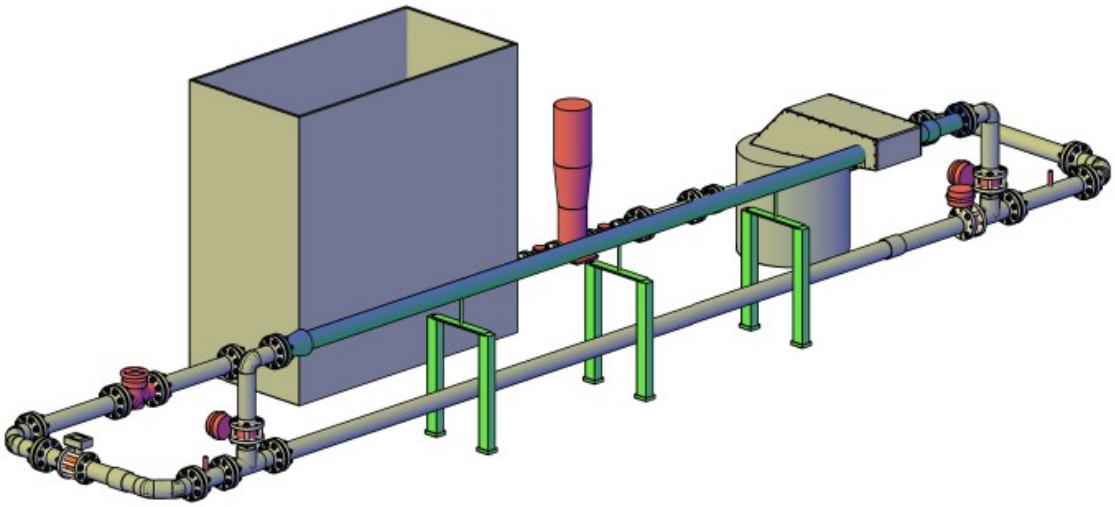


Figura 3: *Vista 3D dell'impianto.*

L'impianto origina da un *serbatoio a superficie libera* del volume di 3 m^3, mentre portata e condizioni di pressione sono garantite da un'*elettropompa multistadio verticale* Caprari CVX321, mentre una *valvola di regolazione* con otturatore parabolico è installata alla fine del circuito, prima dello sbocco nel serbatoio di raccolta. Questo dispositivo permette di regolare il funzionamento dell'impianto a diverse pressioni e portate, mentre le condizioni operative sono controllate da

un *misuratore di portata* elettromagnetico E-H Promag 10D80 e da due *manometri* a membrana.

Per riferirsi al funzionamento dell'impianto simulante la rottura della condotta si parlerà di *impianto aperto*, mentre per riferirsi all'impianto non inficiato da ciò si parlerà di *impianto chiuso*. L'azionamento di tre *saracinesche motorizzate* permette la deviazione del flusso dall'anello principale alla condotta di prova, a cui sono stati praticati fori per simulare due diverse condizioni di rottura, una circolare ed una di taglio. Nel caso di impianto aperto, l'acqua che esce dalla condotta attraverso la rottura viene deviata in un serbatoio di raccolta, a sua volta connesso tramite una pompa ad immersione al serbatoio di alimentazione.

3.1. Serbatoio di alimentazione

Il serbatoio di alimentazione (*Figura 4*) dell'impianto è costituito da una vasca in polipropilene di altezza 2m, larghezza 1m e lunghezza 2m. Un setto di altezza 1,5m permette la divisione della vasca in un serbatoio di alimentazione dell'impianto e in uno di raccolta, consentendo all'acqua in eccesso nel secondo serbatoio di riversarsi nel primo. Si evitano così fenomeni di cavitazione nella condotta di aspirazione della pompa, prelevante acqua in quiete del fondo del primo compartimento.



Figura 4: *Serbatoio di alimentazione.*

3.2. Pompa di mandata

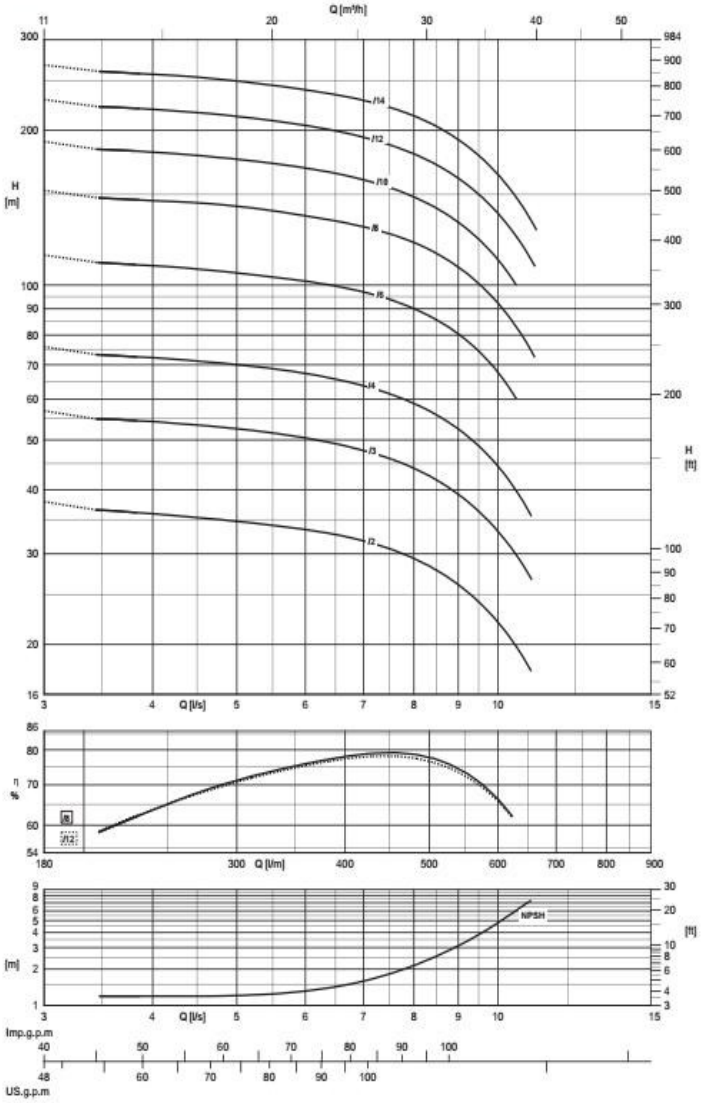
L'elettropompa utilizzata nello studio è una Caprari CVX321/3 multistadio verticale a tre stadi e con girante radiale (*Figura 5* e *Figura 6*). Ha una potenza di 5,5kW ed una frequenza nominale di 50 Hz. In condizioni di esercizio, la portata e la prevalenza sono rispettivamente di 7,5l/s e 45,98m. La portata minima è di 4l/s con una prevalenza associata di 56,93m, mentre la portata massima è di 10,2l/s con una prevalenza associata di 32,57m (*Figura 6*). L'elettropompa è equipaggiata con un inverter a 3 fasi, che permette di cambiare i giri del motore tramite frequenze che vanno dai 35Hz ai 50Hz, mentre aspirazione e mandata hanno diametro DN65 e PN16, collegate alla condotta attraverso due *valvole a membrana*.



Figura 5: *Elettropompa multistadio verticale a tre stadi con valvole a membrana.*

CVX 321 ErP Ready caprari

*e*nergy



Electrobomba tipo *Elektropumpe typ* **Elettropompa tipo**		Potencia motor *Motor-leistung* **Potenza motore**		Caudal *Fördermenge* **Portata**															
				[l/s]	0	3,6	4	5	6	7	8	9	10						
				[m3/h]	0	13	14,4	18	21,5	25	29	32	36						
				[l/min]	0	216	240	300	360	420	480	540	600						
Monofasica *Einphasig* **Monofase**	Trifasica *Dreiphasig* **Trifase**	[kW]	[CV]	Altura manometrica total *Förderhöhe* **Prevalenza manometrica totale**															
	CVX321/2+E0400T212-V	4	5,5	[m]	38	36,5	36	34,5	33,5	32	29,5	26	22						
	CVX321/3+E0550T222-V	5,5	7,5	[m]	56	55	54	53	50	47,5	44	39	33						
	CVX321/4+E0750T222-V	7,5	10	[m]	75	73	72	70	67	64	59	53	44,5						
	CVX321/6+E1100T222-V	11	15	[m]	114	110	109	106	102	97	90	80	68						
	CVX321/8+E1500T222-V	15	20	[m]	152	147	146	142	136	130	121	108	92						
	CVX321/10+E1850T222-V	18,5	25	[m]	190	183	181	176	169	160	148	133	112						
	CVX321/12+E2200T222-V	22	30	[m]	229	222	220	213	204	194	180	161	138						
	CVX321/14+E3000T222-V	30	40	[m]	268	260	257	250	240	229	213	192	164						
NPSH				[m]		1,2	1,2	1,2	1,3	1,6	2,1	3,1	4,8						
M.E.I. = 0.40																			

Cod. 996446C/01-21-copyright © 2009 Caprari S.p.A - All Rights Reserved

Figura 6: *Curve di prestazione dell'elettropompa Caprari CVX321 (dati riferiti alla curva /3).*

3.3. Valvole motorizzate

Nell'impianto sono presenti tre valvole motorizzate. La prima è situata all'inizio della condotta di by-pass dopo il raccordo a T, la seconda al termine della condotta di by-pass prima del raccordo a T, mentre la terza è posta sull'anello principale dopo il primo raccordo a T. Nel funzionamento normale del circuito le due valvole poste all'inizio e alla fine della condotta di prova sono chiuse, mentre la terza valvola sulla condotta principale rimane aperta. Il modello usato è la valvola motorizzata VB060 (*Figura 7*). È dotata di un otturatore a disco metallico che, comprime la tenuta che ricopre il corpo della valvola. L'attuatore guida l'apertura o la chiusura per intercettare completamente o parzialmente il fluido veicolato.

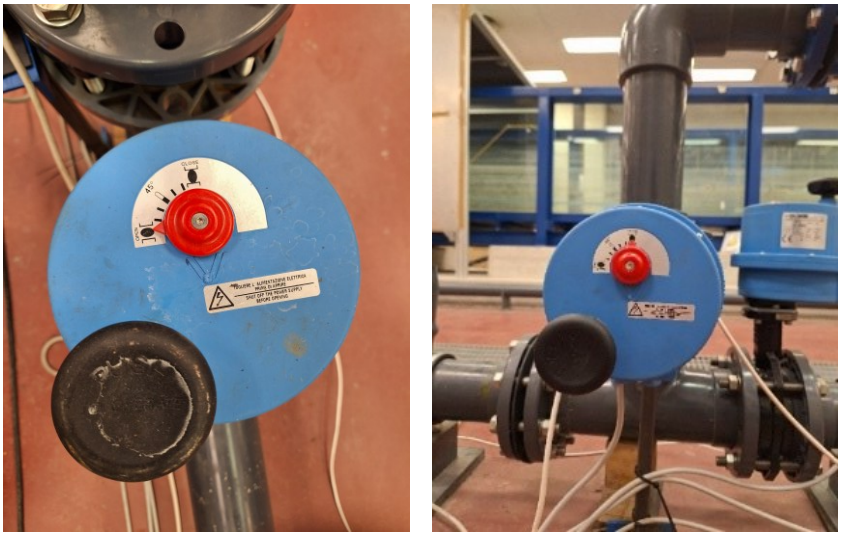


Figura 7: *Valvole motorizzate VB060.*

I parametri principali nominali della valvola motorizzata sono: bassa tensione nominale a 24 V, tempo di manovra 9 s, rotazione di 90°. Quando si deve effettuare una prova, il funzionamento delle valvole viene comandato mediante un pulsante che contemporaneamente apre le valvole a controllo della condotta di by-pass e chiude quella del circuito principale. Il tempo per eseguire questa manovra è di 9 s. Alla fine della prova, per mezzo del pulsante di arresto, le valvole eseguiranno la manovra opposta alla precedente, tornando nella situazione di normale funzionamento.

3.4. Valvola a flusso avviato

La valvola a flusso avviato (*Figura* 8), in ghisa sferoidale DN100 e PN16 con otturatore parabolico, è situata al termine del circuito, immediatamente prima della connessione con il serbatoio di scarico. L'apertura o la chiusura di questa valvola permettono la regolazione del funzionamento dell'impianto in termini di pressione e portata.



Figura 8: *Valvola a flusso avviato.*

3.5. Inverter

L'elettropompa è collegata ad un *inverter trifase* (*Figura 9*). Tale inverter permette la variazione di giri del motore in base alla frequenza scelta, che, per le prove effettuate, può essere 35Hz (valore minimo della pompa), 40Hz, 45Hz o 50Hz (valore caratteristico della pompa).



Figura 9: *Pannello di controllo dell'inverter.*

3.6. Data Logger

Lungo la condotta sono presenti un *misuratore di portata elettromagnetico* e due *pressurimetri a membrana*, collegati ad un registratore dati elettronico Ecograph TRSG35 della Endress-Hauser (*Figura 10: data logger*), che annota i valori istantanei di pressione e portata, permettendone l'estrapolazione in file "csv" e "xls". Uno schermo permette la visualizzazione dei dati: la linea blu e quella verde rappresentano i valori della portata istantanea in l/s (ottenuta dai misuratori di portata), la linea rossa e quella viola quelli della pressione istantanea in bar (ottenuta dai pressurimetri).

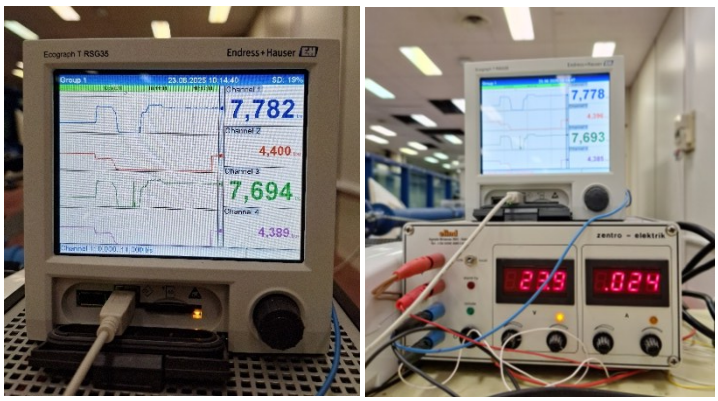


Figura 10: *Data logger.*

3.7. Pressurimetri

Il pressurimetro permette di conoscere la pressione dell'acqua nella condotta. Lungo l'impianto sono presenti due pressurimetri (*Figura 11*) Endress-Hauser Cerabar PMP21 a membrana, uno a monte ed uno a valle della condotta danneggiata. Possono misurare fino a 10 bar con una precisione di ±0,3% del valore letto.

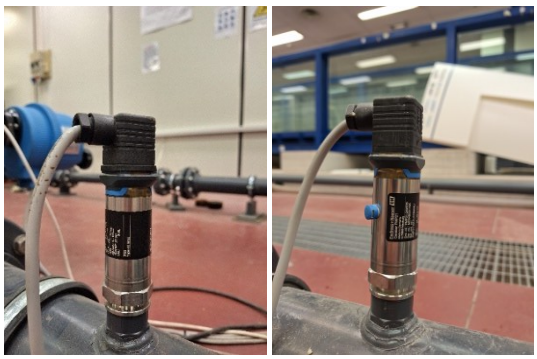


Figura 11: *Pressurimetri.*

3.8. Misuratori di portata

L'impianto è dotato di due misuratori di portata elettromagnetici. Il primo è il misuratore di portata elettromagnetico Endress-Hauser Promag 10D80 (*Figura 12*), localizzato subito a valle della pompa, ed ha un diametro DN80, mentre il secondo è un Endress-Hauser Promag 400 (*Figura 13*). Entrambi permettono di misurare portate fino a 10,5l/s con un errore del ±0,5% e una pressione massima di 16bar.



Figura 12: *Misuratore Endress-Hauser Promag 10D80.*



Figura 13: *Misuratore Endress-Hauser Promag 400.*

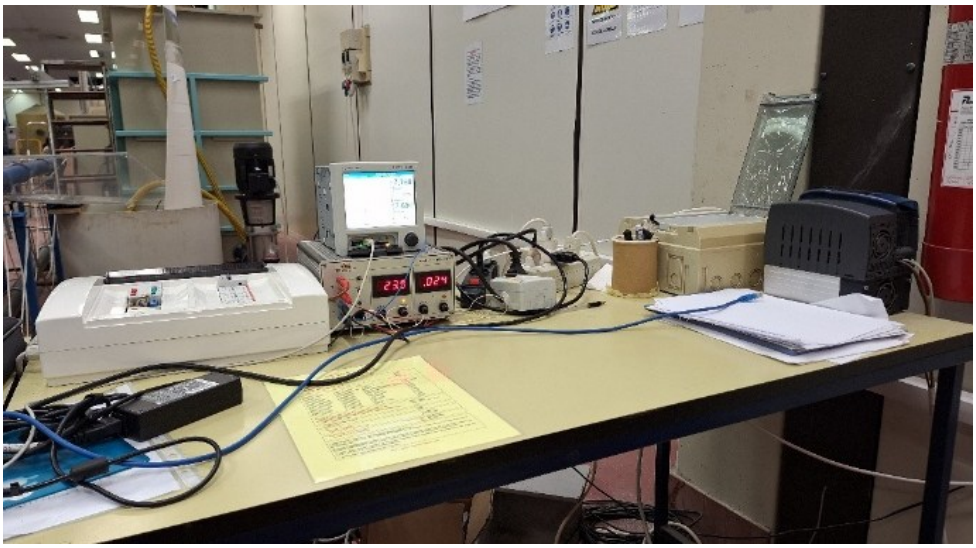


Figura 14: *scrivania per raccolta dati con strumentazione.*

3.9. Quadro elettrico

Il quadro elettrico (*Figura 15*) alimenta i circuiti per le valvole. È dotato di un salvavita che interrompe l'alimentazione dei circuiti in caso di pericolo, di cortocircuito e di sovraccarico. È composto da un interruttore a 24 V, dai pulsanti di accensione (in verde) e di arresto (in rosso). Lo schema elettrico è costituito da tre trasformatori, uno per ogni valvola (-V1, -V2, -V3), un interruttore, un pulsante per l'accensione e uno di arresto, una bobina di Relè (- KF1) e tre fusibili (-FC1, - FC2, -FC3) con la funzione di protezione delle valvole. Quando si aziona il tasto di accensione, la bobina di Relè viene percorsa da corrente elettrica, si genera un campo elettromagnetico che fa muovere la barra. In questo modo si apre e si chiude in maniera alternata il contatto. Significa che, quando si preme il pulsante per la prima volta il contatto si apre, quando si preme il pulsante di arresto il contatto si richiude. Questo succede solo per le due valvole che sono poste all'inizio e alla fine dell'impianto, dal momento che sono inizialmente chiuse, mentre per la valvola posta nel tubo di bypass, che inizialmente è aperta, avrà un comportamento opposto. La valvola infatti, lavora al contrario, avendo lo schema di contatto della bobina della valvola invertito e quindi al comando del pulsante di accensione, essa si chiude.



Figura 15: *Quadro elettrico.*

3.10. Scatola

Come preannunciato, le prove svoltesi si divideranno in due categorie, in base ai fori praticati sulla condotta: fori circolari e fori non circolari (rottura a taglio – *Figura 16*). Per quanto riguarda la prima categoria, il contenimento dell'acqua fuoriuscente è affidato ad un tubo in plastica, raccordato tramite un collare di presa predisposto, che scarica l'acqua al serbatoio di raccolta. Nel caso di foratura a taglio, invece, una scatola, disegnata e realizzata per lo studio, permette il contenimento e la visualizzazione dell'acqua fuoriuscente.

