



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura (DICEA)

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile ed Ambientale

**Ruolo del materiale e della forma della rottura nella
valutazione delle perdite idriche nelle condotte in pressione**

**Role of material and break shape in the assessment of water
losses in pressure pipes**

Relatore: Chiar.ma

Prof.ssa Ing. Giovanna DARVINI

Tesi di Laurea di:

Andrea COGNINI

Correlatori:

Prof. Ing. Luciano SOLDINI

Ing. Martina GAMBADORI

ANNO ACCADEMICO 2025 / 2026

Indice

1. Stato dell'arte.....	1
1.1. Formazione delle perdite	4
2. Scopo dello studio	6
3. Caratteristiche dell'impianto sperimentale.....	7
3.1. Funzionamento generale dell'impianto	8
3.2. Strumentazione utilizzata	9
3.2.1. Serbatoio di alimentazione dell'impianto.....	9
3.2.2. Pompa di mandata.....	11
3.2.3. Condotte	13
3.2.4. Valvole motorizzate.....	16
3.2.5. Valvola a flusso avviato.....	18
3.2.6. Inverter	20
3.2.7. Data Logger	21
3.2.8. Manometro a membrana.....	22
3.2.9. Misuratori di portata	23
3.2.10. Misuratore di livello.....	24
3.2.11. Protezione in plexiglass e vasca di raccolta della perdita	25
4. Calibrazione degli strumenti.....	27
4.1. Calibrazione dei misuratori di portata e del misuratore di livello.....	27
5. Prove sperimentali.....	32
5.1. Metodologia di esecuzione delle prove.....	32
5.2. Elaborazione dei dati sperimentali	34
6. Modellazione Teorico-Sperimentale	40

7. Influenza della geometria del foro sui parametri a e b della Power Equation.....	42
8. Analisi dei risultati sperimentali	54
9. Conclusioni	65
10. Appendice.....	68
11. Bibliografia e sitografia	89

1. Stato dell'arte

Le perdite idriche costituiscono una delle principali criticità nella gestione delle risorse idriche, in quanto determinano rilevanti conseguenze di natura economica, ambientale e legate alla disponibilità della risorsa stessa. Tali perdite possono essere attribuite a diversi fattori, tra cui l'obsolescenza delle infrastrutture, il deterioramento delle condotte e le dispersioni lungo le reti di distribuzione.

In particolare, esse si distinguono in perdite fisiche, causate da guasti o rotture nelle tubazioni, e perdite apparenti, riconducibili a errori di misurazione o a prelievi non autorizzati (allacci abusivi).

La riduzione delle perdite idriche rappresenta pertanto un obiettivo prioritario, in quanto consente di preservare una risorsa fondamentale, migliorare la sostenibilità del sistema idrico, incrementare l'efficienza energetica e contenere i costi di gestione.

L'Italia è il terzo Stato europeo per disponibilità idrica e questa abbondanza ha colmato per decenni le disfunzioni del sistema idrico, in cui si perde mediamente oltre il 40 % dell'acqua che viene trasportata, ossia finisce nel terreno prima di raggiungere i consumatori finali. (Degl'Innocenti, 11 Ottobre 2024)

Nelle reti italiane si perde annualmente un volume d'acqua che potrebbe soddisfare il fabbisogno idrico di oltre 43 milioni di persone: secondo ISTAT (2025) la dispersione media nazionale dell'acqua immessa in rete è in aumento, e oggi, si attesta intorno al 42,4% come mostrato in Figura 1.

ACQUA EROGATA E PERDITE IDRICHE TOTALI NELLE RETI COMUNALI DI DISTRIBUZIONE DELL'ACQUA POTABILE [ANNI 1999-2020; VALORI PERCENTUALI SUL VOLUME IMMESSO IN RETE]

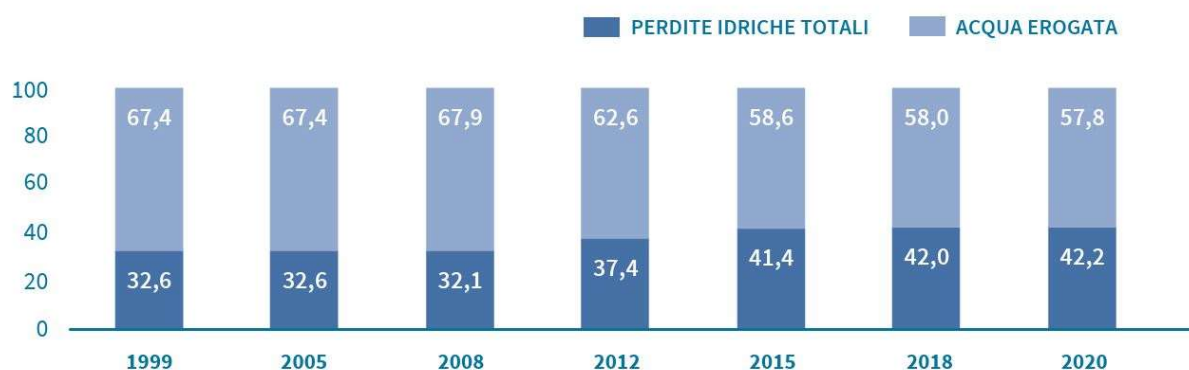


Figura 1. Censimento delle acque per uso civile. Fonte: Istat.

Le perdite presentano un andamento fortemente variabile sul territorio nazionale, evidenziando un marcato divario tra Nord e Sud (Figura 2), riconducibile sia a differenze infrastrutturali sia a condizioni gestionali. I valori più elevati si registrano nelle regioni del Centro-Sud, dove in diversi casi si supera il 50%: Basilicata (65,5%), Abruzzo (62,5%), Molise (53,9%), Sardegna (52,8%) e Sicilia (51,6%). In linea con tale tendenza, anche a livello di distretti idrografici si osservano perdite più ingenti nel Distretto dell'Appennino meridionale (50,4%) e nel Distretto dell'Appennino centrale (45,5%).

Al contrario, le aree settentrionali mostrano generalmente performance migliori, con valori più contenuti sia a scala regionale sia distrettuale. In particolare, le perdite risultano inferiori in Emilia-Romagna (29,7%) e in Valle d'Aosta (29,8%), mentre a livello distrettuale si registrano percentuali più basse nel Distretto del Fiume Po (32,5%), nei Distretti delle Alpi orientali (40,9%) e dell'Appennino settentrionale (40,6%).

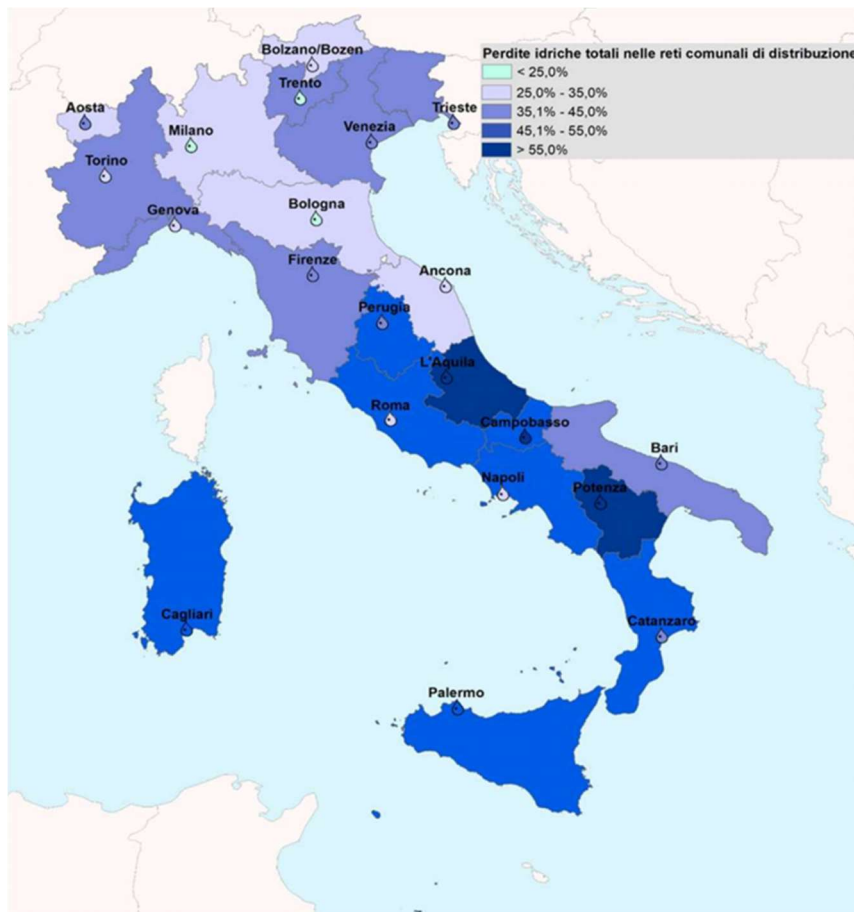


Figura 2. Fonte: Istat, Censimento delle acque per uso civile del 2022

La dispersione idrica è un fenomeno quasi impossibile da eliminare, infatti secondo quanto riporta l'Istat le dispersioni sono fisiologiche e legate all'estensione della rete, al numero degli allacci, alla loro densità e alla pressione d'esercizio.

Il problema delle perdite idriche non riguarda soltanto il territorio nazionale, ma si estende anche a livello europeo e globale, aggravando la carenza di risorse idriche e lo stress idrico.

Infatti, secondo Balocchi (2023) "Le perdite idriche variano notevolmente nell'UE: si va da meno del 5% a oltre il 50% dell'acqua prelevata che va persa. A riportarlo è una comunicazione della Commissione Europea riguardante la necessità di affrontare la sfida della carenza idrica e della siccità nell'Unione Europea".

Dall'analisi comparativa dei principali Paesi europei (EurEau, 2020) emerge come il sistema idrico italiano presenti performance inferiori rispetto a Germania, Francia e Regno Unito.

Le differenze risultano evidenti in primo luogo sotto il profilo infrastrutturale, con reti idriche generalmente più estese ed efficienti negli altri Paesi. Anche dal punto di vista gestionale emergono modelli più strutturati, caratterizzati da una maggiore integrazione tra componente pubblica e privata e da un'organizzazione complessivamente più efficiente del servizio. A ciò si aggiunge la presenza di sistemi di regolazione più solidi e articolati, orientati sia al controllo delle tariffe sia alla tutela del consumatore, elementi che contribuiscono a garantire maggiore trasparenza ed efficacia.

Nel complesso, il confronto evidenzia come il ritardo italiano non sia riconducibile a un singolo fattore, ma a una combinazione di criticità infrastrutturali, gestionali e regolatorie, che rendono necessario un rafforzamento complessivo del settore.

1.1. Formazione delle perdite

Come riportato da IREN (2025), "Le cause delle perdite idriche sono molteplici e possono variare in base alle specificità territoriali e alle condizioni delle infrastrutture". Tra le principali si annoverano:

- **Vetustà delle infrastrutture:** molte reti idriche italiane sono state realizzate diversi decenni fa e necessitano di interventi di ammodernamento (Figura 3 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

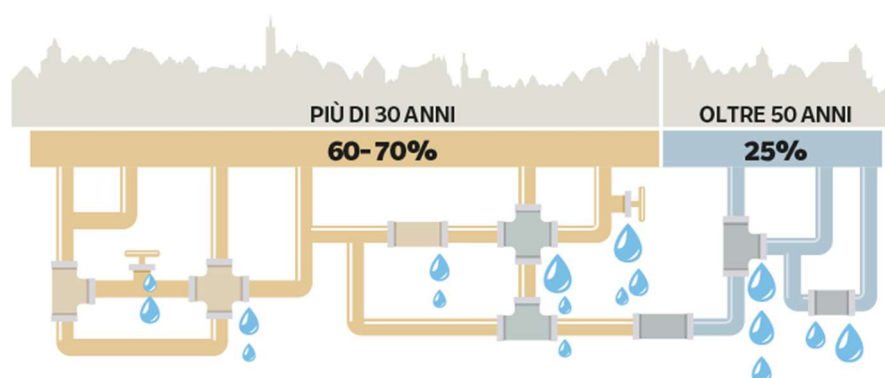


Figura 3. L'età della rete idrica italiana Fonte: Utilitalia

- **Mancanza di manutenzione:** la scarsa o inefficace manutenzione può portare a un deterioramento accelerato delle infrastrutture.
- **Errori di gestione:** pratiche gestionali inadeguate possono contribuire all'aumento delle perdite, come una scarsa regolazione delle pressioni o una gestione inefficiente delle risorse.
- **Fattori ambientali:** eventi sismici, variazioni climatiche e condizioni del terreno possono influire sull'integrità delle reti idriche.

2. Scopo dello studio

L'analisi sperimentale è stata condotta con l'obiettivo di determinare il ruolo e l'influenza del materiale costituente le condotte sul fenomeno delle perdite idriche, evidenziandone il diverso comportamento al variare delle condizioni operative adottate durante le prove. I materiali oggetto dello studio sono la ghisa ed il polivinilcloruro (PVC).

Nel presente lavoro, a partire dall'interpolazione dei dati sperimentali, è stata ricavata una legge di potenza (power equation), successivamente utilizzata come modello di riferimento. Tale formulazione è stata quindi confrontata con le relazioni sperimentali proposte da J.E. VanZyl e A.M. Cassa, nonché con la legge di Torricelli. La valutazione dei diversi modelli è stata condotta mediante un'analisi matematico-statistica basata sul calcolo dell'errore quadratico normalizzato, al fine di verificarne il grado di adattamento ai dati sperimentali.

Inoltre, l'analisi è stata estesa allo studio dell'influenza della geometria della rottura sull'entità delle perdite idriche, valutando come differenti forme dell'apertura incidano sul comportamento della fuoriuscita d'acqua a parità di materiale. Parallelamente, è stato esaminato il comportamento della medesima tipologia di foro realizzata su materiali diversi, al fine di evidenziare le differenze nel fenomeno delle perdite in funzione del materiale.

Tale confronto ha consentito di approfondire il ruolo congiunto della geometria del danno e del materiale nella determinazione dell'entità e della variazione delle perdite al variare delle condizioni operative.

3. Caratteristiche dell'impianto sperimentale

L'analisi sperimentale delle perdite nelle condotte in pressione è stata eseguita presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche, impiegando un impianto in pressione a circuito chiuso preesistente, che simula le condizioni di una rete acquedottistica in termini di portata e pressione (Figura 4).