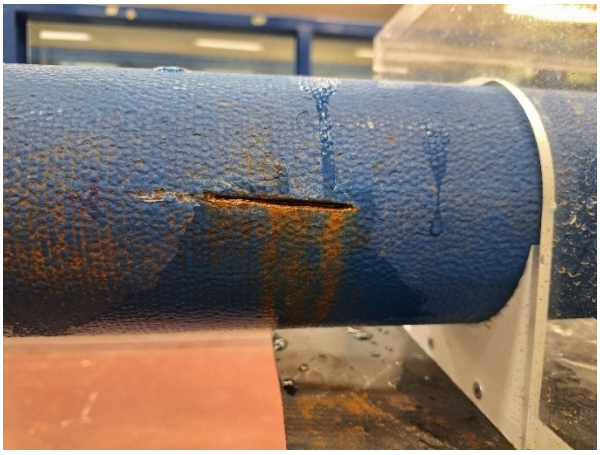


Figura 16: *foratura a taglio.*

L'idea iniziale fu quella di realizzare una scatola prismatica (*Figura 17*) che avvolgesse la condotta danneggiata a taglio con un'apertura dove l'acqua potesse defluire, posta frontalmente al taglio nella parte inferiore. Dopo diverse consultazioni con i tecnici e con l'azienda realizzatrice del progetto, si è arrivati alla versione finale del modello.

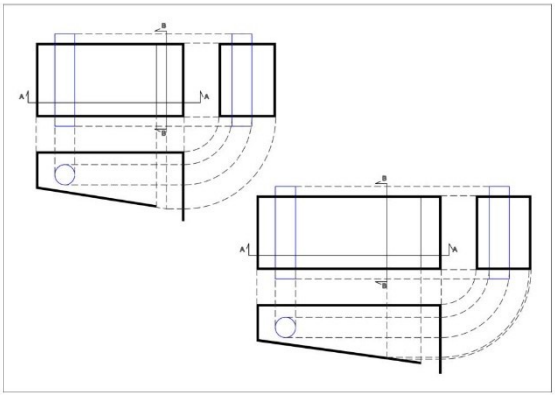


Figura 17: *Prototipi di scatola.*

Il modello (*Figura 18*) tiene conto sia della necessità di uno spazio dedicato ad un eventuale ristagno di acqua nella scatola, in attesa di smaltimento, e sia di uno smorzamento della forza del getto, realizzato inclinando la superficie d'urto dell'acqua di 45°. La scatola è composta, in totale, da cinque parti, assemblabili tra loro:

- la parte superiore (*pannello A-B*): l'unico pannello considerabile come pezzo unico, ottenuto attraverso una piegatura a 45° della parte antistante il foro, contiene il getto e lo indirizza alla vasca di contenimento;
- la parte inferiore e posteriore (*pannello D ed E*): svolgono il compito di eventuale contenimento; la lunghezza minore del pannello D rispetto ai pannelli A, C e C' permette di ottenere una notevole apertura attraverso cui l'acqua può defluire velocemente nel serbatoio di raccolta;
- la parte laterale (*pannelli C e C'*): è composta da due pannelli speculari tra loro, a loro volta divisi in due parti: una superiore e l'altra inferiore; la prima avvolge la condotta e funge da collegamento per tutte le varie parti, la seconda serve come base per la condotta e come isolante per fuoriuscite di schizzi.

Questi pannelli sopra descritti sono realizzati in plexiglass, per garantire visibilità durante le prove e sono stati connessi tra loro attraverso l'uso di viti a testa esagonale M4x30mm.

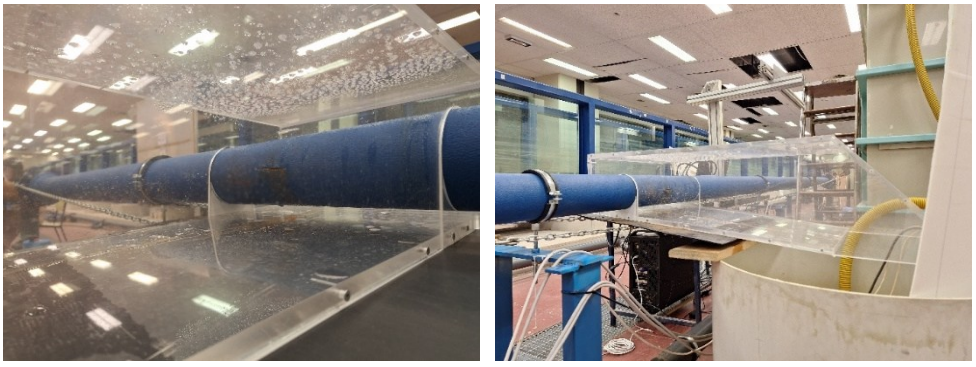


Figure 18: *particolare della scatola montata sulla condotta.*

Nella *Figura 19* e nella *Figura 20* vengono riportate due tavole rappresentanti lo sviluppo costruttivo e un modello in tre dimensioni della scatola.

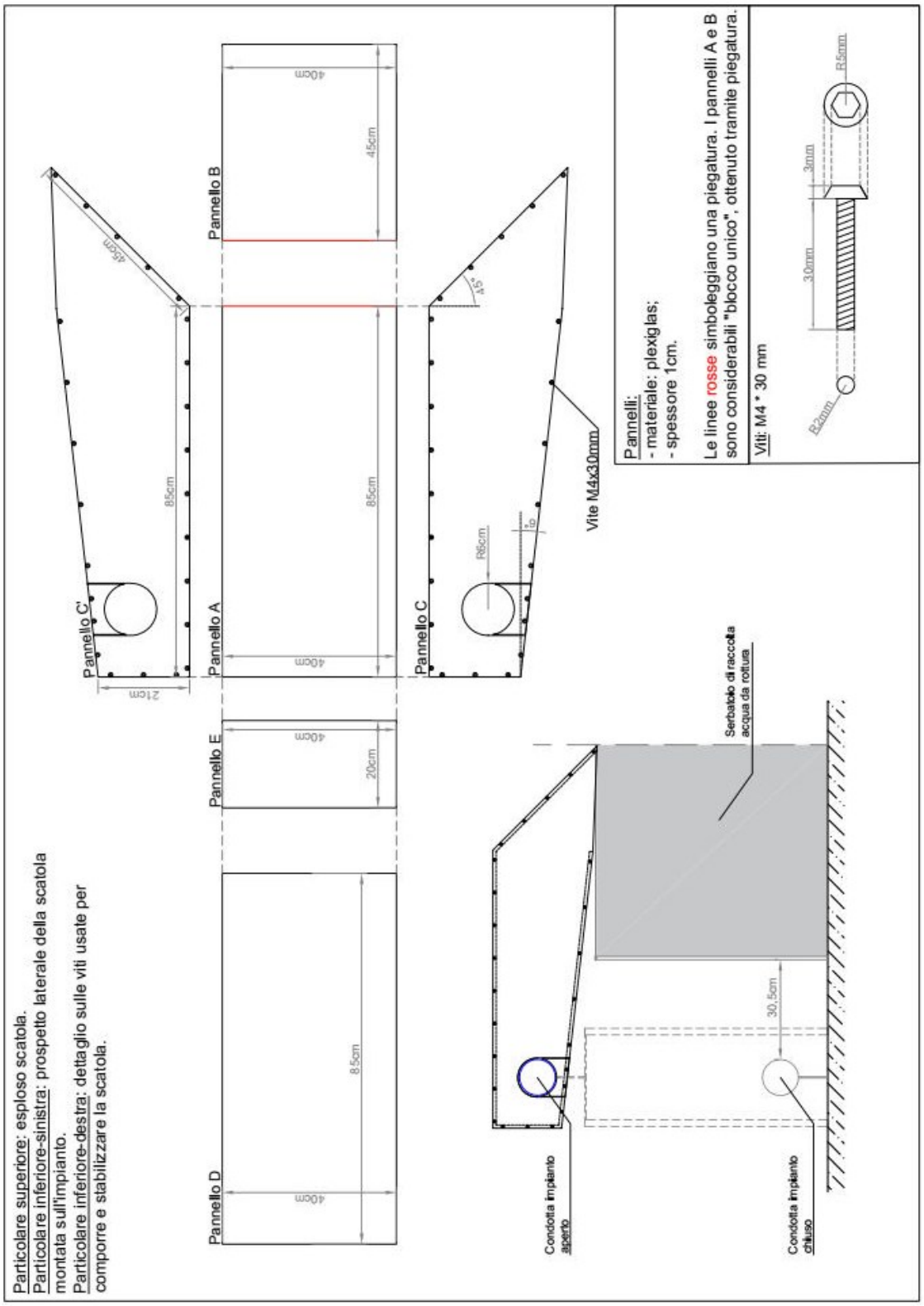


Figura 19: *Tavola con particolari della scatola.*

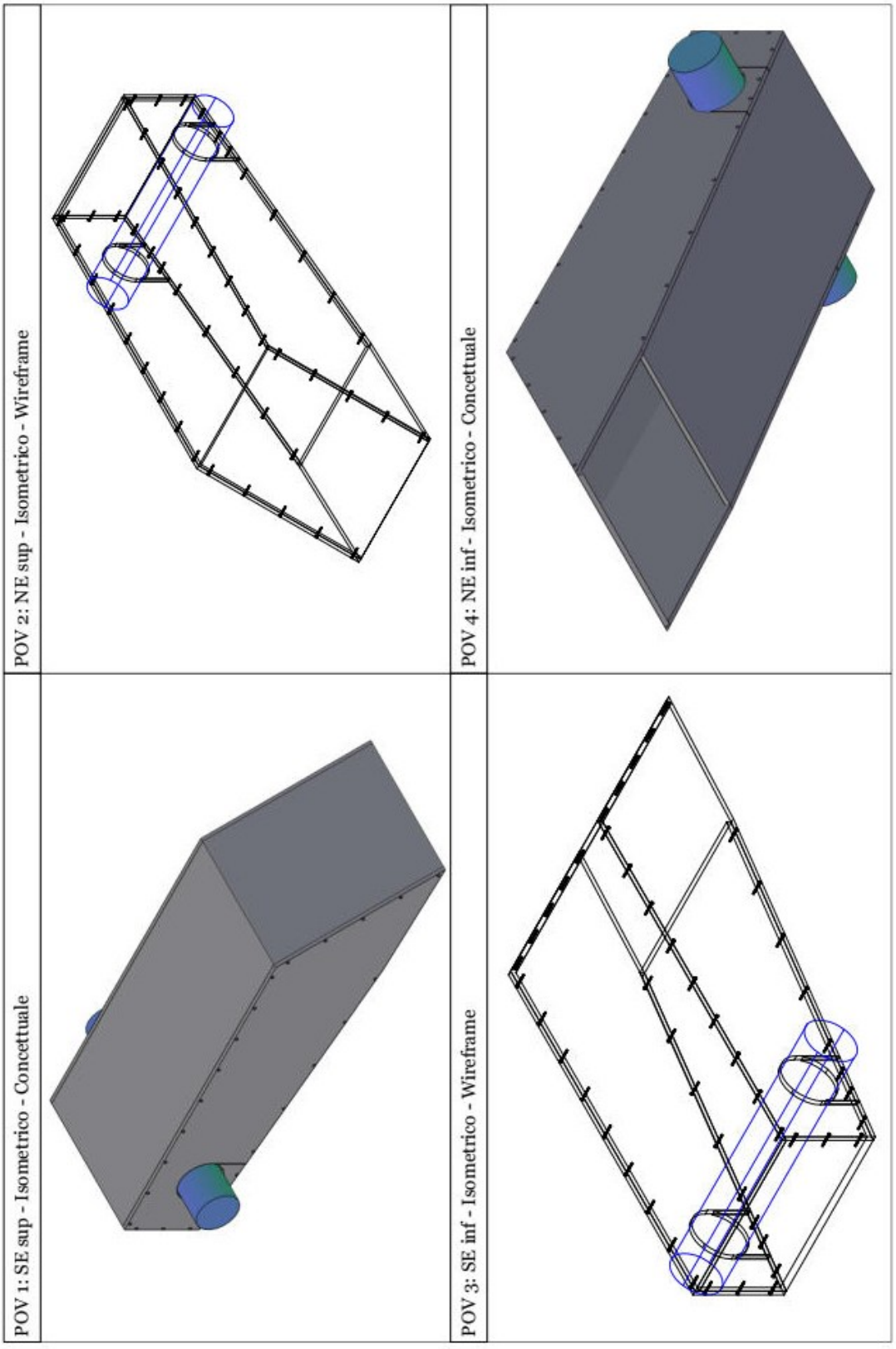


Figura 20: *Tavola con modello 3D della scatola.*

4. DESCRIZIONE DELLA PROVA SPERIMENTALE

4.1. Metodologia di prova

Le prove sono state effettuate seguendo precisi passi. Come prima azione, dopo l'avvio di ogni dispositivo elettronico (inverter, data logger, quadro elettrico), vengono registrati l'orario di inizio della prova e i valori di pressione e portata (valori estratti dal data logger). Questi dati sono fondamentali, come verrà poi spiegato nell'analisi dei dati. Successivamente, viene impostato l'inverter sulla frequenza desiderata. Ad esempio, nel caso di prima prova su un nuovo foro di studio, questa corrisponde a 35Hz. Viene così fatta circolare acqua nel circuito *chiuso*. A questo punto, con l'acqua circolante nell'impianto, si passa all'impostazione della portata al valore iniziale della prova, in base alla lettura del secondo misuratore di portata, l'Endress-Hauser Promag 400 (*Figura 13*), attraverso la chiusura della valvola a flusso avviato. L'utilizzo della valvola, infatti, consente di regolare i valori di portata e pressione all'interno del circuito, permettendo di effettuare le prove a determinati valori di questi ultimi. Il tempo scelto per stabilizzare i valori di portata e pressione all'interno dell'impianto chiuso è di tre minuti.

Dopo la calibrazione dell'impianto, la prova può iniziare. Ciascun foro è stato analizzato a 4 diverse frequenze dell'inverter: 35Hz, 40Hz, 45Hz, 50Hz. Ogni frequenza è stata analizzata due volte, per assicurare la validità e la ripetibilità dei risultati. I fori analizzati sono 7, le frequenze 4 e le prove 2, per un totale complessivo di 56 prove (*Figura 21*). Ogni prova è stata ulteriormente suddivisa in test grazie ad un range scelto di portate (regolate, per l'appunto, attraverso l'uso della valvola a flusso avviato) per ottenere i corrispettivi valori: 7,7 l/s, 7,5 l/s, 7,1 l/s, 6,7 l/s, 6,1 l/s, 5,7 l/s, 5,1 l/s, 4,5 l/s, 4,2 l/s, 3,5 l/s, 3,1 l/s e 2,9 l/s.

Per ogni portata, il test ha una durata complessiva di 69 secondi: 9 secondi di tempo di manovra della valvola e 60 secondi di test. Per tutti i fori, le frequenze,

le prove e i test questo range di portate è rimasto lo stesso, per permettere la confrontabilità tra le varie aree dei fori e tra i due materiali usati.

TUBO PVC FORO 11 mm											
35 Hz	Prova 1	7,7 l/s	40 Hz	Prova 1	7,7 l/s	45 Hz	Prova 1	7,7 l/s	50 Hz	Prova 1	7,7 l/s
		7,5 l/s			7,5 l/s			7,5 l/s			7,5 l/s
		7,1 l/s			7,1 l/s			7,1 l/s			7,1 l/s
		6,7 l/s			6,7 l/s			6,7 l/s			6,7 l/s
		6,1 l/s			6,1 l/s			6,1 l/s			6,1 l/s
		5,7 l/s			5,7 l/s			5,7 l/s			5,7 l/s
		5,1 l/s			5,1 l/s			5,1 l/s			5,1 l/s
		4,5 l/s			4,5 l/s			4,5 l/s			4,5 l/s
		4,2 l/s			4,2 l/s			4,2 l/s			4,2 l/s
		3,5 l/s			3,5 l/s			3,5 l/s			3,5 l/s
		3,1 l/s			3,1 l/s			3,1 l/s			3,1 l/s
		2,9 l/s			2,9 l/s			2,9 l/s			2,9 l/s
	Prova 2	7,7 l/s		Prova 2	7,7 l/s		Prova 2	7,7 l/s		Prova 2	7,7 l/s
		7,5 l/s			7,5 l/s			7,5 l/s			7,5 l/s
		7,1 l/s			7,1 l/s			7,1 l/s			7,1 l/s
		6,7 l/s			6,7 l/s			6,7 l/s			6,7 l/s
		6,1 l/s			6,1 l/s			6,1 l/s			6,1 l/s
		5,7 l/s			5,7 l/s			5,7 l/s			5,7 l/s
		5,1 l/s			5,1 l/s			5,1 l/s			5,1 l/s
		4,5 l/s			4,5 l/s			4,5 l/s			4,5 l/s
		4,2 l/s			4,2 l/s			4,2 l/s			4,2 l/s
		3,5 l/s			3,5 l/s			3,5 l/s			3,5 l/s
		3,1 l/s			3,1 l/s			3,1 l/s			3,1 l/s
		2,9 l/s			2,9 l/s			2,9 l/s			2,9 l/s

Figura 21: *esempio tabulato rappresentante la metodologia di prova.*

La prova inizia con l'avviamento dell'impianto a condizioni di frequenza, pressione e portata stabilite, a seconda della prova e del test da eseguire. Si attendono due minuti prima dell'apertura dell'impianto per permettere a portata e pressione di raggiungere le stabili condizioni stazionarie scelte, monitorate e registrate tramite il data logger. Dopo due minuti, l'impianto viene aperto. La valvola motorizzata devia il flusso dalla condotta per impianto chiuso nella condotta per impianto aperto. Il flusso d'acqua che fuoriesce nei 60 s di prova è raccolto in un serbatoio circolare dal diametro interno di 87 cm, altezza interna 71 cm e dalla capienza totale di 250 L. Nel caso di foro circolare l'acqua vi è convogliata tramite un tubo di gomma, nel caso di foro non circolare, grazie alla già descritta scatola. In entrambi i casi, una pompa ad immersione posta nel serbatoio di raccolta solleva l'acqua e la trasporta nel serbatoio di alimentazione. Alla fine del test, viene cambiato il valore della portata per passare al test successivo e, dopo due minuti, l'impianto viene nuovamente aperto per iniziare il test successivo. A prova ultimata, i valori di portata e pressione vengono scaricati dal database del data logger per successive analisi.