Figura 4. Circuito in pressione presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche.

L'impianto è formato da una serie di condotte in PVC con lunghezza complessiva di 20 metri (linea principale), dove il flusso scorre senza alcuna perdita. Al di sopra di questo circuito si trova una linea secondaria, rialzata di circa 80 cm, costituita dalla condotta di prova (di lunghezza 6m), in cui vengono eseguiti fori e tagli per lo studio in oggetto. Le dimensioni delle rotture analizzate vengono scelte in modo che abbiano tutte la stessa area.

Il collegamento tra le due linee dell'impianto avviene per mezzo di valvole motorizzate, poste all'inizio e alla fine della linea secondaria (Figura 5)



Figura 5. Valvole motorizzate per il collegamento della linea principale e quella secondaria.

3.1. Funzionamento generale dell'impianto

L'intero circuito viene alimentato da un serbatoio a superficie libera, mentre le condizioni operative dell'impianto vengono regolate tramite la valvola a flusso avviato e la pompa multistadio verticale a girante radiale.

La configurazione del sistema permette due tipologie diverse di funzionamento, in quanto l'acqua può transitare nella linea principale, condizione di "impianto chiuso", oppure nella linea secondaria, condizione di "impianto aperto".

Nella condizione di "impianto chiuso", riferendosi alla circolazione dell'acqua esclusivamente nella linea principale del sistema, non si ha alcuna perdita: in questo sono simulate le condizioni operative di una rete in pressione completamente integra.

Nella condizione di "impianto aperto", invece, tramite i by-pass a T, il flusso d'acqua viene completamente deviato dalla linea principale alla linea secondaria, sulla quale è realizzata

una rottura di dimensioni note. In questo modo sono simulate le condizioni operative di una rete in pressione, soggetta ad una rottura.

La perdita d'acqua presente nella vasca di raccolta viene rimessa nel serbatoio di alimentazione dell'impianto tramite una pompa sommergibile azionabile manualmente quando, al termine della prova, è necessario svuotare la vasca in questione.

3.2. Strumentazione utilizzata

Di seguito, è riportata la descrizione dei vari elementi che compongono l'impianto e che sono stati utilizzati per condurre l'analisi oggetto di questo studio.

3.2.1. Serbatoio di alimentazione dell'impianto

Il serbatoio di alimentazione dell'impianto è una vasca di dimensioni interne di 2 m di altezza, 1 m di larghezza e 2 m di lunghezza, realizzato in polipropilene. Il suo interno è diviso in due compartimenti separati da un setto alto 1,5 m, per permettere all'acqua, in arrivo dal circuito, di entrare nel primo comparto e di stramazzare nel secondo dall'alto; in questo modo si evita che l'eventuale aria intrappolata nell'acqua raggiunga la pompa causando cavitazione e che questa porti ad un suo progressivo danneggiamento (Figura 6).

L'acqua di perdita raccolta nell'apposita vasca, quando necessario, viene pompata all'interno del serbatoio di alimentazione, evitando così un abbassamento eccessivo del pelo libero di quest'ultimo, che può modificare le condizioni al contorno delle prove e quindi comprometterne l'affidabilità (Figura 7).



Figura 6. Vista esterna e interna del serbatoio principale



Figura 7. Vista del serbatoio di alimentazione durante la ricarica

3.2.2. Pompa di mandata

Il serbatoio alimenta l'elettropompa, che garantisce le condizioni operative delle prove, in termini di portata e pressione.

L'elettropompa è una pompa multistadio verticale a tre stadi e con girante radiale Caprari CVX321/3 (Figura 8 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Il motore elettrico della pompa ha una potenza di 5,5 kW, una frequenza di 50 Hz, una tensione di 400 V, una velocità di 2925 1/m e una corrente di 10,1 A. Questo motore consente lo sviluppo di una portata minima di 4 l/s ad una prevalenza di 56,93 m e di una portata massima di 10,2 l/s ad una prevalenza di 54,24 m.

Le curve caratteristiche della pompa al variare del numero di giri del motore sono riportate in Figura 9.

In condizioni di esercizio la pompa fornisce una portata di 7,56 l/s ad una prevalenza di 45,98 m.

Lungo la condotta di aspirazione e di mandata della pompa ci sono due valvole a membrana di diametro DN65 e pressione nominale PN16.



Figura 8. Elettropompa verticale multistadio con valvole a membrana.

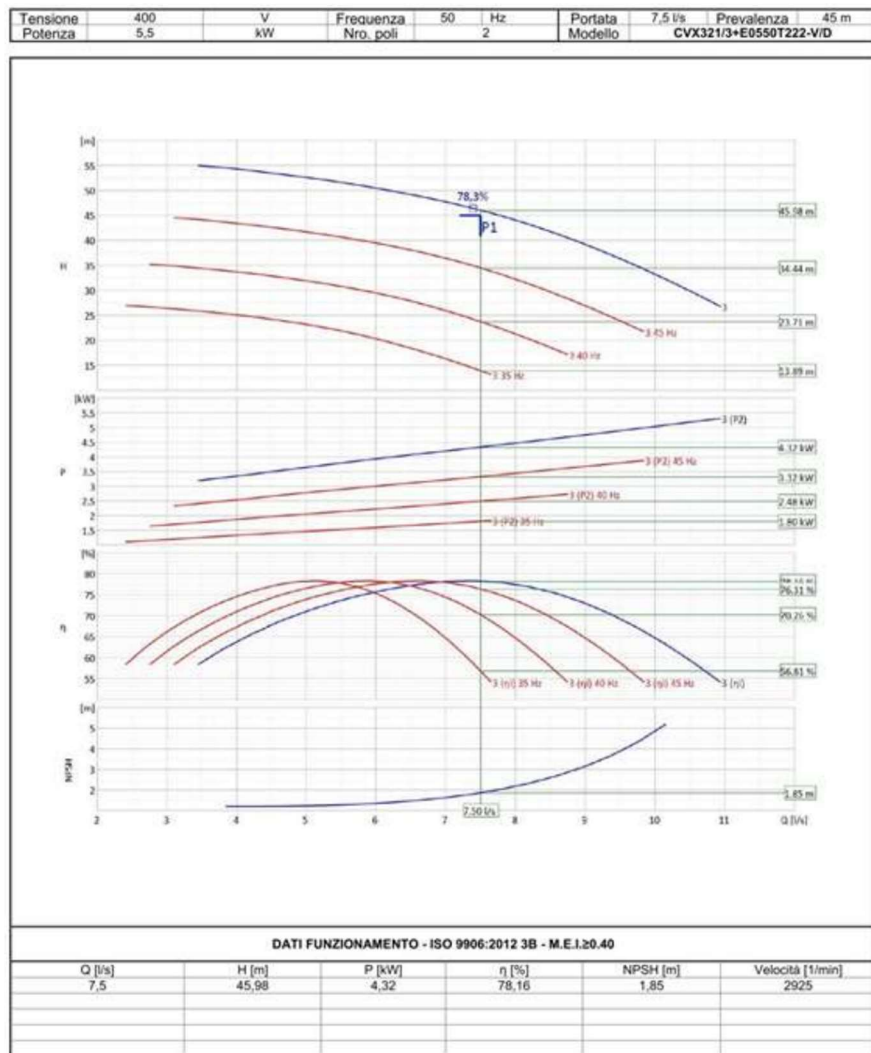


Figura 9. Curve di prestazione della pompa multistadio.