4.2. Analisi dati

Il data logger restituisce, dunque, quattro serie di dati: due forniti dai pressurimetri e due dai misuratori di portata. I dati degli strumenti vengono acquisiti con una frequenza di 1 Hz. Questi dati raccolti vengono analizzati tramite un foglio di calcolo Excel. In particolare, ciò avviene attraverso l'uso di tre tabelle. Nella *Figura 22* è rappresentata la tabella in cui vengono inseriti i quattro valori medi elaborati dal data logger, a impianto chiuso, durante lo svolgimento delle prove. Tali valori rappresentano la base dello studio: essi mostrano il comportamento del fluido in condizioni di normale esercizio e per questo verranno presi come riferimento per la valutazione delle perdite durante la fase di impianto aperto. Come mostrato, oltre ai vari valori registrati, sono presenti altre tre colonne: una per il valor medio dei due dati ricavati dal secondo misuratore per le due prove di ogni test, una per la deviazione standard (del secondo misuratore dalla media) ed una per la differenza di portata registrata tra il misuratore 1 e il misuratore 2.

	impianto chiuso						
	Q1 (l/s)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q2(l/s)	Q2 media	DEV.ST.	ΔQ
1	7.707492	1.290656	1.28118	7.647295	7.6533361	0.0085432	0.060197
	7.734033	1.280098	1.271623	7.659377			0.074656
2	7.583836	1.349836	1.340869	7.52959	7.5256967	0.0055062	0.054246
	7.56823	1.346115	1.337721	7.521803			0.046426
3	7.144279	1.552164	1.544869	7.104492	7.1032131	0.0018083	0.039787
	7.160164	1.553197	1.545803	7.101934			0.05823
4	6.788262	1.72523	1.719262	6.738016	6.7323852	0.0079636	0.050246
	6.782689	1.716377	1.710508	6.726754			0.055934
5	6.271984	1.926131	1.921508	6.221443	6.2149262	0.0092156	0.050541
	6.245393	1.921361	1.917164	6.20841			0.036984
6	5.771115	2.103164	2.100443	5.718738	5.7138525	0.0069088	0.052377
	5.756492	2.099344	2.097607	5.708967			0.047525
7	5.269705	2.264967	2.263492	5.233311	5.2333115	0.0014374	0.036393
	5.265311	2.25782	2.256361	5.231279			0.034033
8	4.745033	2.411967	2.411869	4.714557	4.711582	0.0042079	0.030475
	4.742049	2.406016	2.405623	4.708607			0.033443
9	4.358787	2.504279	2.505279	4.328295	4.3252377	0.0043238	0.030492
	4.351787	2.496508	2.497525	4.32218			0.029607
10	3.563557	2.654672	2.657016	3.546951	3.542582	0.0061785	0.016607
	3.557033	2.65259	2.655098	3.538213			0.01882
11	3.226984	2.717459	2.720049	3.203984	3.1972377	0.0095401	0.023
	3.211574	2.712279	2.714852	3.190492			0.021082
12	2.933557	2.747754	2.751049	2.917279	2.9171557	0.0001739	0.016279
	2.931475	2.754213	2.757885	2.917033			0.014443

Figura 22: *valori tabulati di impianto chiuso (esempio PVC 11mm).*

La formula usata per calcolare la deviazione standard è:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i - \mu)^2}{N}}$$

dove σ è, appunto, la deviazione standard, N è la dimensione della popolazione, x_i è il valore i-esimo della popolazione e μ e la popolazione media. Queste tre colonne contribuiscono a controllare l'errore dato dalla diversità dei due misuratori di portata, nonostante la sua entità si sia dimostrata trascurabile (0,3 – 0,9%) da studi condotti precedentemente.

Nella *Figura 23* è riportata la tabella in cui vengono riportate le medie della serie dei dati registrati in un intervallo di 40s durante la prova (per scartare la fase di apertura delle valvole ed i primi 10s necessari a far regolarizzare il flusso). Anche in questa tabella vengono calcolati la portata media misurata a valle dal secondo misuratore e la sua deviazione standard dalla media.

impianto aperto					
Q1' (l/s)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q2'(l/s)	Q2 media	DEV.ST.
8.000367	1.1313	1.103433	7.106233	7.107467	0.0017442
7.99532	1.13182	1.10354	7.1087		
7.8962	1.18668	1.15968	6.98392	6.97838	0.0078347
7.87764	1.18508	1.15754	6.97284		
7.54328	1.3567	1.33304	6.5882	6.58743	0.0010889
7.55136	1.35656	1.33302	6.58666		
7.29042	1.49878	1.47726	6.27226	6.26503	0.0102248
7.26626	1.4937	1.47216	6.2578		
6.89764	1.6658	1.6486	5.828	5.82507	0.0041436
6.88684	1.66354	1.64542	5.82214		
6.51778	1.8282	1.81298	5.38826	5.38401	0.0060104
6.50584	1.82408	1.80892	5.37976		
6.117578	1.977844	1.965667	4.948444	4.947682	0.0010779
6.10174	1.96988	1.95784	4.94692		
5.684025	2.127125	2.117075	4.4808	4.47629	0.0063781
5.67808	2.122	2.1118	4.47178		
5.3589	2.23424	2.2263	4.12072	4.11992	0.0011314
5.35886	2.22886	2.22104	4.11912		
4.68932	2.42224	2.41756	3.40222	3.40128	0.0013294
4.67378	2.4148	2.41088	3.40034		
4.37132	2.49768	2.495	3.0816	3.07679	0.0068024
4.364	2.48926	2.48708	3.07198		
4.11992	2.54706	2.54554	2.81822	2.81559	0.0037194
4.11526	2.54112	2.54018	2.81296		

Figura 23: *valori tabulati di impianto aperto (esempio PVC 11 mm).*

Infine, l'ultima tabella (*Figura 24*) è quella dedicata all'analisi delle perdite. Vengono calcolate le perdite di portata dal foro Q_L attraverso la differenza tra la portata misurata dal misuratore 1 e quella misurata dal misuratore 2 in impianto aperto. Anche in questo caso si tiene conto dell'errore intrinseco alla differenza dovuto alla sopracitata diversità dei misuratori di portata. Per fare ciò viene calcolato un nuovo valore della perdita Q_L ottenuto sottraendo anche il valore ΔQ calcolato dai dati a impianto chiuso (vedi *Figura 22*). Le colonne in giallo di destra riportano dunque i valori di perdita corretti rispetto all'errore di misura dello strumento e pertanto saranno quelli presi in considerazione.

WATER LOSS				Q1'-Q2'-ΔQ		
P(bar)	QL (Q1'-Q2')	media	DEV.ST.	QL	QL media	DEV.ST.
1.290656	**0.894133333**	0.890377	0.005313	0.833937	**0.82295**	0.015536797
1.280098	**0.88662**			0.811964		
1.349836	**0.91228**	0.90854	0.005289	0.858034	**0.858204**	0.000240184
1.346115	**0.9048**			0.858374		
1.552164	**0.95508**	0.95989	0.006802	0.915293	**0.910882**	0.006238537
1.553197	**0.9647**			0.90647		
1.72523	**1.01816**	1.01331	0.006859	0.967914	**0.96022**	0.01088133
1.716377	**1.00846**			0.952526		
1.926131	**1.06964**	1.06717	0.003493	1.019099	**1.023408**	0.006093406
1.921361	**1.0647**			1.027716		
2.103164	**1.12952**	1.1278	0.002432	1.077143	**1.077849**	0.000998759
2.099344	**1.12608**			1.078555		
2.264967	**1.169133333**	1.161977	0.010121	1.13274	**1.126764**	0.008451819
2.25782	**1.15482**			1.120787		
2.411967	**1.203225**	1.204763	0.002174	1.17275	**1.172803**	7.62168E-05
2.406016	**1.2063**			1.172857		
2.504279	**1.23818**	1.23896	0.001103	1.207688	**1.208911**	0.00172905
2.496508	**1.23974**			1.210133		
2.654672	**1.2871**	1.28027	0.009659	1.270493	**1.262557**	0.011223987
2.65259	**1.27344**			1.25462		
2.717459	**1.28972**	1.29087	0.001626	1.26672	**1.268829**	0.0029826
2.712279	**1.29202**			1.270938		
2.747754	**1.3017**	1.302	0.000424	1.285421	**1.286639**	0.001722558
2.754213	**1.3023**			1.287857		

Figura 24: *valori tabulati di perdita (esempio PVC 11mm).*

I dati del data logger, trasposti su questo foglio di calcolo, restituiscono anche il grafico in *Figura* 25, che rappresenta l'andamento temporale di portata e pressione misurata dagli strumenti durante una prova completa. Tali dati possono essere selezionati in base ad un range di tempo: questo consente di togliere dall'analisi i tre minuti iniziali di calibrazione dell'impianto che non devono essere considerati nella prova. Come si può notare dal grafico in *Figura 26*, sono riportati gli andamenti dei dati dei quattro strumenti: Q1 (misuratore a monte) e Q2 (misuratore a valle) per i misuratori di portata, P1 (pressurimetro a monte) e P2 (pressurimetro a valle per i due pressurimetri. I valori della portata descrivono un andamento discendente a gradini, corrispondente alla diminuzione di portata nel range scelto per lo studio, ovvero 7,7 l/s, 7,5 l/s, 7,1 l/s, 6,7 l/s, 6,1 l/s, 5,7 l/s, 5,1 l/s, 4,5 l/s, 4,2 l/s, 3,5 l/s, 3,1 l/s e 2,9 l/s. Discorso opposto per la pressione, che, crescendo al diminuire della portata, disegna un andamento ascendente a gradini. Da questo grafico si notano, inoltre, le variazioni di portata e pressione che contraddistinguono ogni test.

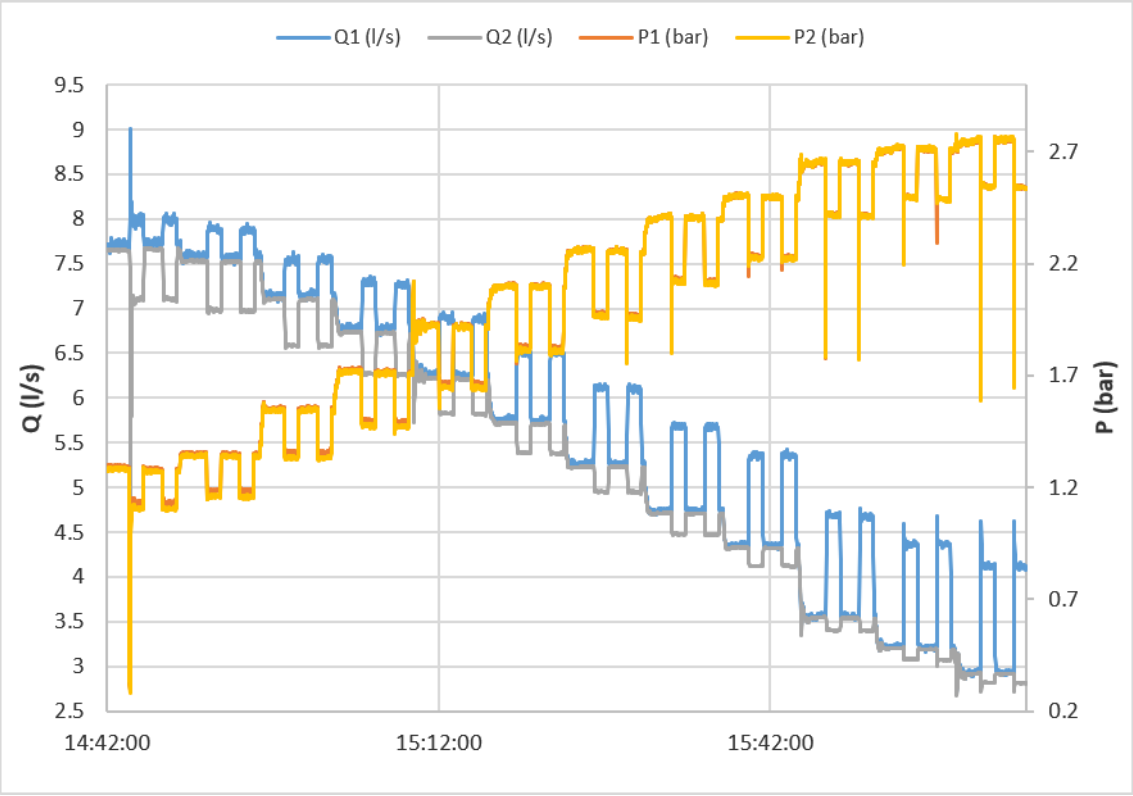


Figura 25: *esempio grafico portata-pressione-tempo, ottenuto dal caso studio PVC 11mm.*

Ad esempio, osservando la linea grigia nella *Figura 25*, rappresentante il valore della portata misurato dal misuratore a valle (*Q2*), si può notare un calo rispetto al valore di calibrazione, segno della perdita dovuta alla rottura.

Altri grafici presenti dal foglio di calcolo sono:

- il grafico *portata-pressione a impianto chiuso* (*Figura 26*), che riporta i valori di portata e pressione relativi al funzionamento ad impianto chiuso. in particolare, si fa riferimento al valore medio della media ricavata dai dati dei misuratori di portata e pressione di monte (M1) e di valle (M2), rispettivamente. Si nota che la pressione diminuisce all'aumentare della portata in condotta, comportamento atteso ed in linea con le leggi dell'idraulica. Viceversa, per portate molto basse la pressione aumenta, data appunto la loro proporzionalità inversa.

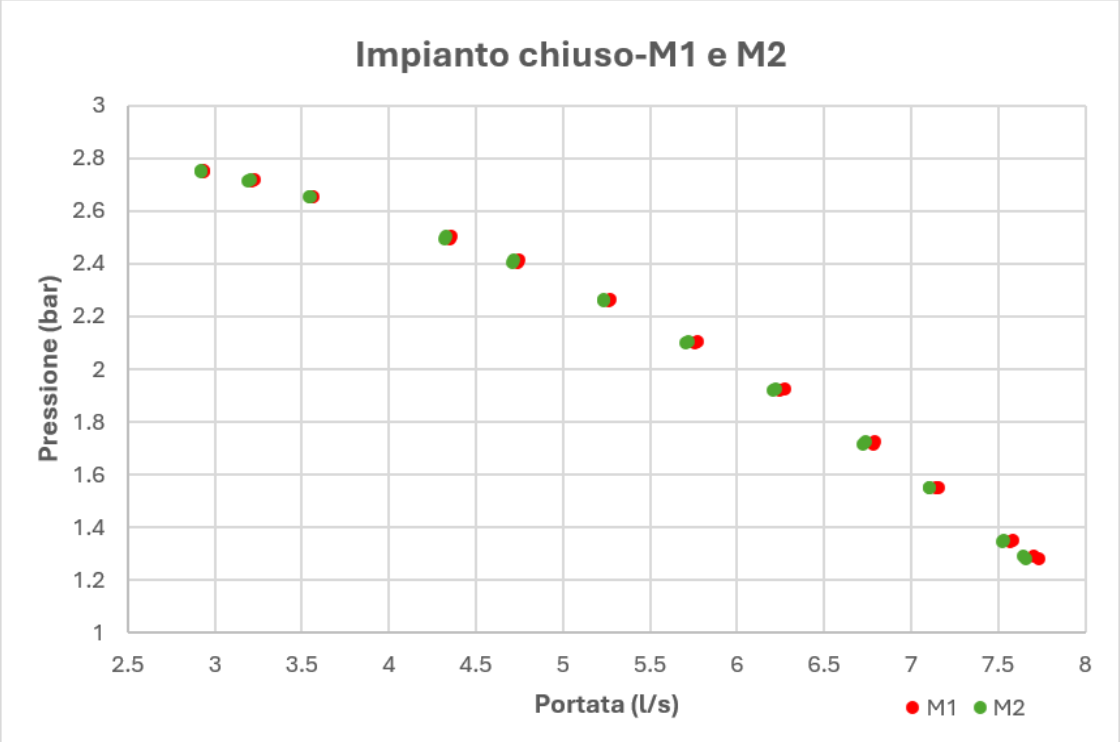


Figura 26: *grafico portata-pressione a impianto chiuso, ottenuto dal caso studio PVC 11mm.*

- il grafico *portata-pressione a impianto aperto* (*Figura 27*), che riporta i valori di portata e pressione relativi al funzionamento ad impianto aperto. Anche qui, si fa riferimento ai dati ottenuti dal misuratore di portata e di pressione a monte mediati tra loro (M1) e quelli ottenuti dal misuratore di portata e di pressione a valle mediati tra loro (M2). Da questi due grafici è possibile notare una grande differenza di comportamento tra impianto chiuso ed aperto, dovuto alle perdite. La coppia di valori portata-pressione risulta, come atteso, maggiore a monte rispetto che a valle. Si nota un incremento della differenza al diminuire della portata e all'aumentare della pressione. A valori alti di portata, la differenza è pari a circa 1 l/s, mentre a portate basse si arriva anche ad una differenza maggiore all'1,5 l/s.

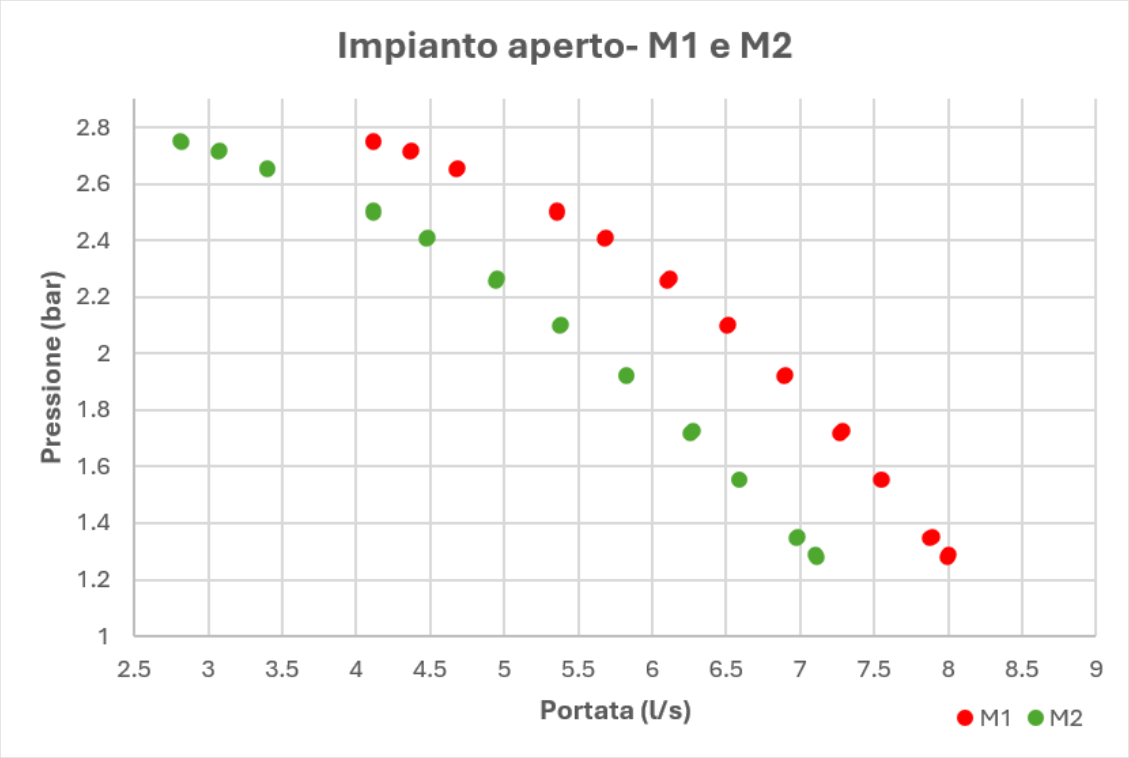


Figura 27: *grafico portata-pressione a impianto aperto, ottenuto dal caso studio PVC 11mm.*

- il grafico $Q_L - P$ *delle perdite* (*Figura 28*), in cui sono riportati i valori delle perdite occorse nell'apertura dell'impianto. I due andamenti rappresentati correlano i valori delle pressioni misurate a monte e a valle per ogni prova con i valori di Q_L non corretto (quindi la sola differenza tra la portata misurata al primo misuratore e quella misurata al secondo) e con i valori di Q_L corretti (quindi la differenza a cui è stata sottratta l'errore di misura ΔQ, l'errore dovuto alla diversità dei due misuratori di portata). I valori non corretti sono rappresentati dalla linea arancione e sono più alti rispetto al valore che tiene conto della deviazione standard.