3.2.3. Condotte

La linea principale dell'impianto è realizzata in PVC, con pressione nominale PN16 nel lato del serbatoio e nei due lati corti, ha una colorazione grigia. Il raccordo tra il serbatoio e la pompa è di diametro nominale DN75, i tratti subito a monte e a valle del misuratore di portata sono di DN90, il resto della condotta è DN100. Le tubature con diametro differente sono collettate tramite l'impiego di giunti (Figura 10). Le deviazioni vengo realizzate tramite l'unione di due curve a 45°, che in una condotta creano un cambio di direzione a 90°, ma con un raggio di curvatura maggiore e più fluido rispetto a un singolo gomito a 90°, in modo da ridurre drasticamente le perdite di carico localizzate e la turbolenza del fluido nella rete.



Figura 10. Raccordo flangiato.

Le curve della linea principale, munite di blocchi di ancoraggio, sono formate dall'unione di due curve di 45° (Figura 11).



Figura 11. Curve di 45° unite con fissato il blocco di ancoraggio.

La line secondaria dell'impianto è caratterizzata da una condotta lunga 6m intercambiabile a seconda della prova che si vuole condurre. Sono state testate condotte di due diversi materiali, nello specifico:

1. Ghisa Sferoidale (GS) con diametro nominale DN100 e pressione nominale PN16. Lo spessore della ghisa è pari a 4,8 mm, mentre la malta cementizia di rivestimento interno ha uno spessore di $4,0 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ per un totale di $8,8 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$.

Questa tubazione ha colorazione blu ed è collegata al tubo in PVC della linea secondaria tramite un imbocco flangiato a monte (Figura 12 a) ed una tazza flangiata a valle (Figura 12 b) entrambi in ghisa.



Figura 12 a. Collegamento con tazza flangiata a monte



Figura 12 b. Collegamento con imbocco flangiato a valle

2. PVC (Polivinilcloruro) con diametro nominale DN100 ed una pressione nominale PN16. Lo spessore del PVC è pari a 6,6 mm.

Questa tubazione ha colorazione grigia ed è collegata ai tubi in PVC della linea secondaria tramite giunti flangiati sia a monte che a valle (Figura 13 a e 13 b).



Figura 13 a. Sbocco flangiato a valle



Figura 13 b. Imbocco flangiato a monte dx.

3.2.4. Valvole motorizzate

La valvola motorizzata VB060 è dotata di un otturatore a disco metallico, che, ruotando attorno al proprio asse grazie ad un albero posto al centro del disco stesso, comprime la tenuta che ricopre il corpo della valvola.

I parametri principali nominali della valvola motorizzata, il cui materiale esterno è costituito da un tecnopolimero, sono: bassa tensione nominale a 24 V, tempo di manovra 9 s, rotazione di 90°.

Nel circuito sono presenti tre valvole motorizzate: la prima si trova tra il raccordo a T e l'imbocco della linea secondaria (Figura 14 a), la seconda tra la zona di valle della linea secondaria e il raccordo a T e la terza dopo il primo raccordo a T sulla condotta di by-pass della linea principale (Figura 14 b).

Ad impianto chiuso le due valvole poste a monte e a valle della linea secondaria sono chiuse, mentre la terza valvola sulla condotta di bypass, nella linea principale, rimane aperta.

Passando al funzionamento ad “impianto aperto”, si aprono le due valvole poste nella linea secondaria e contemporaneamente si chiude la terza valvola.

Il comando di apertura/chiusura delle valvole viene dato attraverso un pulsante di accensione/spengimento situato nel quadro elettrico, riportato in Figura 15.

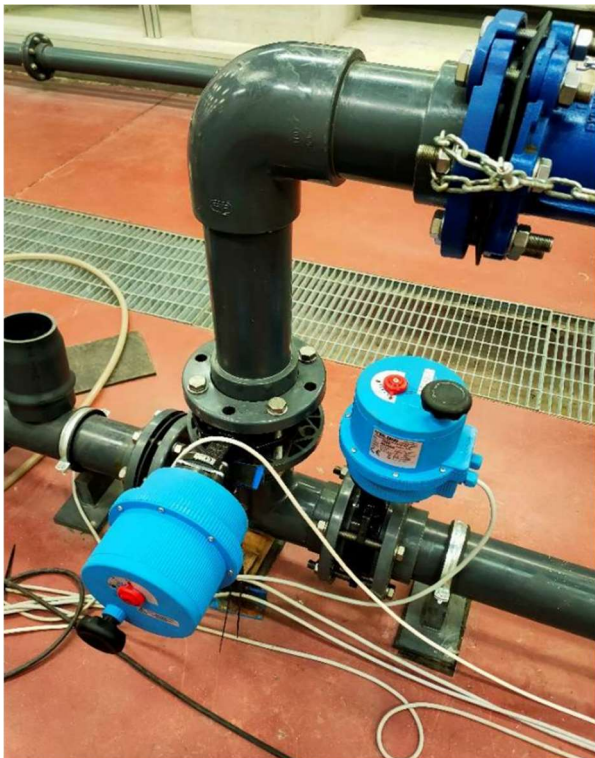


Figura 14 a. Valvole motorizzate di valle



Figura 14 b. Valvole motorizzate di monte

Il quadro elettrico alimenta i circuiti per le valvole motorizzate e interrompe l'alimentazione di esse in caso di pericolo (per cortocircuito e/o sovraccarico), è composto da un interruttore a 24 V e dai pulsanti di accensione (verde) e di arresto (rosso).



Figura 15. Quadro elettrico.

Lo schema elettrico è costituito da:

- Tre trasformatori, uno per ogni valvola (V1, V2, V3),
- Due interruttori: un pulsante per l'accensione ed uno di arresto,
- Una bobina di Relè (KF1)
- Tre fusibili (FC1, FC2, FC3) con la funzione di protezione delle valvole, interrompendo il circuito, se si superano i 2 A.

Il quadro elettrico serve per aprire l'impianto all'inizio della prova e chiuderlo quando si deve tornare alla condizione di impianto chiuso.

3.2.5. Valvola a flusso avviato

La valvola a flusso avviato in ghisa sferoidale DN100 e PN16, con otturatore parabolico, è posizionata al termine del circuito, prima dello sbocco nel serbatoio di alimentazione (Figura 16**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Come per la pompa, questa attrezzatura permette di regolare il funzionamento dell'impianto in termini di pressione e portata, applicando una manovra di apertura o di chiusura della stessa, che permette di raggiungere le condizioni operative specifiche definite per lo svolgimento delle prove sperimentali.



Figura 16. Valvola a flusso avviato.

3.2.6. Inverter

L'elettropompa è collegata ad un inverter trifase che consente di variare il numero di giri del motore in termini di frequenza da 35 Hz a 50 Hz, rispettivamente valore minimo e valore caratteristico della pompa.

Questo permette di regolare l'impianto su diversi valori di portata e pressione, diversificando in questo modo le prove riferite alla stessa fessura (Figura 17).



Figura 17. Inverter.

3.2.7. Data Logger

Lungo la condotta sono presenti due misuratori elettromagnetici di portata, due manometri a membrana e un misuratore di livello a ultrasuoni, i quali vengono collegati ad un registratore elettronico dei dati “Ecograph T RSG35” della “Endress+Hauser” (Data Logger) che annota i valori istantanei di pressione e di portata e ne permette l’extrapolazione in file di formato ‘.csv’ e ‘.xlsx’, permettendo così l’elaborazione delle prove tramite appositi fogli di calcolo.

Le misure sono visualizzate in tempo reale nello schermo del Data Logger in termini di valori puntuali tramite un grafico a scorrimento “*waveform chart*” (Figura 18).

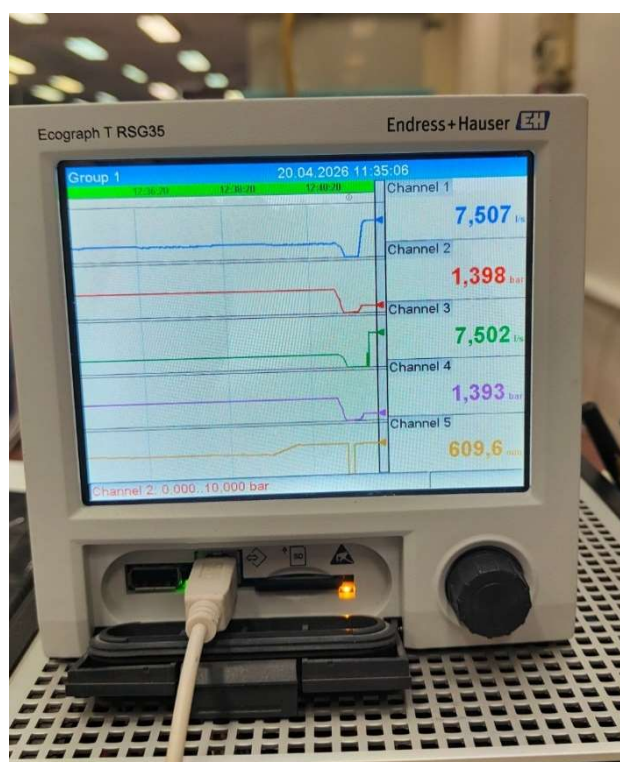


Figura 18. Data Logger.

3.2.8. Manometro a membrana

Il manometro permette l'acquisizione dei valori di pressione all'interno della condotta, espressi in bar, con passo temporale di 1 secondo.

Nell'impianto sono presenti 2 manometri Endress-Hauser Cerabar PMP21 a membrana (Figura 19), situati sia a monte che a valle del tubo oggetto di studio (linea secondaria).



Figura 19. Manometro a membrana.

3.2.9. Misuratori di portata

L'impianto è dotato di due misuratori di portata elettromagnetici: uno posto a monte e l'altro a valle della linea secondaria:

- Il primo del tipo Endress-Hauser Promag 10D80 è localizzato subito dopo la pompa, a monte della perdita, ha un diametro nominale DN80 (Figura 20 a),
- Il secondo del tipo Endress-Hauser Promag 400 ed è localizzato a valle della perdita, prima della valvola a flusso avviato (Figura 20 b).

I due misuratori permettono l'acquisizione ogni secondo dei valori di portata espressi in [l/s] e hanno la capacità di misurare fino a un massimo di 10,5 l/s.



Figura 20 a. Misuratore di portata di monte (Promag 10D80) Figura 20 b. Misuratore di portata di valle (Promag 400)

3.2.10. Misuratore di livello

L'impianto è dotato di un unico misuratore di livello ad ultrasuoni (Figura 21), "Baumer UR18.DA0.2-UAMJ.9SF", posizionato al di sopra della vasca di raccolta della perdita, in grado di acquisire ogni secondo il livello del pelo libero nel serbatoio. Tale misura, espressa in millimetri, rappresenta la distanza tra il sensore e la superficie dell'acqua, consentendo di analizzare la variazione del livello durante lo svolgimento della prova con un errore $< 0,3$ mm.

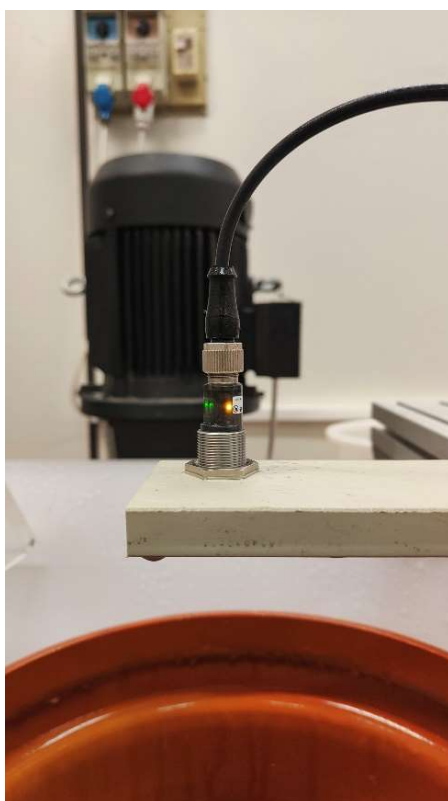


Figura 21. Misuratore di livello

3.2.11. Protezione in plexiglass e vasca di raccolta della perdita

Dato che l'acqua esce ad elevata pressione dalla fessura, è stata aggiunta, attorno alla stessa, una protezione in plexiglass, per garantire la confluenza dell'intera perdita, generata a impianto aperto, in una vasca di raccolta esterna all'impianto a forma di parallelepipedo rettangolo con dimensioni note: Lunghezza 1000mm, Larghezza 600mm, Altezza 700mm (Figura 22). Al di sopra della vasca di raccolta della perdita è posto il misuratore di livello. Date le dimensioni della vasca di raccolta, un aumento del livello del pelo libero di un millimetro corrisponde ad un volume di perdita pari a 0,6 litri di acqua. Inoltre, si è riscontrato, da prime analisi sperimentali, che, durante l'esecuzione della prova, i valori forniti dal misuratore di livello oscillavano notevolmente a causa dell'agitazione e della turbolenza del pelo libero generata dall'arrivo dell'acqua in pressione, e che al termine della perdita si necessitavano di diversi secondi per ottenere uno stato di quiete nella vasca di raccolta, tale da consentire l'acquisizione di valori affidabili dal misuratore. Per evitare un eccessivo disturbo di questi valori puntuali forniti dal misuratore di livello, è stato inserito all'interno del serbatoio di raccolta un cilindro cavo in PVC, sollevato dal fondo della vasca, per garantire una condizione di maggiore calma del pelo libero in corrispondenza del misuratore di livello. In questo modo è stato possibile smorzare le oscillazioni ottenendo valori affidabili, in termini di variazione di livello, anche quando la prova è in esecuzione.



Figura 22. Serbatoio di raccolta con protezione in plexiglass

4. Calibrazione degli strumenti

La calibrazione degli strumenti è un'operazione fondamentale per garantire l'accuratezza e l'affidabilità dei dati raccolti. Essa consente infatti di verificare, ed eventualmente correggere, la capacità dello strumento, di fornire misure prossime al valore reale e di definire al contempo l'incertezza associata alla misura ottenuta.