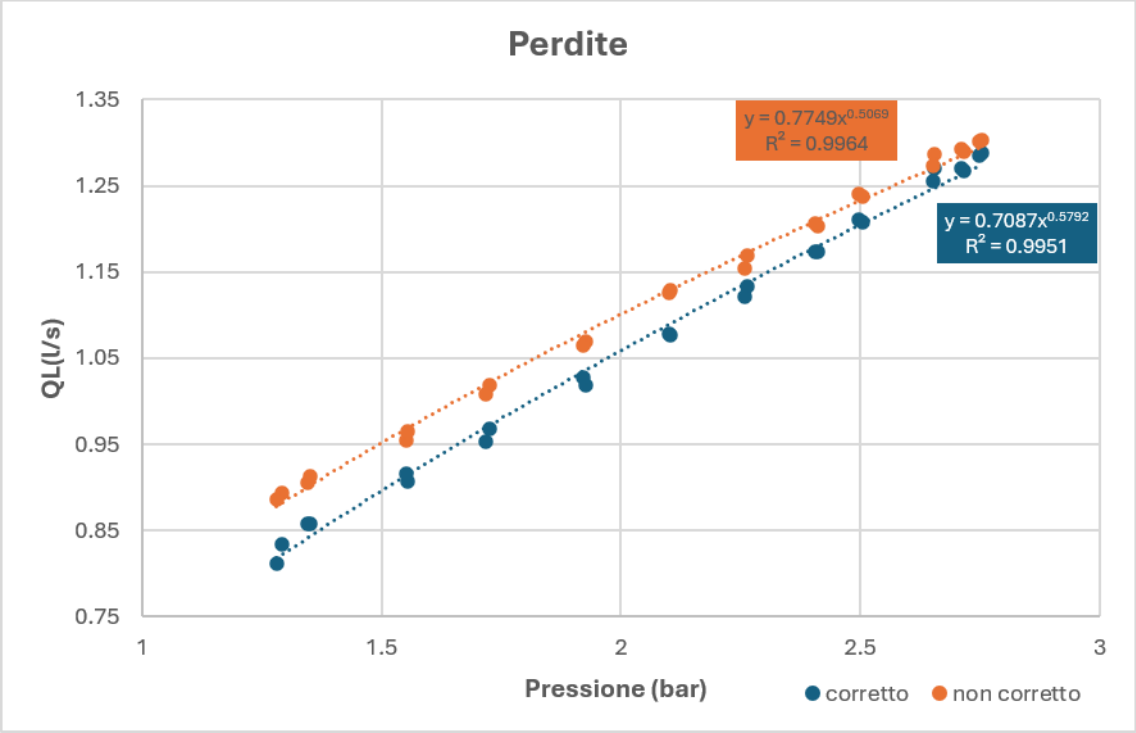


Figura 28: *grafico delle perdite, ottenuto dal caso studio PVC 11mm.*

5. RISULTATI DELLE PROVE

5.1. Grafici delle singole prove

Di seguito sono riportati, per ogni foro analizzato, tre grafici.

Il primo (*Figure 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41*) riporta i punti relativi ai valori medi di portata e pressione nel caso di impianto chiuso. Considerando l'impianto privo di ogni rottura, in questo caso, si osserva un andamento conforme con il principio di Bernoulli. Si conferma che, all'aumentare della portata, la pressione diminuisce.

Il secondo grafico (*Figure 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41*) è molto simile al primo, ma riporta i punti relativi ai valori medi di portata e pressione nel caso di impianto chiuso. Si può, inoltre, osservare che per entrambi i fori e per ogni taglio analizzato viene confermata la tendenza all'aumento della perdita al crescere della pressione in condotta, come evidenziato sia in condizioni sperimentali[5] che reali. Si nota, infine, che aumentando la frequenza del motore della pompa si ha un corrispondente aumento della pressione in condotta a cui corrisponde un aumento della portata in uscita dal foro.

L'ultimo grafico (*Figure 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42*), invece, descrive l'andamento delle perdite in funzione della pressione per tutte le frequenze di ogni singolo foro analizzato. Per interpolare i dati, sono state utilizzate linee di tendenza di tipo potenza dall'equazione generale $y = ax^b$, dove x è il valore di pressione in condizioni di impianto chiuso (nel minuto prima della prova), y il valore di portata in uscita, mentre a e b sono coefficienti come precedentemente spiegato. Si può notare che i valori del coefficiente di correlazione R^2 sono molto alti, ad indicare il buon adattamento tra dati sperimentali e funzione matematica. Ciò permette di assumere questa funzione come modello di perdita, in accordo con i dati di letteratura.

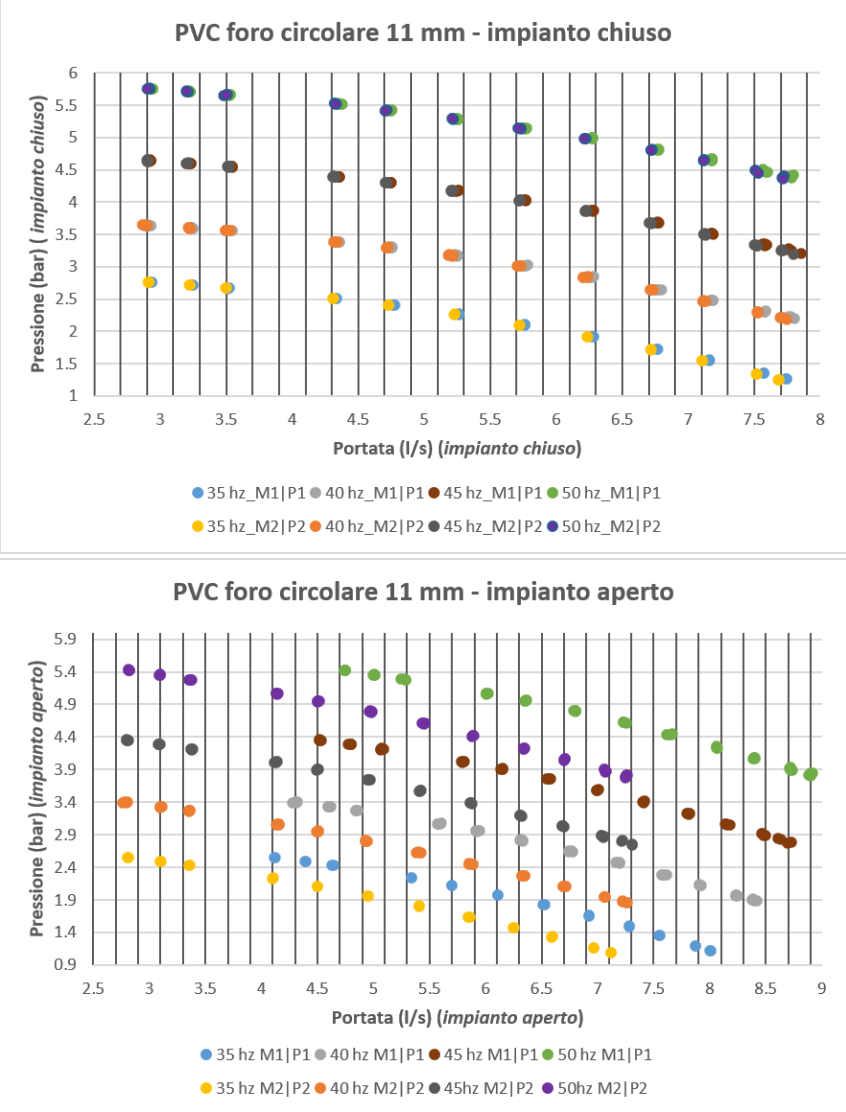


Figura 29: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso foro circolare 11 mm.*

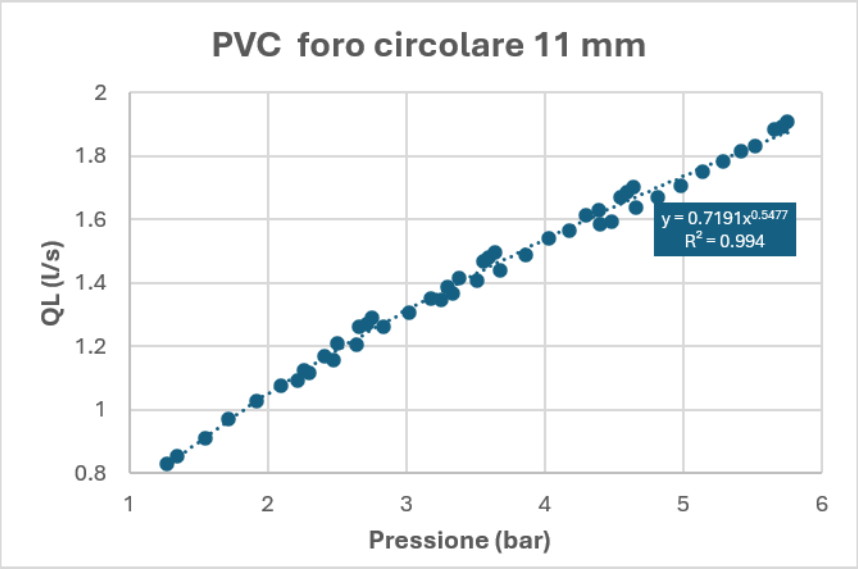
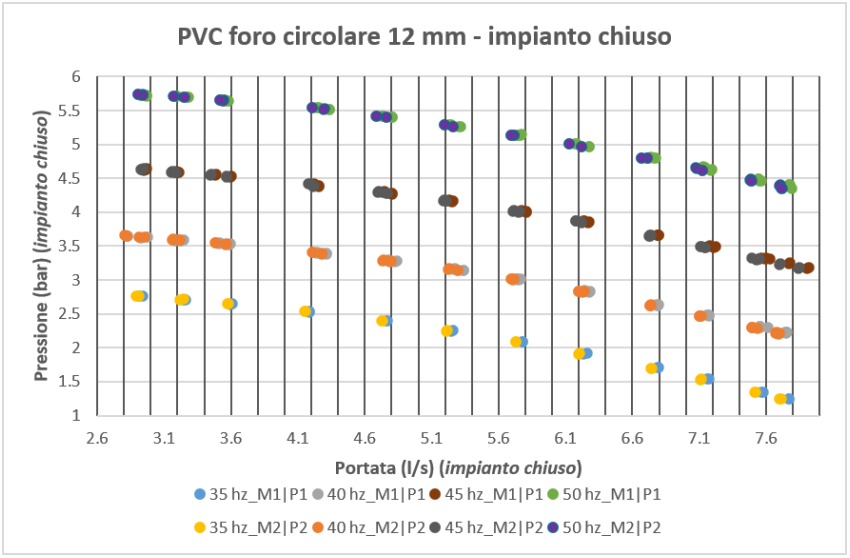


Figura 30: *Grafico Pressione – Perdite caso foro circolare 11 mm.*



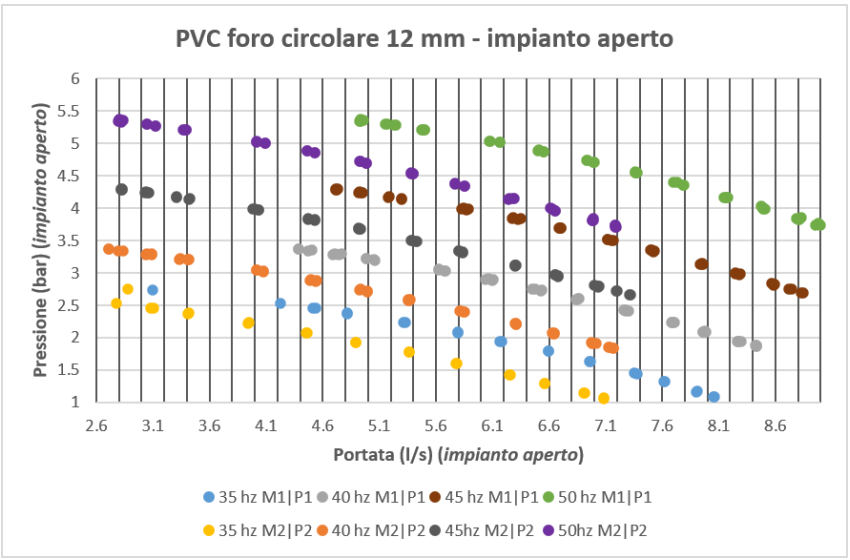


Figura 31: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso foro circolare 12 mm.*

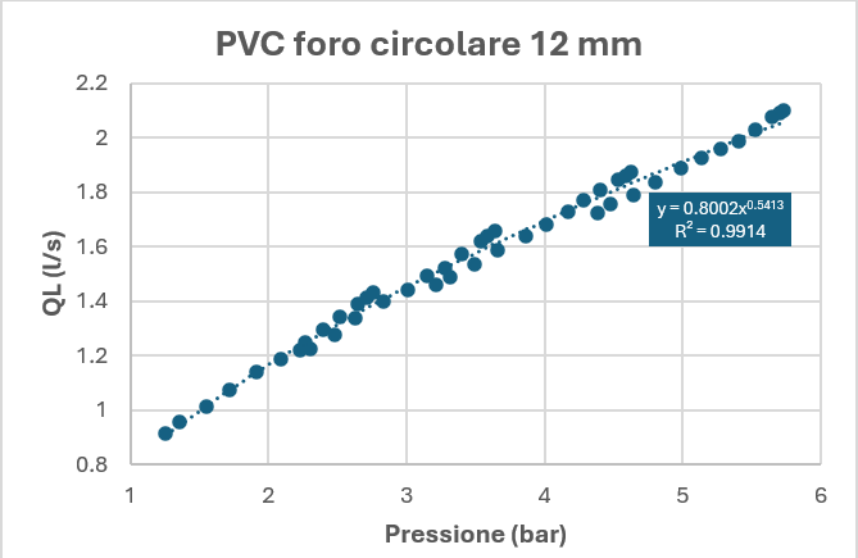


Figura 32: *Grafico Pressione – Perdite caso foro circolare 12 mm.*

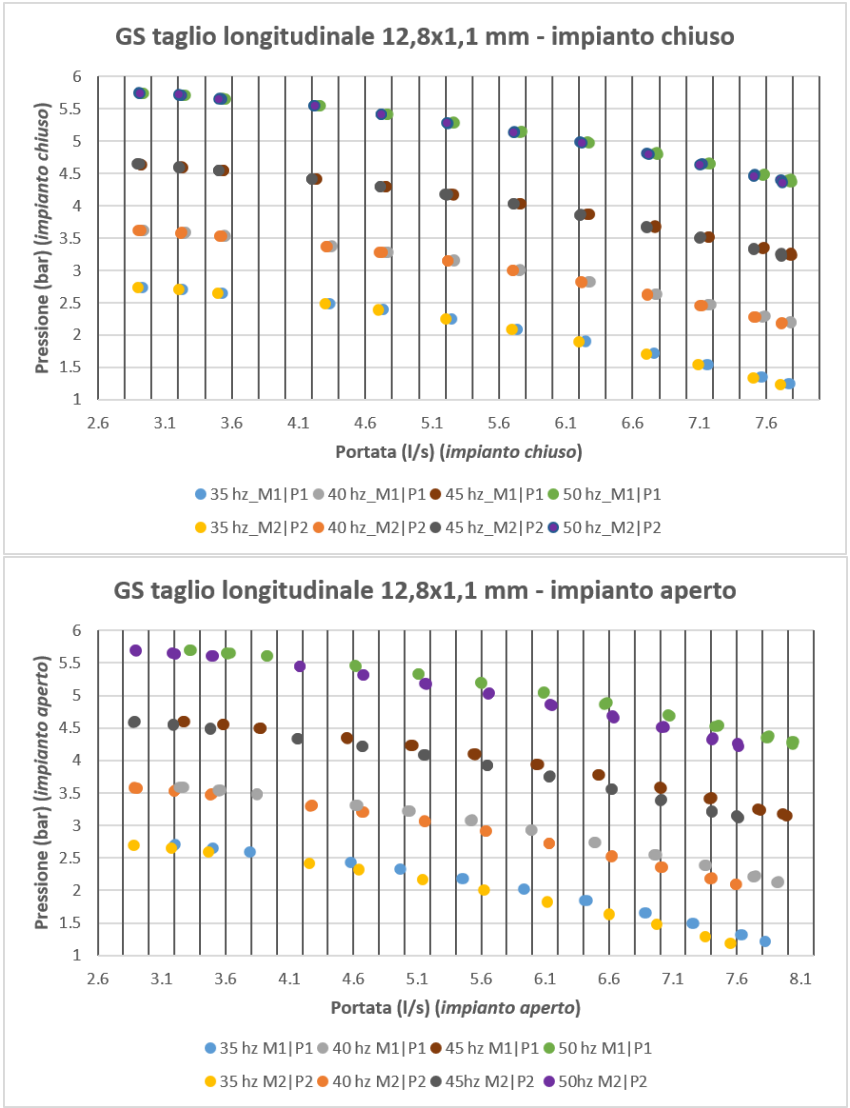


Figura 33: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso taglio longitudinale 12,8x1,1 mm.*