Oltre alle calibrazioni già eseguite sull'impianto sperimentale, come quella dei misuratori di pressione, che garantisce un errore inferiore a $\pm 0,3\%$ del valore letto su un campo di misura fino a 10 bar, si è proceduto alla calibrazione del misuratore di livello, introdotto recentemente nell'impianto. È stato inoltre effettuato un confronto tra le misure fornite da quest'ultimo e quelle ottenute dai misuratori di portata, anch'essi sottoposti a una nuova procedura di calibrazione.

4.1. Calibrazione dei misuratori di portata e del misuratore di livello

Sono state condotte prove di verifica al fine di accertare la coerenza tra i valori di perdita nella condizione di impianto aperto, determinati sia come differenza tra le portate misurate dai due misuratori elettromagnetici, sia come variazione del livello del pelo libero nella vasca di raccolta dell'acqua. Le analisi sono state eseguite sulla condotta in PVC installata sulla linea secondaria, considerando due diverse dimensioni del foro, ciascuna analizzata in diverse condizioni operative riportate in Tabella 1.

Tabella 1

Area foro	Prova	Frequenza	Portata	Pressione	Durata efficace
20,9 mm ²	1	35 Hz	6,0 l/s	1,98 bar	20 s
	2	35 Hz	4,0 l/s	2,55 bar	25 s
	3	50 Hz	5,5 l/s	5,20 bar	20 s
26,6 mm ²	1	35 Hz	6,0 l/s	1,98 bar	20 s
	2	35 Hz	4,0 l/s	1,98 bar	20 s
	3	50 Hz	5,5 l/s	5,20 bar	15 s

Si è proceduto confrontando i valori della perdita ad impianto aperto, mediante diversi metodi di misurazione. In primo luogo, si è intervenuti sulla zona di perdita fissando un convogliatore flessibile, come mostrato in Figura 23, al fine di intercettare e di dirigere il flusso in modo più preciso verso la zona desiderata.



Figura 23. Zona di perdita adattata all'analisi di calibrazione

In condizioni di impianto aperto, la perdita efficace è stata raccolta in un recipiente graduato. Va sottolineato che la portata uscente dalla rottura nei primi 20 secondi di prova non è stata considerata, in quanto oltre ai 9 secondi necessari alla completa apertura delle valvole motorizzate, è stato considerato un ulteriore intervallo di tempo, affinché le condizioni interne all'impianto si stabilizzassero.

Tramite la scala graduata del recipiente è stato possibile determinare il volume totale di perdita accumulato nell'intervallo di riferimento. Successivamente, tale volume è stato riversato nella vasca di raccolta, così da determinare una variazione del livello del pelo libero dell'acqua rispetto al valore di partenza. Questa differenza di altezza, definita come

Δh , è stata misurata sia tramite un misuratore di livello digitale sia manualmente mediante strumenti analogici.

Dall'analisi dei risultati si è osservato che, in condizioni di quiete del pelo libero, le perdite, misurate tramite il misuratore di livello ad ultrasuoni e con metodi analogici, presentano un errore pari a $\pm 5\%$, che tende a ridursi progressivamente all'aumentare del volume raccolto di perdita.

Al fine di valutare anche l'accuratezza dei misuratori di portata elettromagnetici, si è proceduto ad analizzare i dati acquisiti da questi durante i periodi di riferimento.

Si è riscontrato, a impianto chiuso, che i valori del misuratore di monte e di valle non coincidevano, pertanto, per compensare questa discrepanza, si è provveduto a detrarre lo scarto dei valori dei due misuratori a impianto chiuso dalla differenza dei valori rilevati dai due misuratori ad impianto aperto. In questo modo, i nuovi valori ottenuti hanno uno scostamento, rispetto a quelli ottenuti con il misuratore di livello, inferiore all' $\pm 8\%$ che si riduce notevolmente all'aumentare del volume di perdita scendendo al di sotto del $\pm 5\%$, i valori risultano così essere accettabili ai fini dell'analisi in oggetto.

Di seguito, sono riportati i grafici per il confronto tra i volumi di perdita ricavati attraverso le 4 metodologie appena descritte. Vengono illustrati nelle Figure 24 e 26 il caso senza correzione, derivante dalla calibrazione e nelle Figure 25 e 27 quello con correzione.

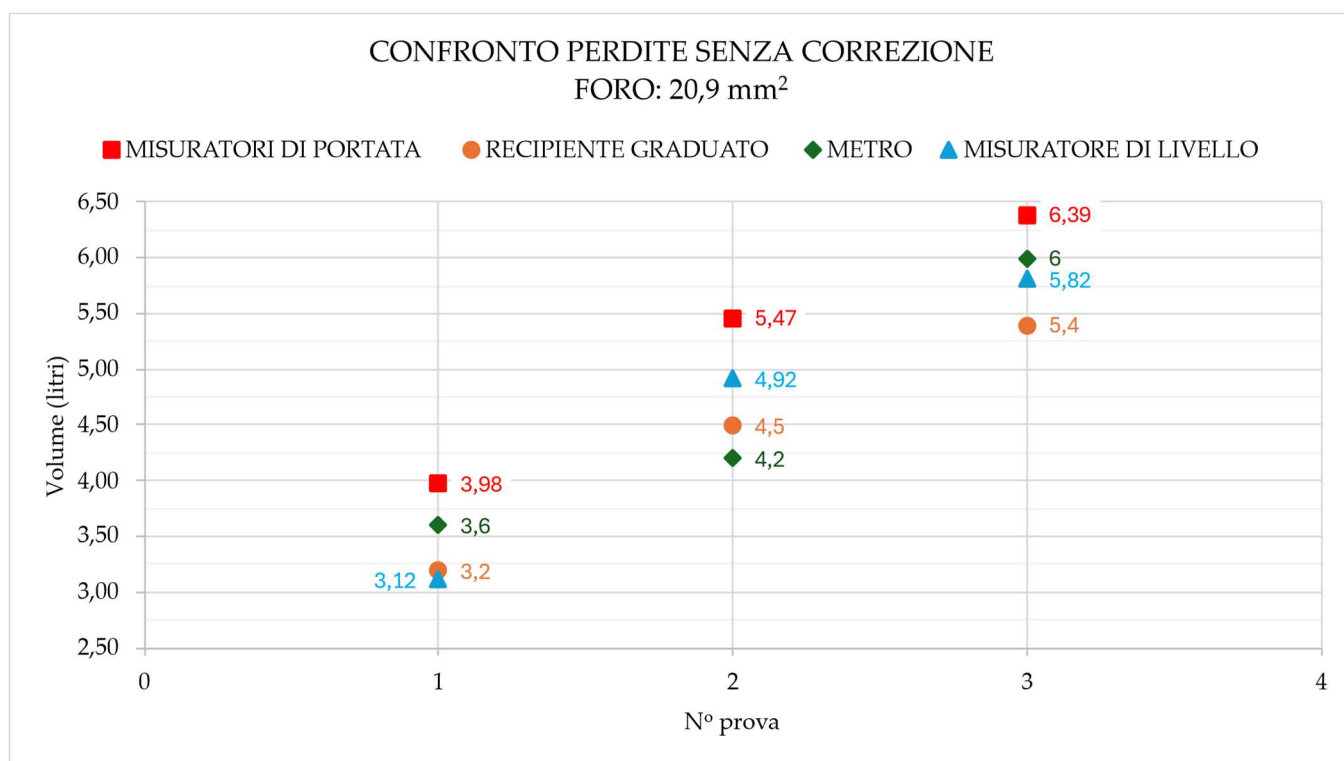


Figura 24. Confronto senza correzione, area foro=20,9 mm²

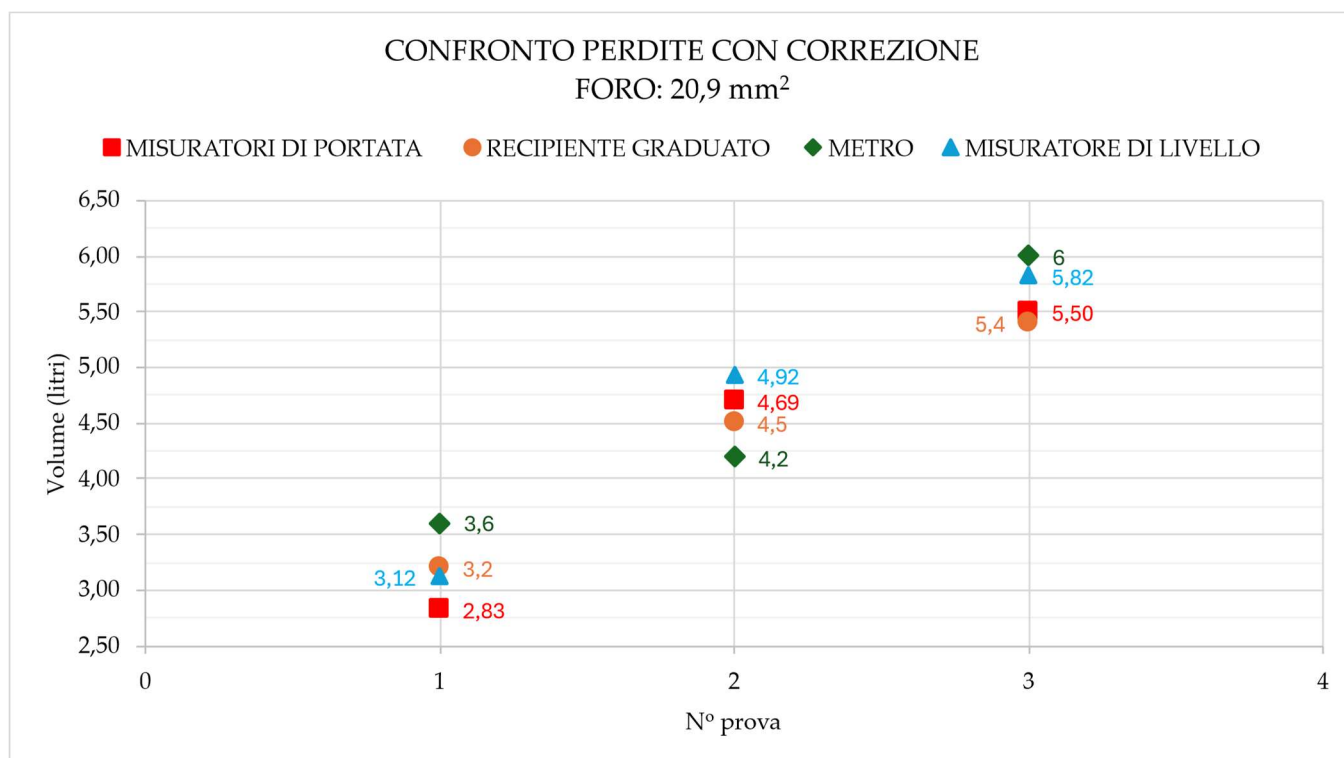


Figura 25. Confronto con correzione, area foro=20,9 mm²

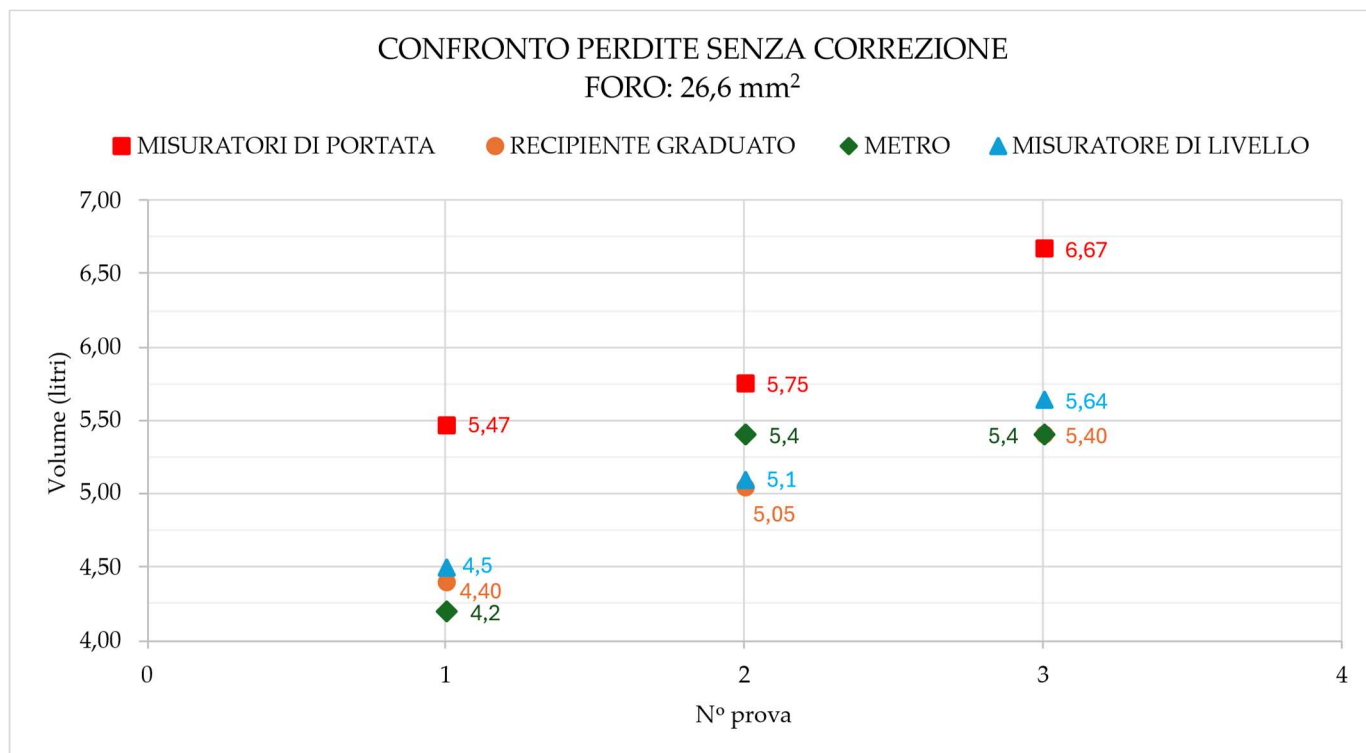


Figura 26. Confronto senza correzione, area foro=26,6 mm²

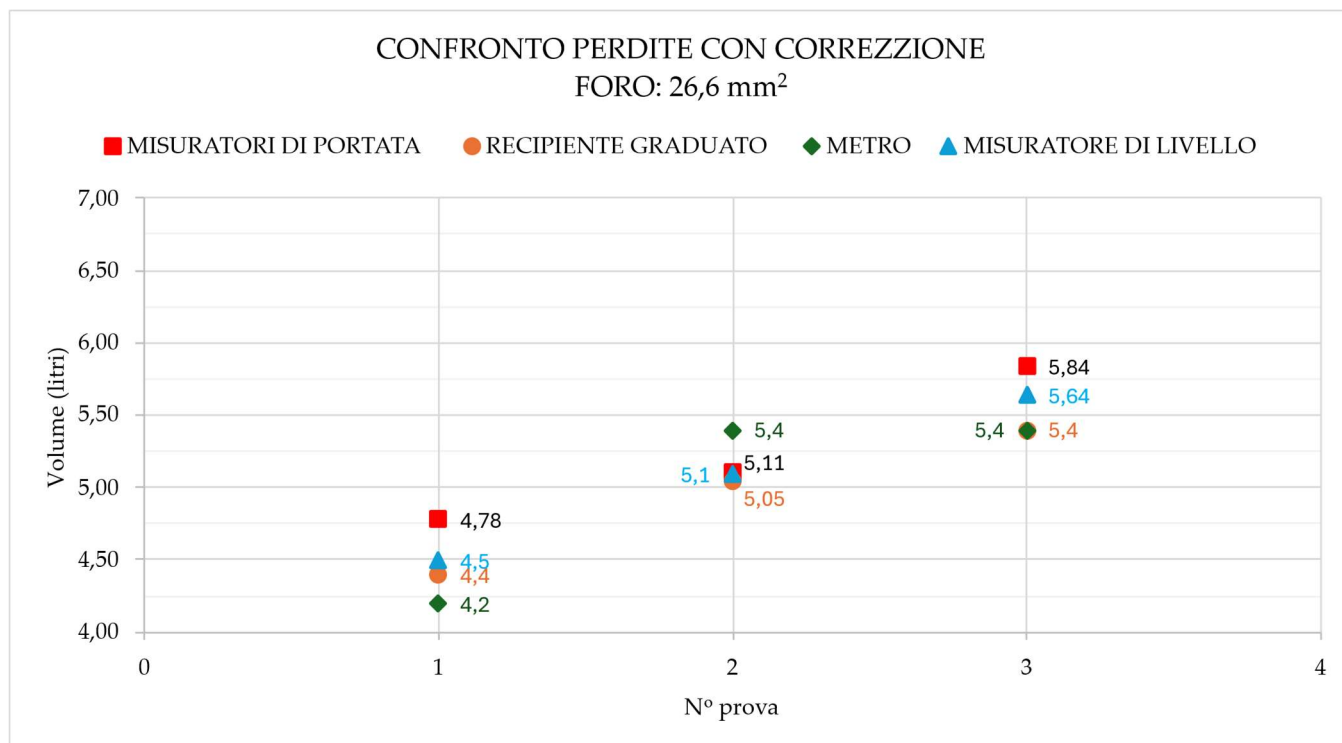


Figura 27. Confronto con correzione, area foro=26,6 mm²

5. Prove sperimentali

Nel seguente capitolo viene descritta la campagna sperimentale condotta per l'analisi delle perdite idriche. In particolare, vengono illustrati le modalità di esecuzione delle prove e le procedure adottate per l'elaborazione dei dati.

5.1. Metodologia di esecuzione delle prove

Le modalità di esecuzione della prova sono state scelte con lo scopo di garantire un'affidabilità dei dati ottenuti.

Tutte le prove (al variare di forma e dimensione di rottura e di tipo di materiale) sono state svolte nelle stesse condizioni operative, in termini di portata e pressione: questo ha permesso di rendere confrontabili i risultati ottenuti in modo da poter isolare e confrontare l'influenza dei vari aspetti delle perdite.

Ogni rottura viene analizzata con quattro valori di frequenza prestabiliti: 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz e 50 Hz e rispettivamente in ogni frequenza con dodici valori di portata diversi, progressivamente sempre minori, nel seguente ordine: 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, impostate tramite l'utilizzo della valvola a flusso avviato.

I valori di portata prefissati per lo svolgimento delle prove sono stati definiti al fine di riprodurre condizioni operative riscontrabili in una rete acquedottistica reale.

A ciascuna combinazione di frequenza e di posizione della valvola corrisponde una coppia di valori di portata e di pressione: si osserva che la pressione varia in modo direttamente proporzionale alla frequenza e inversamente proporzionale alla portata. I valori prefissati di pressione variano tra un minimo di 1,2 bar ed un massimo di 5,7 bar, in condizioni di impianto chiuso ad una frequenza di 35 Hz e di 50 Hz rispettivamente, mentre la portata varia tra un valore minimo di 2,9 l/ e un massimo di 7,7 l/s.

Prima dell'avvio di ciascuna prova, è necessario che l'impianto si trovi in condizioni di chiusura e che siano raggiunti i valori di portata e di pressione previsti per la specifica fase del ciclo. Questo passaggio è fondamentale, poiché ogni prova richiede condizioni al contorno ben definite e stabili; in caso contrario, si potrebbero ottenere risultati affetti da errori o scarsa affidabilità.