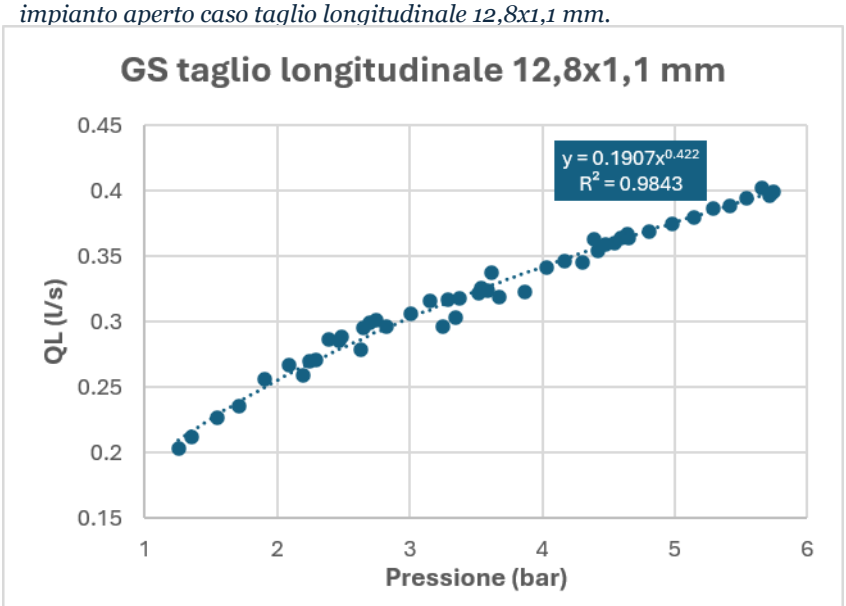


Figura 34: *Grafico Pressione – Perdite caso taglio longitudinale 12,8x1,1 mm.*

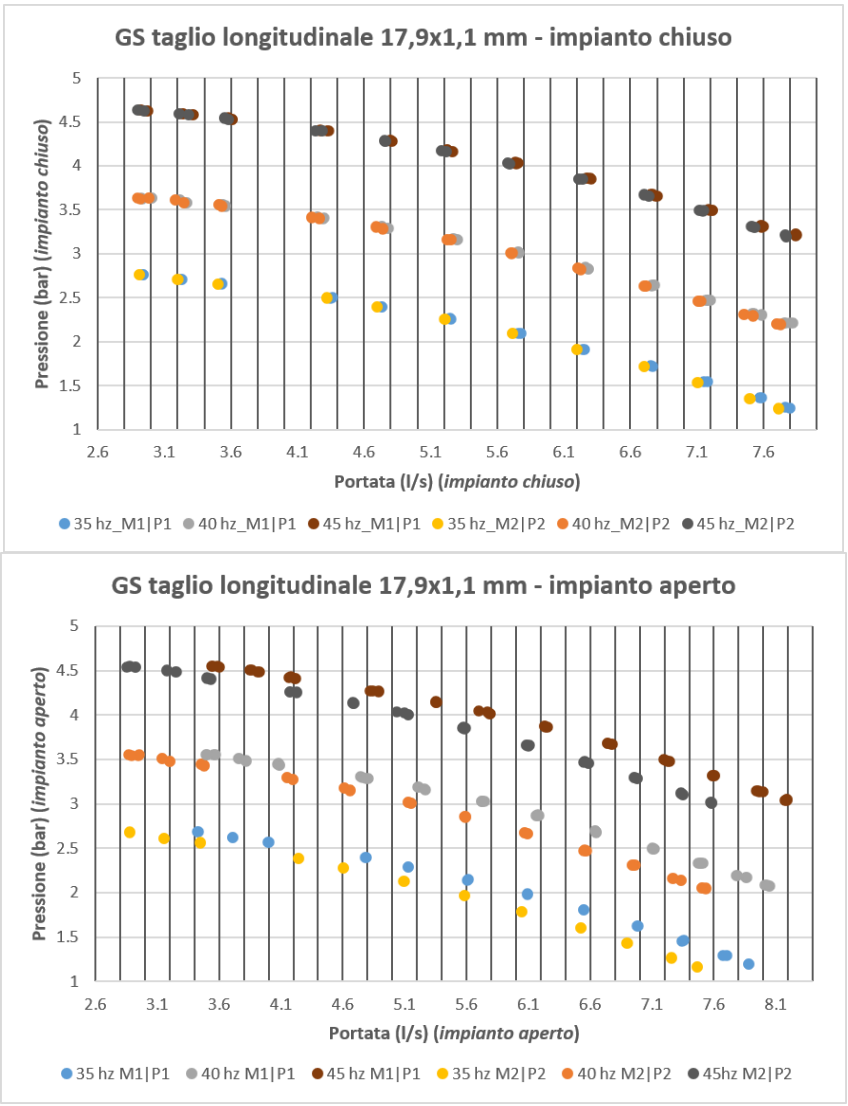


Figura 35: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso taglio longitudinale 17,9 x 1,1 mm.*

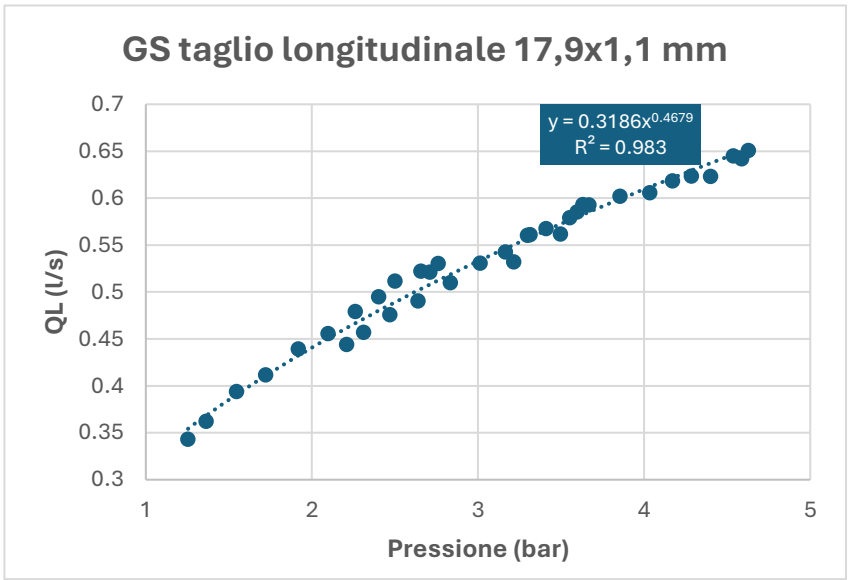
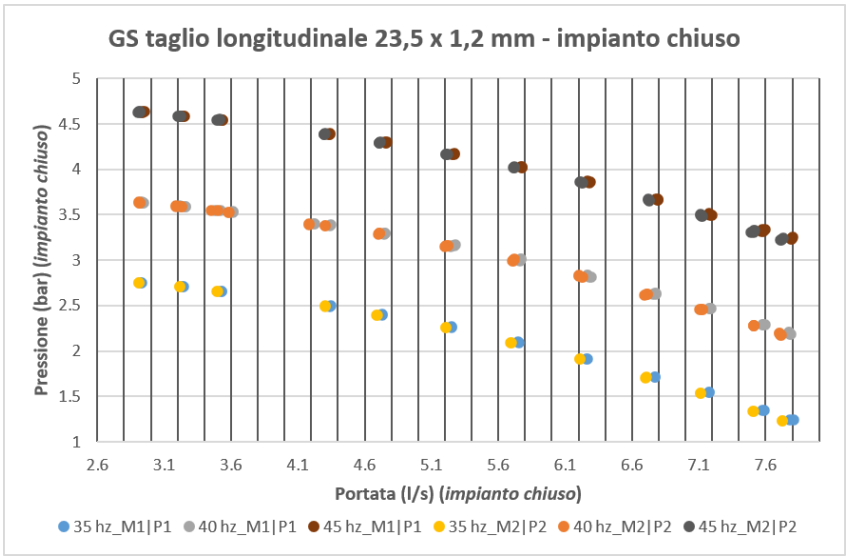


Figura 36: *Grafico Pressione – Perdite caso taglio longitudinale 17,9 x 1,1 mm.*



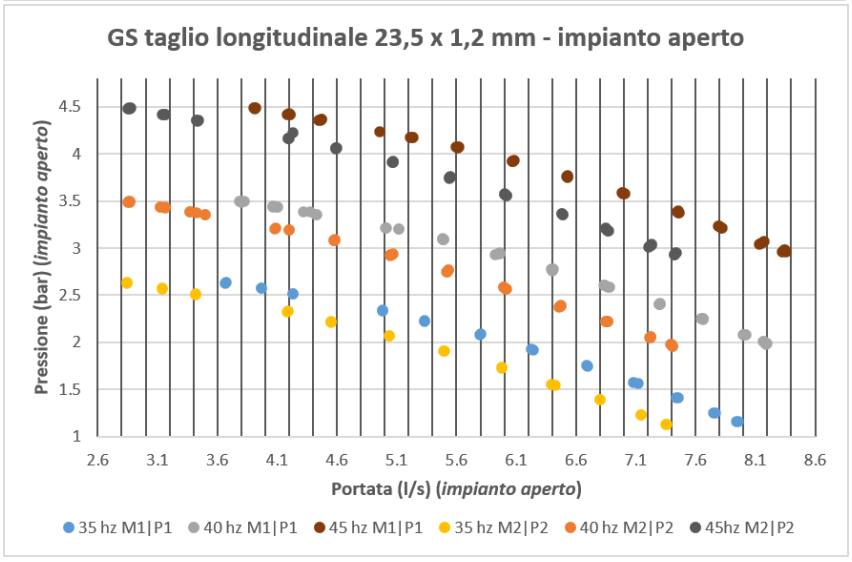


Figura 37: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso taglio longitudinale 23,5 x 1,2 mm.*

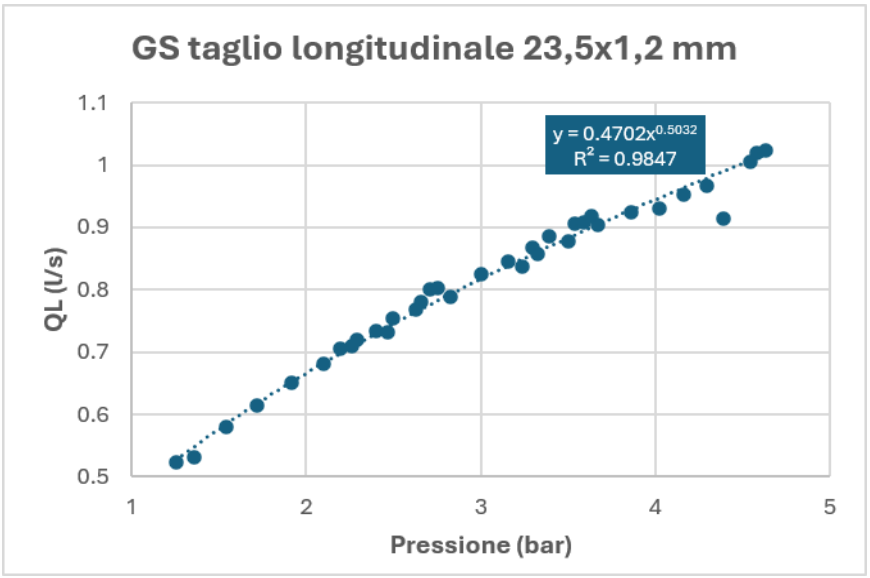


Figura 38: *Grafico Pressione – Perdite caso taglio longitudinale 23,5 x 1,2 mm.*

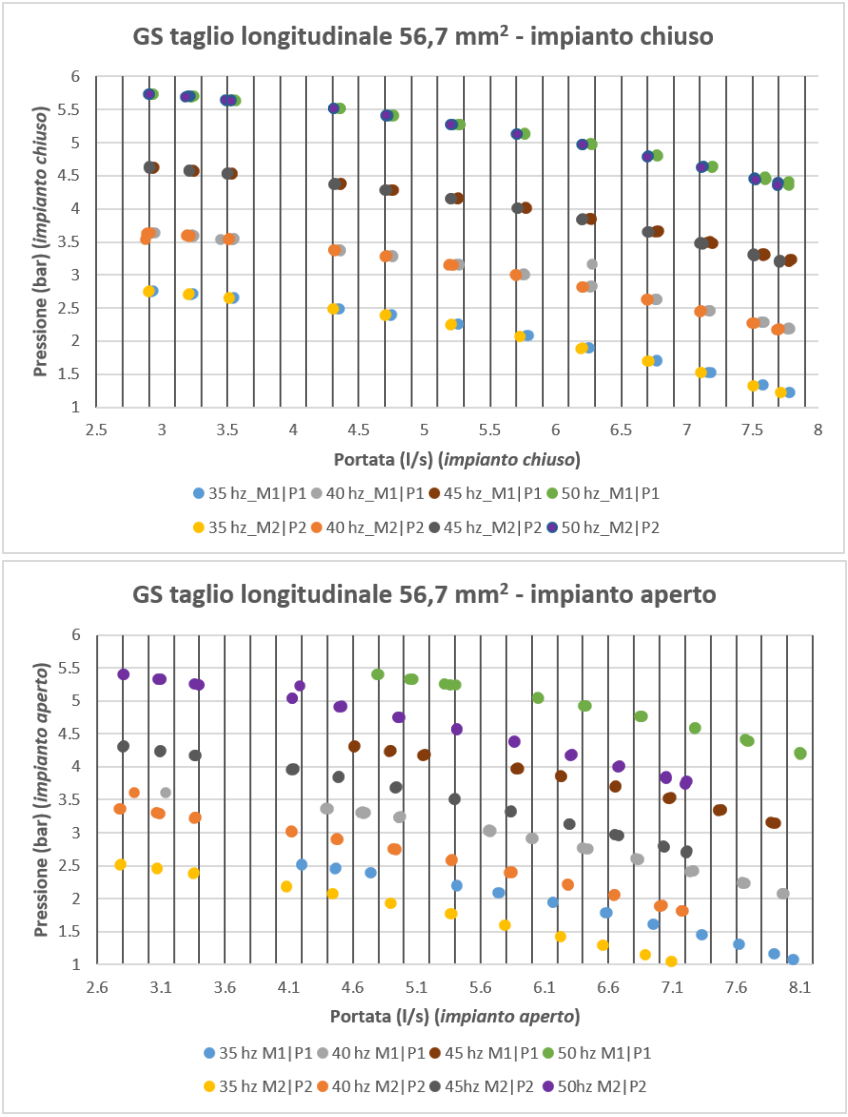


Figura 39: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso taglio longitudinale 56,7 mm².*

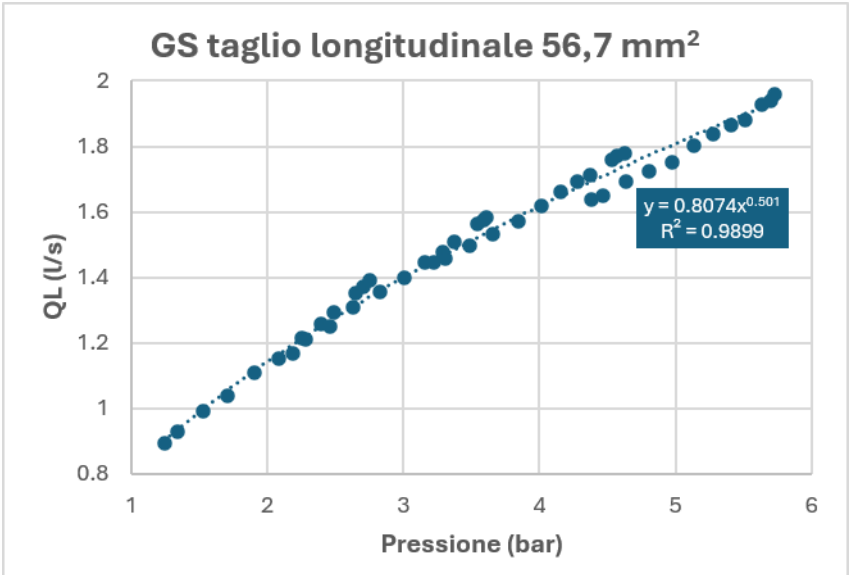
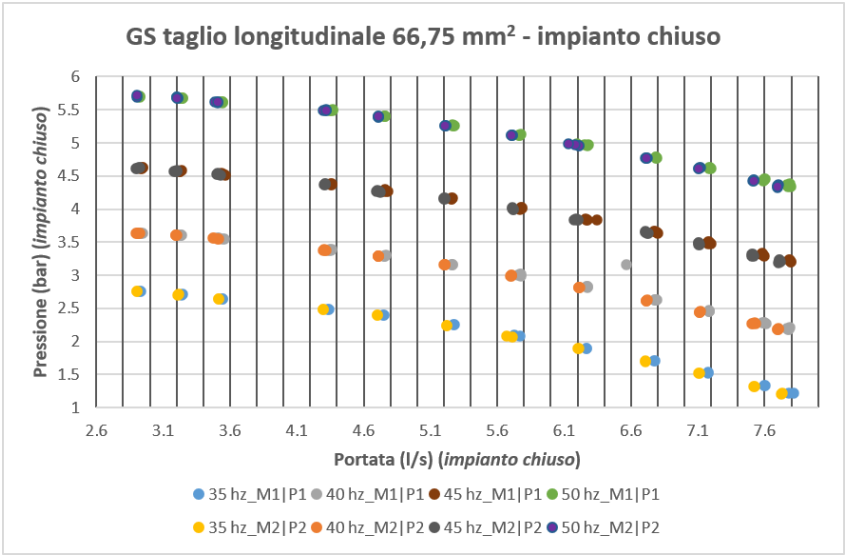


Figura 40: *Grafico Pressione – Perdite caso taglio longitudinale 56,7 mm².*



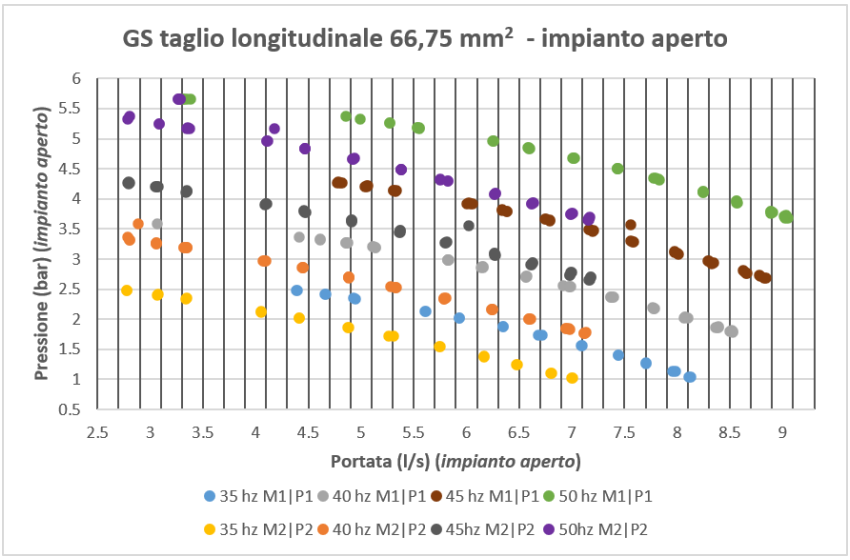


Figura 41: *Grafici di differenza Portata-Pressione tra impianto chiuso e impianto aperto caso taglio longitudinale 66,75 mm².*

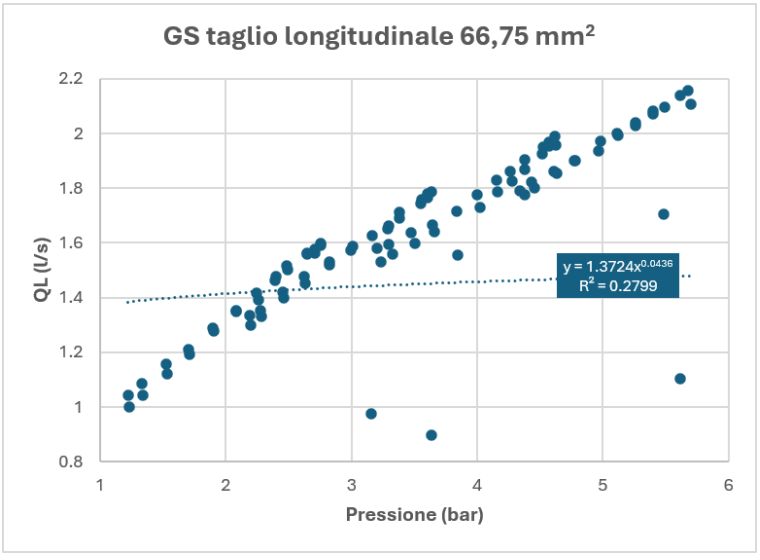


Figura 42: *Grafico Pressione – Perdite caso taglio longitudinale 66,75 mm².*

Data la presenza di dati anomali, si riporta in *Figura 43* il grafico della prova del taglio longitudinale di area 66,75 mm² con i valori corretti. Da questo momento in poi, verranno presi in considerazione solo i dati corretti di questa prova.

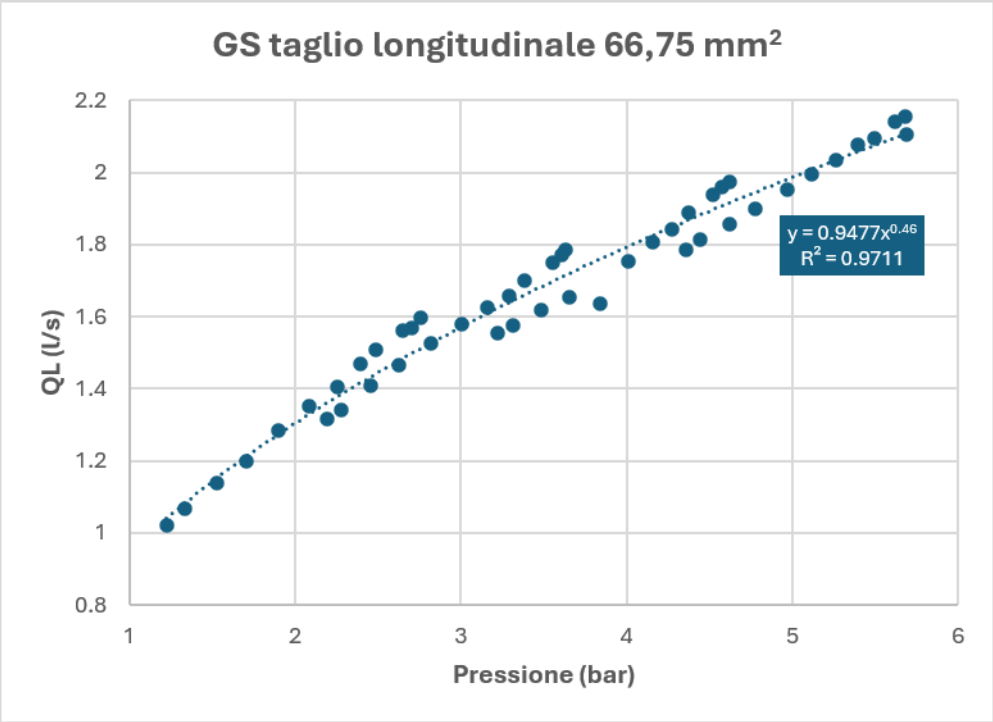


Figura 43: *Grafico Pressione – Perdite caso taglio longitudinale 66,75 mm² corretto.*

5.2. Grafici riepilogativi andamenti delle perdite

In *Figura 44* e in *Figura 45* sono riportati dei grafici riepilogativi.

Il grafico in *Figura 44* riassume l'andamento delle perdite nei fori circolari praticati su condotta in PVC. Per realizzare questo grafico è stato necessario utilizzare i dati ottenuti attraverso altre prove sperimentali, precedentemente svolte, che hanno raccolto dati su fori circolari di diametro 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm e 10 mm. La conoscenza di questi dati ha reso possibile la sovrapposizione con quelli raccolti durante il lavoro di tesi, riferiti ai fori circolari di diametro 11 mm e 12 mm. In questo modo è stato possibile completare l'analisi su tutti i diametri oggetti di studio. Quello che si denota è un andamento delle perdite crescente con le frequenze per ogni foro. Inoltre, la funzione di potenza $y = ax^b$ interpola bene i dati, nel complesso delle prove, con valori variabili dei coefficienti a e b. L'andamento era, pertanto, atteso e conforme alle aspettative. I valori vicini all'unità di R^2 confermano la validità di tali valori. Sono stati esclusi i dati relativi al foro 10 mm in quanto non ritenuti affidabili.

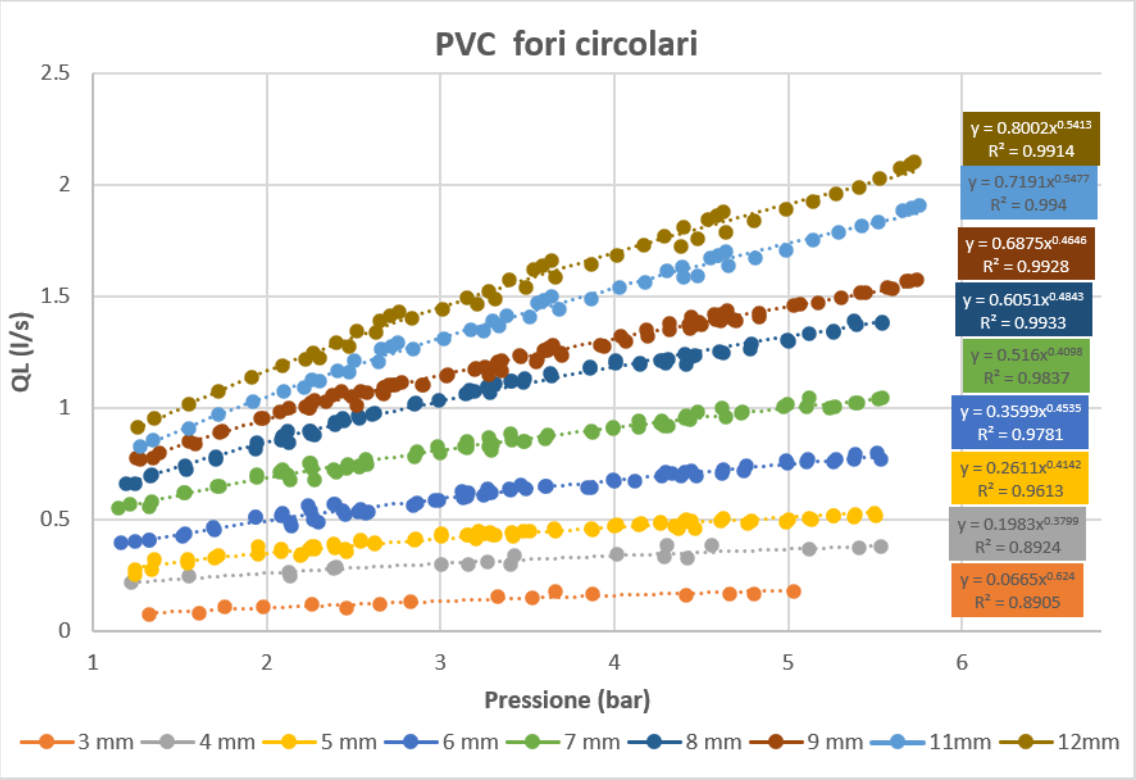


Figura 44: *grafico riepilogativo perdite condotta in PVC.*

Il grafico in *Figura 45* riassume, invece, l'andamento delle perdite nei tagli longitudinali praticati su condotta in ghisa (GS). Questo grafico si compone dei soli casi studio analizzati durante questo lavoro di tesi. Come si può notare, anche qui l'andamento della potenza è confermato valido, ad eccezione dei valori riguardanti il caso 66,75 mm²: in questo caso, dei valori anomali impediscono di considerare pienamente valida la prova, nonostante la prima parte descriva un andamento conforme con la legge di potenza.

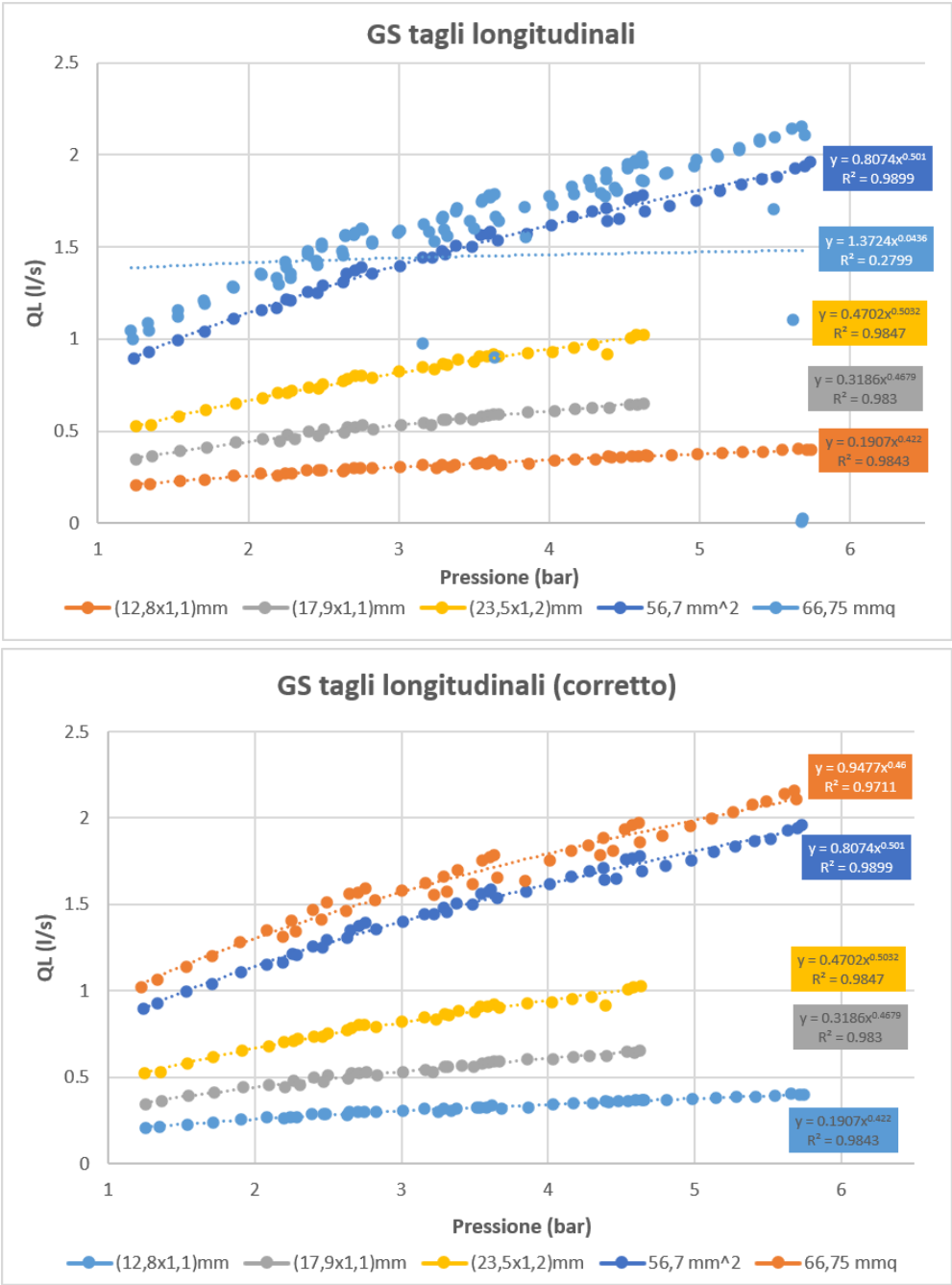


Figura 45: *grafico riepilogativo perdite condotta in ghisa.*

6. NORMALIZZAZIONE DEI RISULTATI

6.1. Normalizzazione dei fori

Si procede poi con lo studio del comportamento delle perdite nei due diversi tipi di condotte, rapportando tra loro i valori ottenuti per studiarne il comportamento. Questo confronto non è però immediato, data la differenza nella tipologia di foro. Per far sì che i risultati ottenuti siano confrontabili tra loro è necessaria un'operazione di normalizzazione della portata in uscita rispetto all'area del foro, in modo da escludere questa nelle differenze di comportamento tra foro circolare e taglio longitudinale. In *Figura 46* sono riportate le aree equivalenti ad ogni foro usato nello studio.

Tipologia di foro	Dimensioni	Area
Foro circolare	Ø 3mm	7,07 mm²
Foro circolare	Ø 4 mm	12,57 mm²
Foro circolare	Ø 5 mm	19,63 mm²
Foro circolare	Ø 6 mm	28,27 mm²
Foro circolare	Ø 7 mm	38,48 mm²
Foro circolare	Ø 8 mm	50,27 mm²
Foro circolare	Ø 9 mm	63,62 mm²
Foro circolare	Ø 10 mm	78,54 mm²
Foro circolare	Ø 11 mm	95,03 mm²
Foro circolare	Ø 12 mm	113,10 mm²
Foro rettangolare	12,8 x 1,1 mm	14,08 mm²
Foro rettangolare	17,9 x 1,1 mm	19,69 mm²
Foro rettangolare	23,5 x 1,2 mm	28,20 mm²
Foro rettangolare	-	56,70 mm²
Foro rettangolare	-	66,75 mm²

Figura 46: *Aree equivalenti per foro.*

Si procede con il confronto graficato tra i primi 6 fori circolari e i primi 6 tagli longitudinali. Nei grafici rappresentati dalla *Figura 47* alla *Figura 52* è riportato il valore della pressione P nelle ascisse e il valore della portata normalizzata Q_L/A_F nelle ordinate.

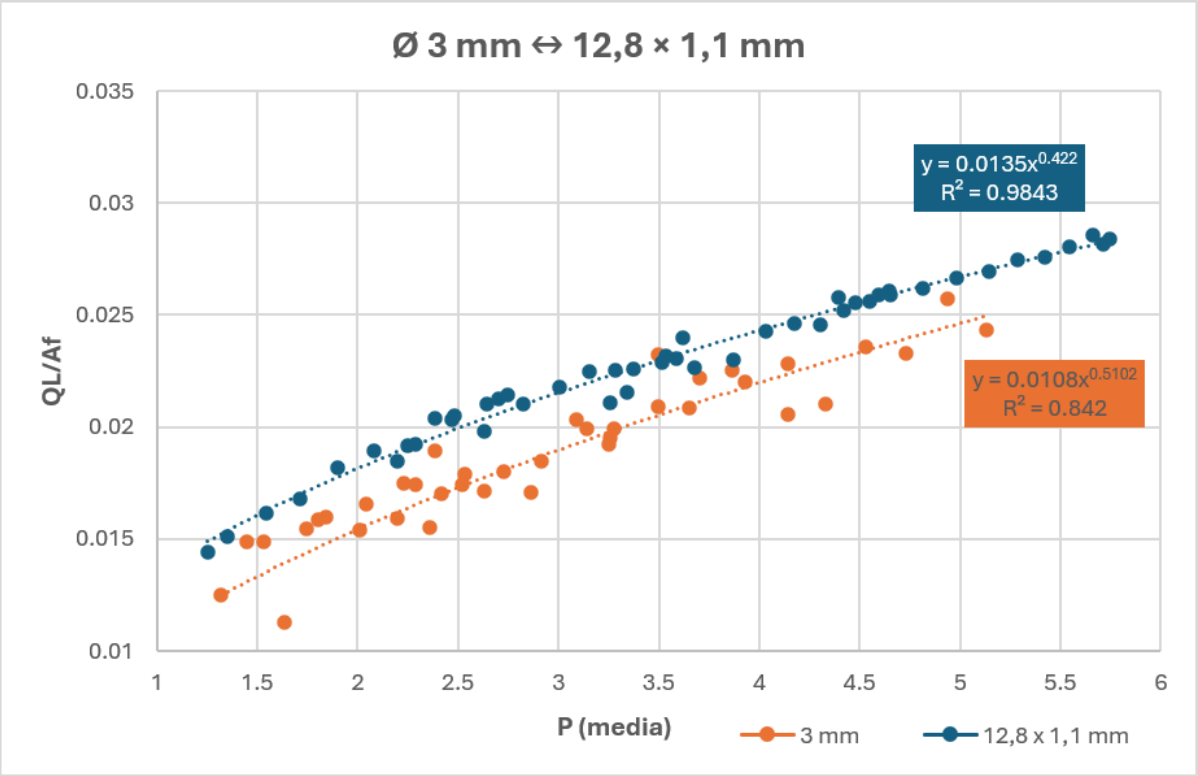


Figura 47: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 3 mm e del taglio longitudinale 12,8 x 1,1 mm.*

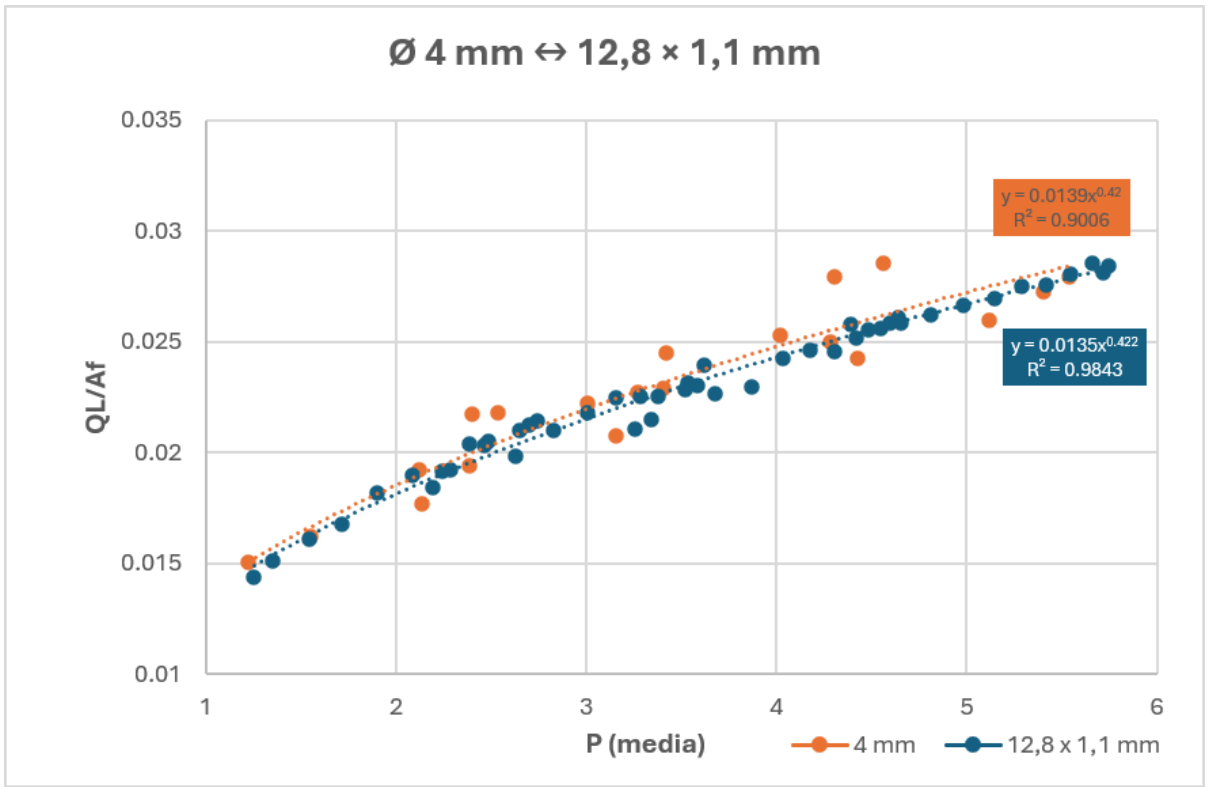


Figura 48: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 4 mm e del taglio longitudinale 12,8 x 1,1 mm.*

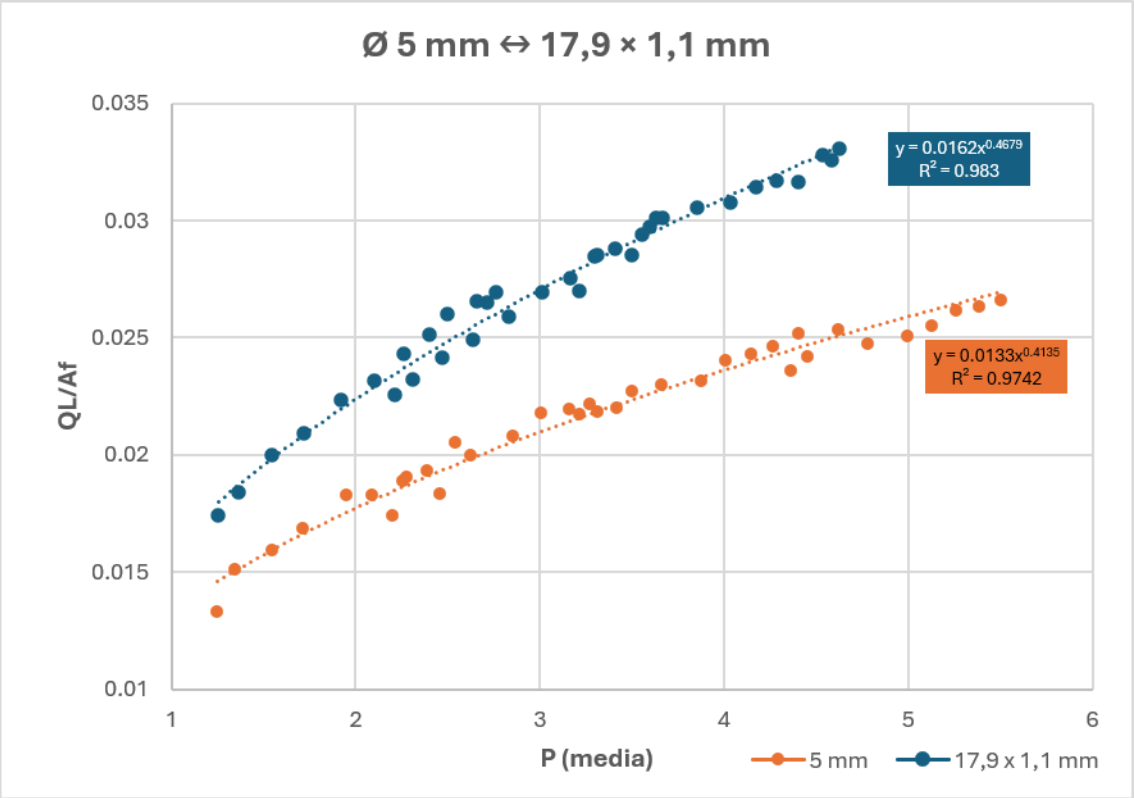


Figura 49: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 5 mm e del taglio longitudinale 17,9 x 1,1 mm.*

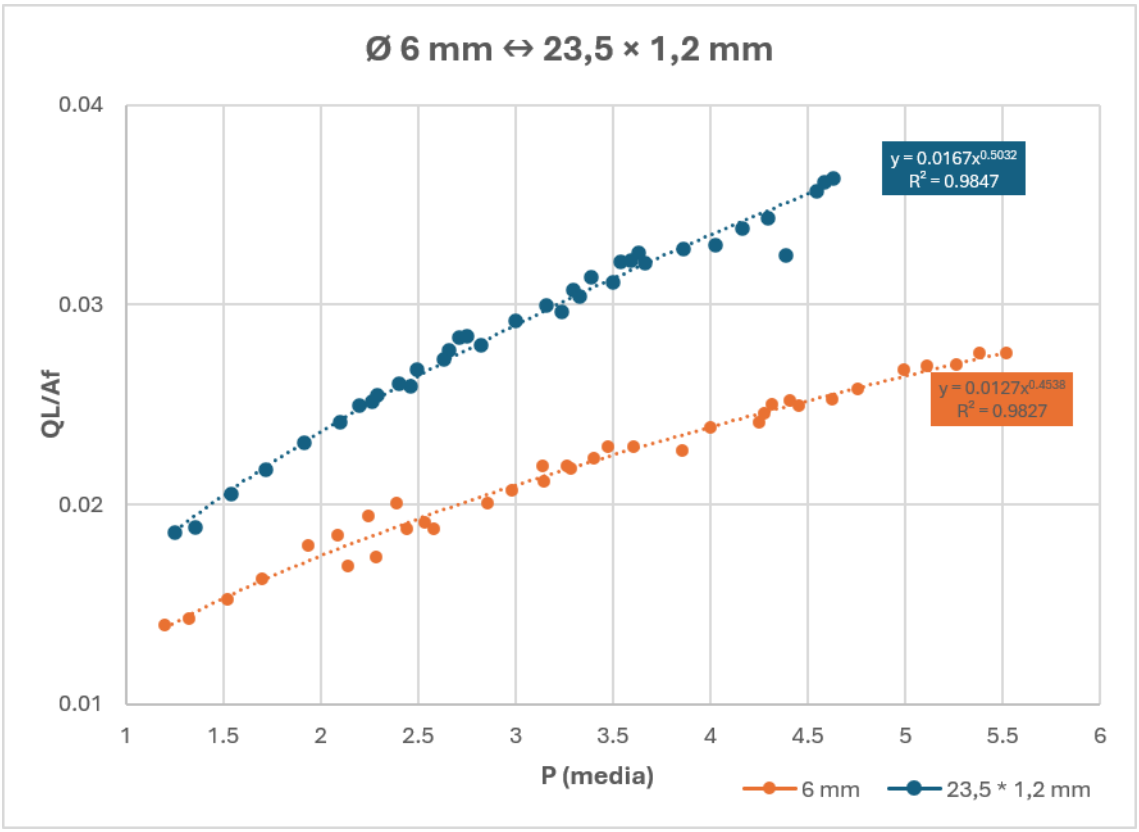


Figura 50: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 6 mm e del taglio longitudinale 23,5 x 1,2 mm.*

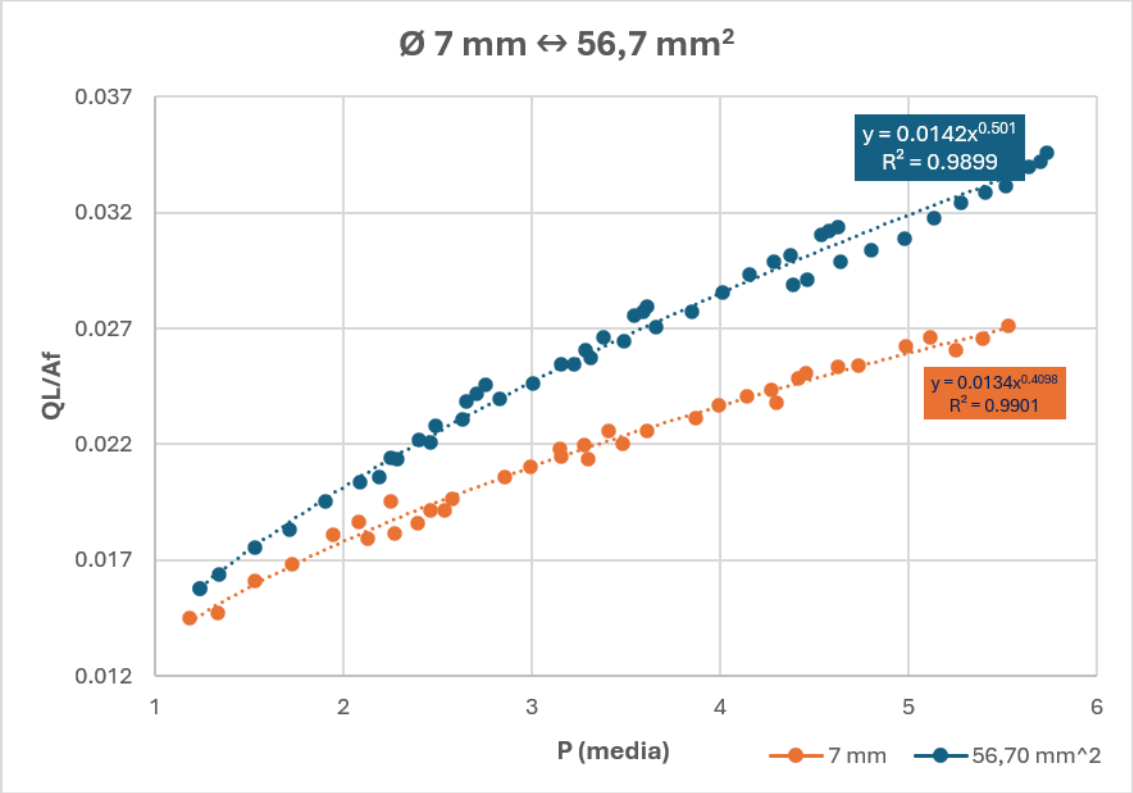


Figura 51: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 7 mm e del taglio longitudinale 56,7 mm².*

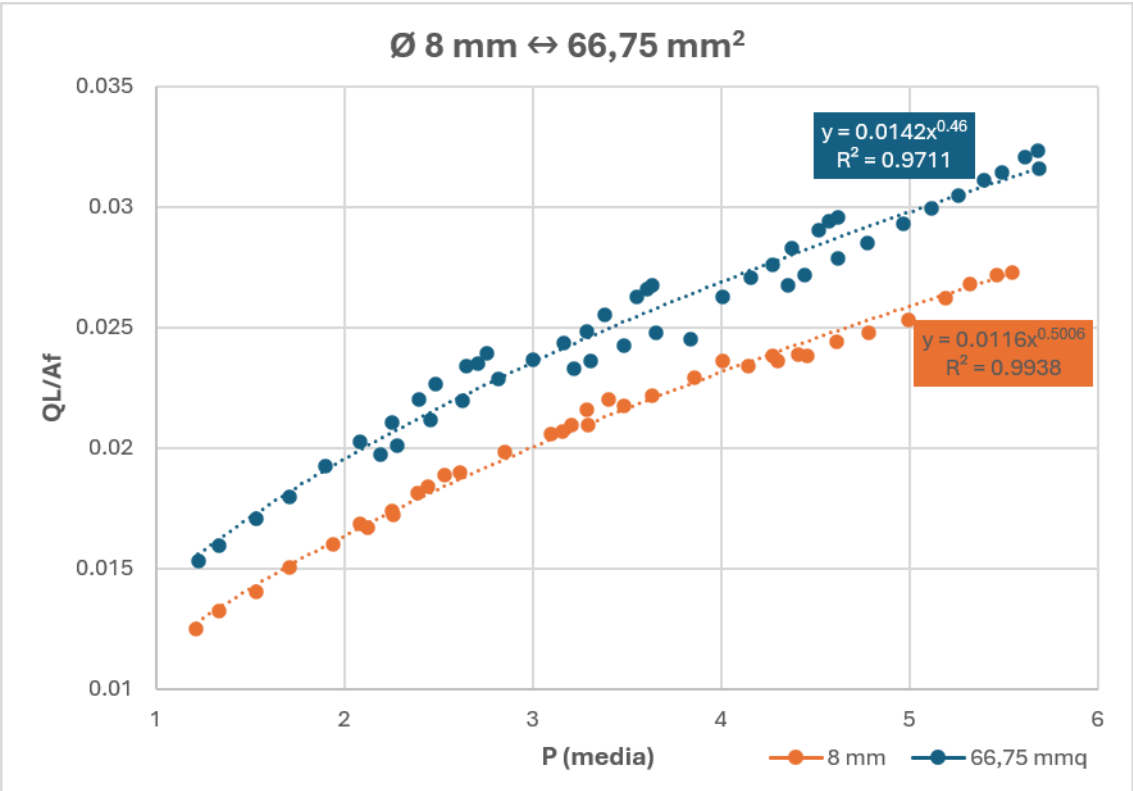


Figura 52: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 8 mm e del taglio longitudinale 66,75 mm².*

Dalla *Figura 47* alla *Figura 52* emergono comportamenti conformi alle aspettative. In quasi tutti i casi, la ghisa mostra una perdita maggiore rispetto al PVC. L'unica eccezione è rappresentata dal caso Ø 4 mm ↔ 12,8 × 1,1 mm, in cui la ghisa sembra mostrare una perdita minore (seppur in maniera quasi trascurabile) rispetto al PVC.

A riprova di questo comportamento e per meglio analizzare il comportamento delle perdite, si ritiene necessario fare un'ulteriore scrematura, per accoppiare solo le aree che risultano tra loro molto simili. Si è deciso, dunque, di non considerare le differenze tra aree superiori al 10%. Dai calcoli risulta che le coppie (condotta in PVC con foro circolare – condotta in ghisa con taglio) adatte per la comparazione sono 4:

- Ø 4 mm ↔ 12,8 × 1,1 mm (5,7% di differenza);
- Ø 5 mm ↔ 17,9 × 1,1 mm (0,3% di differenza);
- Ø 6 mm ↔ 23,5 × 1,2 mm (0,2% di differenza);
- Ø 9 mm ↔ 66,75 mm² (4,8% di differenza).

I grafici del caso Ø 4 mm ↔ 12,8 × 1,1 mm, Ø 5 mm ↔ 17,9 × 1,1 mm e del caso Ø 6 mm ↔ 23,5 × 1,2 mm sono già stati riportati in *Figura 48*, *Figura 49* e in *Figura 50* in quanto accoppiati fin dall'inizio.

In *Figura 53* è riportato il grafico della coppia mancante. Non si denota un cambiamento nel comportamento. Anche in questo caso, a parità di area, di pressione e di portata, la ghisa mostra una perdita maggiore rispetto al PVC.

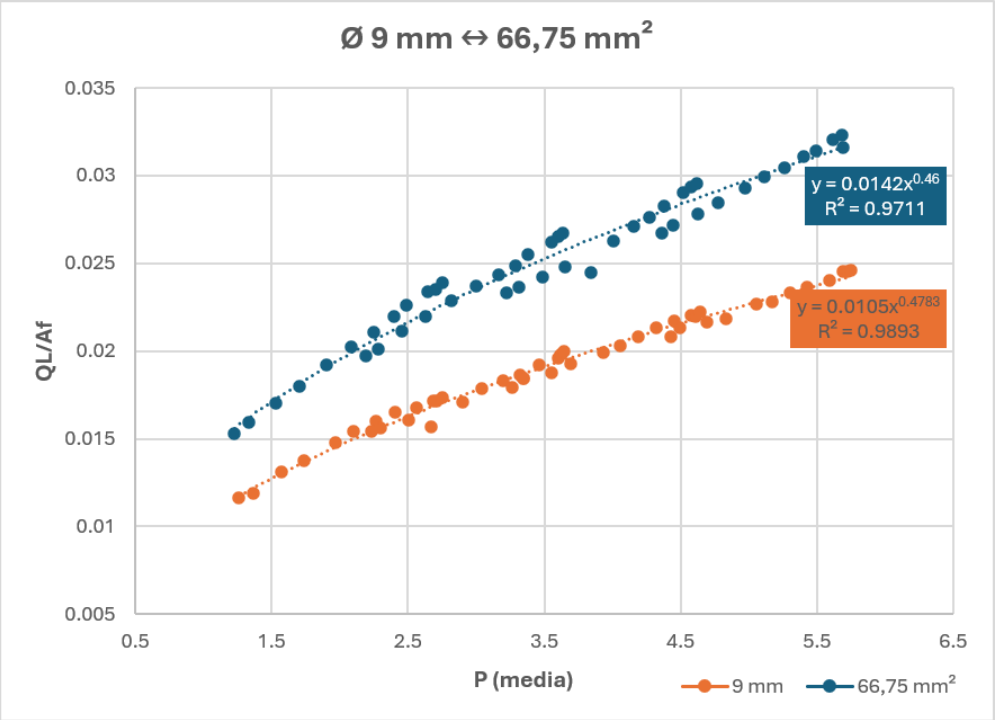


Figura 53: *grafico comparativo del comportamento del foro circolare su condotta in PVC da 9 mm e del taglio longitudinale 66,75 mm².*

Il grafico in *Figura 54* riporta i valori di *a* e di *b* riferiti ai dati raccolti per gli 11 e 12 mm della condotta in PVC. Si è reso necessario creare un grafico apposito in quanto questi fori circolari sono troppo grandi per essere correlati ai primi sei tagli longitudinali. Vi sono anomalie nel caso del foro da 10 mm.

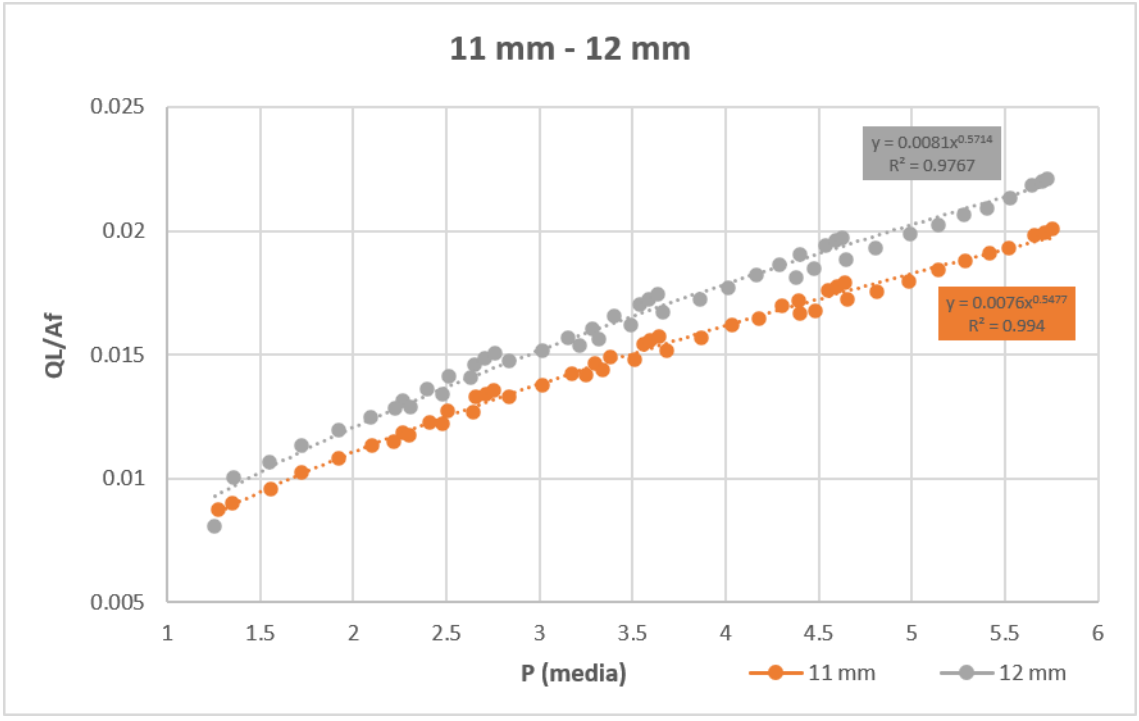


Figura 54: *grafico per l'estrapolazione dei valori di a e di b dai dati 11 e 12 mm.*

Vengono riportati tre ulteriori grafici. Il primo, in *Figura 55*, riporta i dati normalizzati per tutti i fori circolari in PVC. Il secondo, in *Figura 56*, riporta i dati normalizzati per tutti i tagli longitudinali in ghisa. Il terzo, in *Figura 57*, riporta i dati normalizzati delle quattro coppie sopra citate.

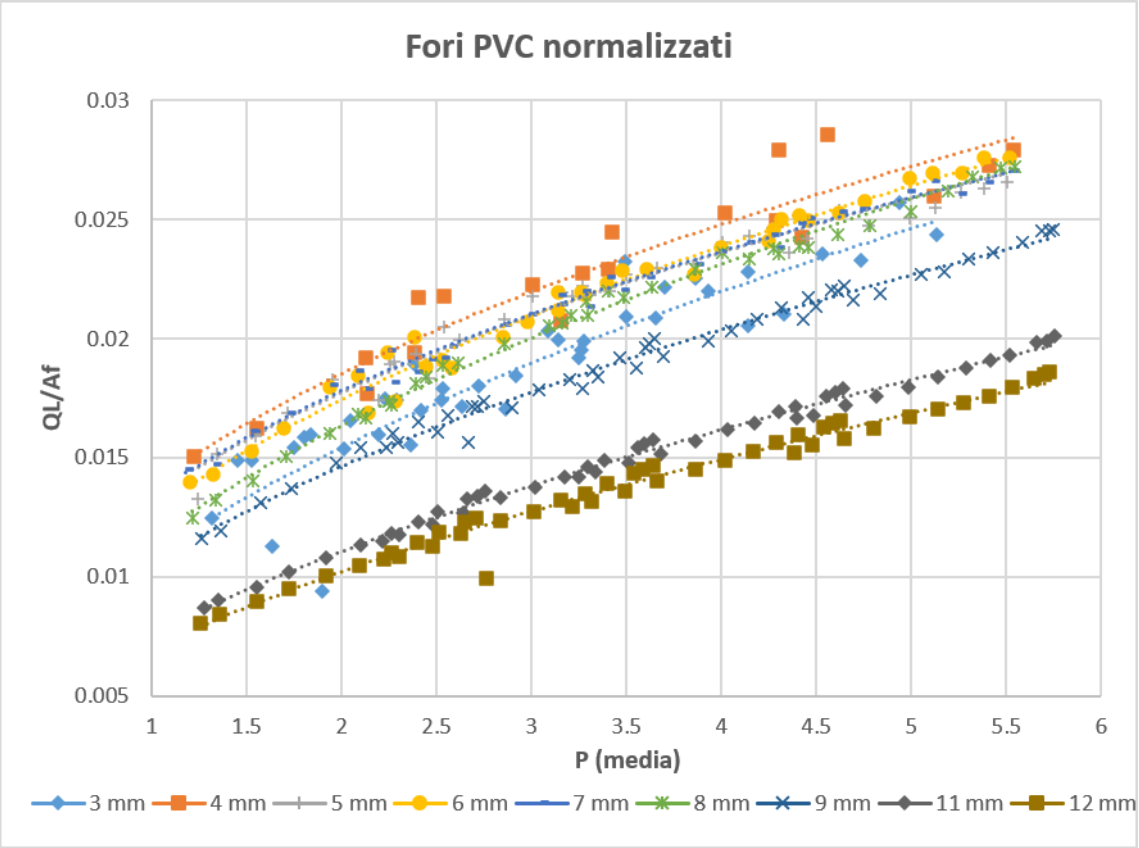


Figura 55: *dati normalizzati dei fori circolari in PVC.*

In tutti i grafici riportati in *Figura 55*, *Figura 56* e *Figura 57* si può notare un andamento conforme alle aspettative della legge di potenza, con la portata normalizzata che aumenta all'aumentare della pressione.

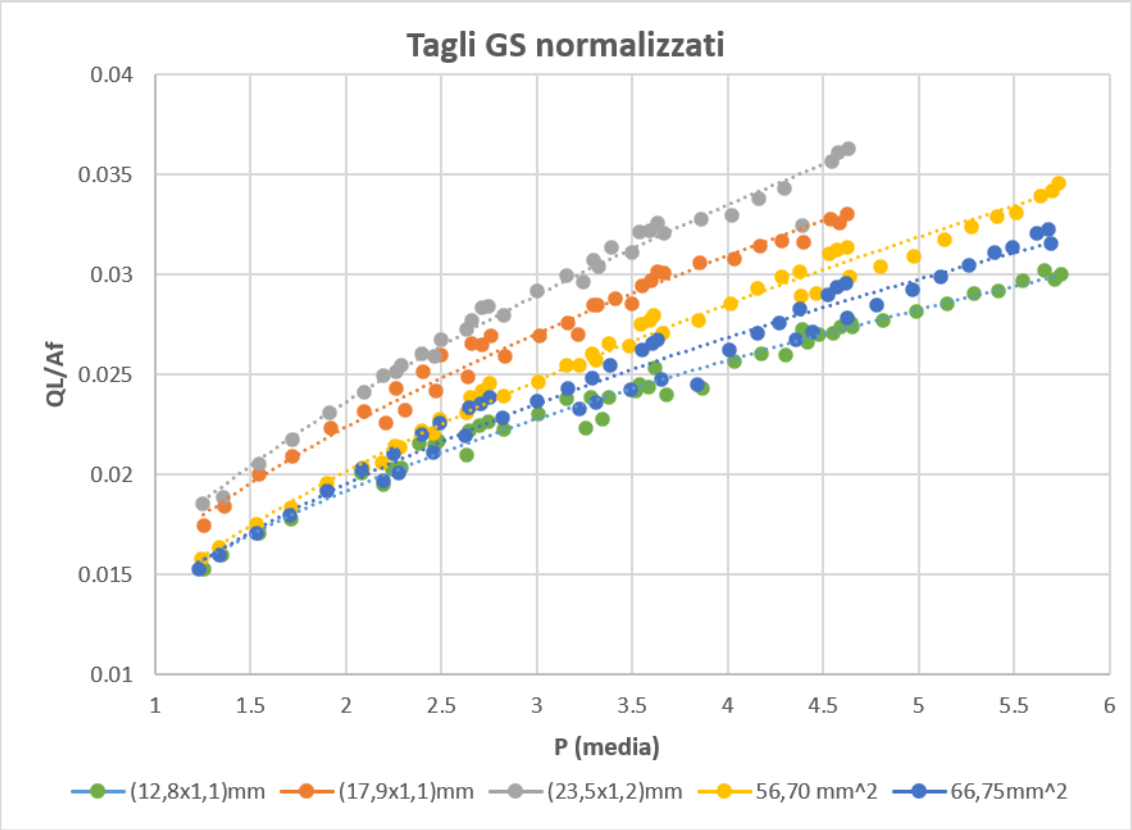


Figura 56: *dati normalizzati dei tagli longitudinali in ghisa.*

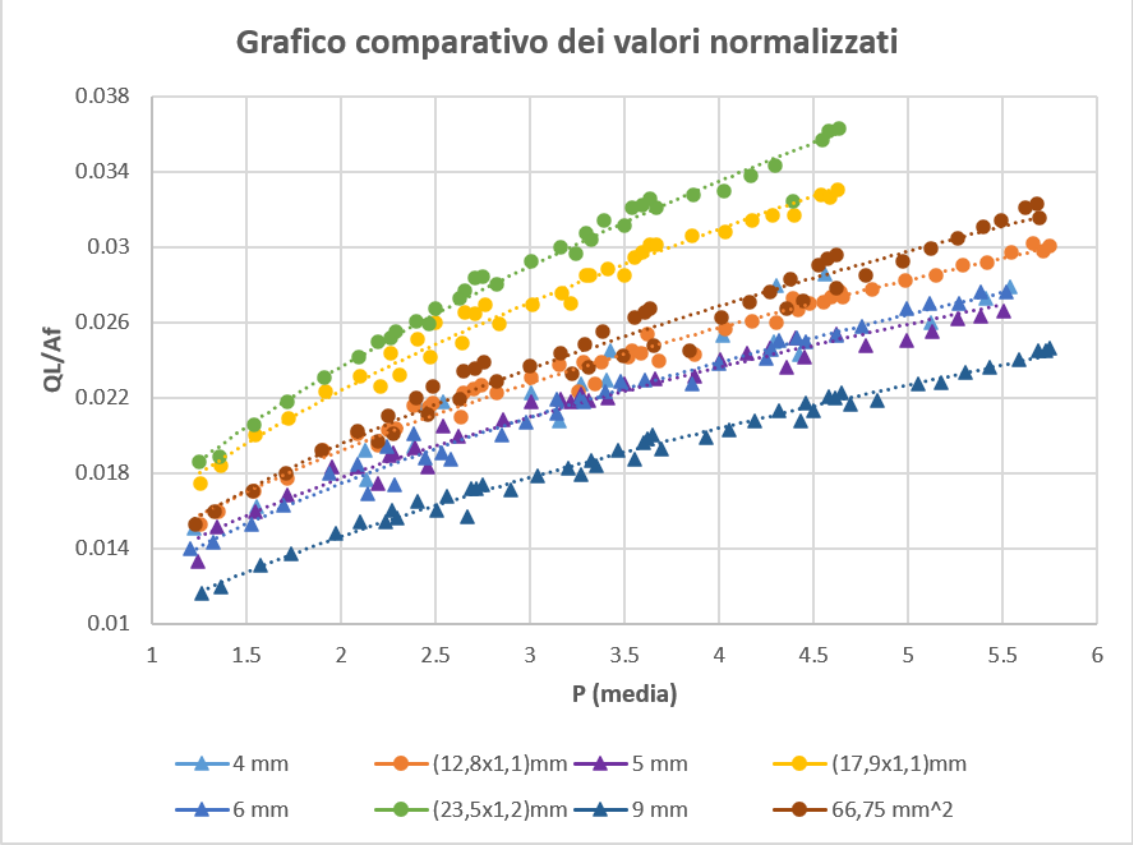


Figura 57: *dati normalizzati delle quattro coppie.*

7. MODELLI DI PERDITA (Legge di interpolazione)

Si riprende in questo capitolo l'equazione alla base dei modelli di perdita, ovvero la legge di interpolazione:

$$Q_L = aP^b$$

La legge di potenza $Q = aP^b$ è un modello empirico usato, nell'idraulica delle reti in pressione, per descrivere come la portata di perdita Q_L varia in funzione della pressione P. È lo strumento chiave per quantificare le perdite idriche e valutare l'efficacia delle strategie di controllo della pressione nelle reti di distribuzione dell'acqua. Trattandosi di un modello empirico si basa su osservazioni sperimentali. I termini dell'equazione sono:

- Q_L: portata in perdita (L/s);
- P: pressione (bar);
- a: coefficiente di perdita, che racchiude la geometria del sistema e le proprietà del fluido;
- b: esponente di perdita, che definisce il regime di flusso e la natura fisica del fenomeno.

Dunque, a e b sono rispettivamente il coefficiente e l'esponente nel modello di perdita. Basandosi su dati raccolti sperimentalmente, il coefficiente a e l'esponente b si ottengono dalle curve di potenza interpolanti i valori di portata e perdita dai grafici riportati in questo lavoro di tesi dalla *Figura 47* alla *Figura 54*. In *Figura 58* e in *Figura 59* sono riportati, graficati, i valori di a e di b in base alle aree studiate.

Il coefficiente *a* raggruppa le informazioni sulla "dimensione" e sulla "natura" della perdita. Il suo valore dipende dalla geometria dell'apertura (area, forma), dal materiale del tubo e dalle condizioni locali. Il coefficiente *a* non è una costante fissa, ma piuttosto un parametro riassuntivo che riunisce la geometria della perdita, le proprietà del materiale del tubo e le condizioni locali. Un valore di *a* più alto indica una perdita intrinsecamente più "grande". Come si nota dal grafico in *Figura 57*, il comportamento del coefficiente *a* risulta similare nei due casi

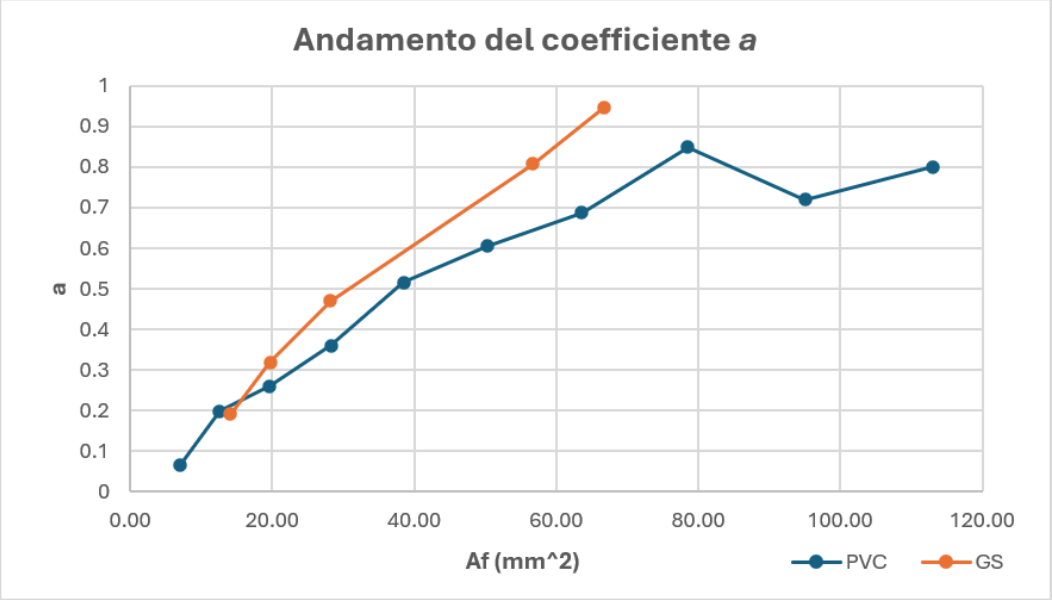


Figura 58: *andamento del coefficiente a.*

studiati. Si ha un valore tendenzialmente basso per aree piccole, che aumenta all'aumentare dell'area. Le diverse forme della perdita (fori circolari e tagli longitudinali) portano a valori di *a* diversi. [3]

Gli studi condotti in laboratorio dimostrano la teoria secondo la quale all'aumentare dell'area aumenta il valore di *a*. Si conferma inoltre, che il valore di *a* è dipendente dalla dimensione della perdita: le perdite registrate per i tagli longitudinali su ghisa risultano maggiori rispetto a quelli su PVC, a parità di area. Questo proprio perché il coefficiente *a* raggruppa l'area geometrica della perdita e i fattori idraulici correlati. Il suo aumento con l'area della perdita riflette il fatto che, a parità di pressione, un'apertura di perdita più grande permette naturalmente il passaggio di una maggiore portata d'acqua.

L’esponente *b* è il parametro che caratterizza la sensibilità della perdita alla pressione. Determina di quanto varia la portata quando la pressione cambia. Il valore dell’esponente *b*, ottenuto da esperimenti e studi sul campo, non è fisso, ma è stato dimostrato avere un valore variabile. Ricerche dell'Università di Città del Capo [5] hanno dimostrato che per una stessa perdita, il valore di *b* non è fisso. Tende a 0,5 quando la pressione è vicina a zero e cresce progressivamente fino a valori prossimi a 1,5 all'aumentare della pressione, poiché le deformazioni elastiche diventano più significative. I fattori che ne influenzano la variazione possono essere individuati nel tipo di materiale, nel tipo di rottura, le caratteristiche del suolo, la portata e la natura del fenomeno. [3] Il valore di *b* riflette la fisica della perdita, in particolare se l'area dell'apertura rimane fissa o variabile al variare della pressione. Il valore di *b* è circa 0,5 quando l'apertura è rigida e non si deforma con la pressione.

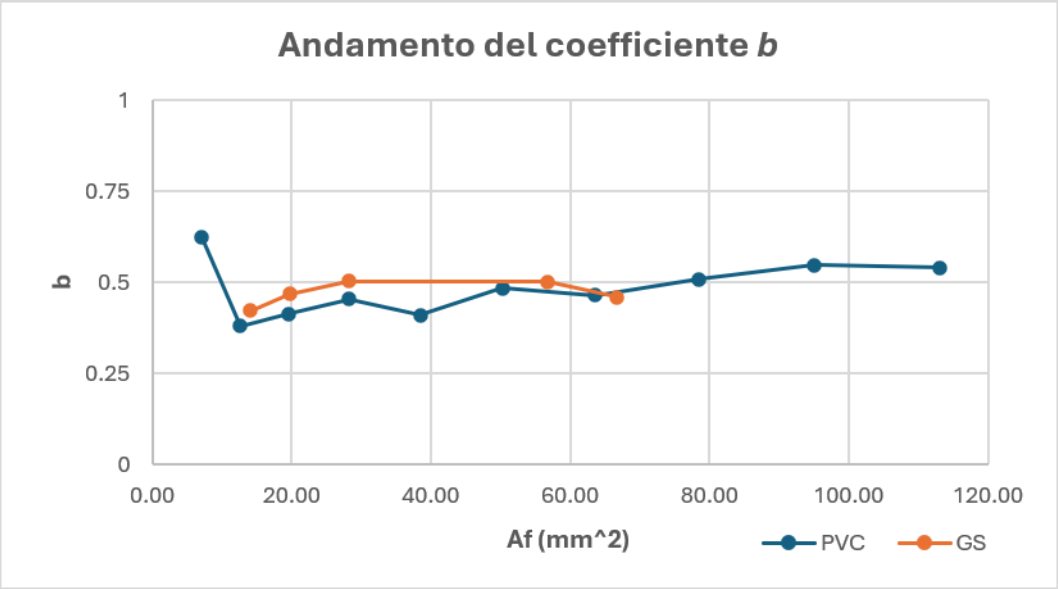


Figura 59: *andamento del coefficiente b.*

Gli studi condotti in laboratorio dimostrano questa teoria: il coefficiente *b*, si mantiene nell’intorno del valore 0,5. Il suo comportamento risulta consono alle aspettative. [5] Si denota inoltre, che l’esponente nel caso di condotta in PVC descrive un andamento più variabile rispetto a quello nel caso di condotta in ghisa. La spiegazione di questa variazione risiede nella diversa deformabilità elastica dei due materiali.

8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha avuto come scopo la misura delle perdite idriche da fori circolari e tagli longitudinali di dimensioni note in un impianto in pressione e la determinazione della relazione tra la portata in uscita dal foro e la pressione in condotta. Per lo svolgimento dello studio è stato usato e modificato, presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, un circuito in pressione già esistente che simula il funzionamento di una rete acquedottistica reale. La modifica applicata al circuito consiste nell'utilizzo di una scatola in plexiglass per il contenimento e il deflusso dell'acqua in perdita. Per eseguire le prove simulanti perdite reali sono stati realizzati fori circolari su di una condotta in PVC e tagli longitudinali su di una condotta in ghisa. Le prove sono state eseguite per diverse condizioni di pressione e portata in condotta e per ognuna di esse sono state fatte almeno due prove. I risultati delle prove sperimentali hanno mostrato che la portata in uscita dal foro aumenta al crescere della pressione in condotta secondo una funzione di potenza confermando quanto riportato in letteratura. L'analisi dei grafici estrapolati dai dati raccolti durante le prove ha evidenziato un'oscillazione dei dati di portata e pressione nel caso di fori o tagli con area piccola. Tale errore viene meno all'aumentare dell'area. Il comportamento del coefficiente *b* dell'equazione è perfettamente conforme con i risultati delle analisi precedenti: non si discostano in maniera significativa dal valore teorico 0,5 e non sembrano mostrare una relazione con l'area del foro. I valori del coefficiente *a*, invece, sono dipendenti dall'area del foro, sono cioè crescenti all'aumentare del diametro del foro.

Si potrebbero immaginare sviluppi futuri per questa analisi, partendo innanzitutto dal completamento dello studio dei campioni di taglio longitudinale su condotta in ghisa per poi passare allo studio del comportamento di questi ultimi applicati anche alle condotte in PVC.

9. BIBLIOGRAFIA

[1] ISTAT, Statistiche sull'acqua 2023-2025, Italia, 2026.

[2] ISPRA, Nel 2025 risorse idriche in calo rispetto al 2024. ISPRA ne monitora e aggiorna l'evoluzione, Italia, 2026.

[3] Darvini G. & Soldini L., Experimental Analysis for the Losses Assessment in Water Distribution System, DICEA, Università Politecnica delle Marche, Italy, 2022.

[4] De Paola F. & Giugni M., Leakages and pressure relation: an experimental research, Department of Hydraulic, Geotechnical and Environmental Engineering, University of Naples Federico II, Italy, 2012.

[5] Cassa A.M. & Van Zyl J.E, Predicting the pressure-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations, Journal of water supply: research and technology, 2013.

[6] Van Zyl J.E. & Cassa A.M., Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes, Journal of Hydraulic Engineering, 2014.

[7] De Marchis M. & Milici B., Leakage Estimation in Water Distribution Network: Effect of the Shape and Size Cracks, 2019.