In assenza di perdita, il tempo necessario, affinché siano raggiunte le condizioni stazionarie all'interno dell'impianto, è di circa 2 minuti. Inoltre, tale intervallo è stato ritenuto rappresentativo per la determinazione dei valori medi delle grandezze misurate, utilizzati come riferimento prima dell'apertura delle valvole. Dopo questo intervallo di tempo, si passa alla condizione d'impianto aperto, situazione in cui il volume d'acqua che fuoriesce dalla rottura viene indirizzato al serbatoio di raccolta. Il tempo di mantenimento di questa condizione, al fine di ottenere valori affidabili e rappresentativi, è stato fissato a 69 secondi. Questo intervallo tiene in considerazione il tempo che le valvole motorizzate impiegano per concludere il comando di apertura, pari a 9 secondi, e del tempo necessario, affinché il sistema, in condizioni d'impianto aperto, raggiunga la stazionarietà (circa 20 secondi).

Per considerare l'eventuale variabilità e ottenere un risultato più accurato possibile, la stessa misurazione viene svolta per due volte. A seguito dei 69 secondi vengono riattivate le valvole motorizzate, che riportano il sistema in condizioni d'impianto chiuso.

Il procedimento segue una sequenza definita e inizia con l'esecuzione di due prove alla portata iniziale $Q = 7,7 \text{ l/s}$. Successivamente, le condizioni al contorno vengono modificate mediante una graduale chiusura della valvola a flusso avviato, riducendo la portata al valore successivo $Q = 7,5 \text{ l/s}$, per il quale si eseguono nuovamente due prove. Si procede quindi in modo analogo, regolando progressivamente la valvola per raggiungere i valori di portata prestabiliti, fino ad arrivare alle ultime due prove alla portata minima $Q = 2,9 \text{ l/s}$.

Una volta analizzate tutte le portate di riferimento, l'intera procedura sperimentale viene ripetuta, con le stesse modalità, per il successivo valore di frequenza.

5.2. Elaborazione dei dati sperimentali

Alla fine di ogni ciclo di prova, i dati registrati sul Data Logger vengono scaricati per procedere all'elaborazione dei risultati, al fine di ottenere le curve rappresentanti la relazione H-QL (pressione-perdita) per tutti i casi analizzati e ricavare i parametri che regolano il fenomeno.

Ovviamente, l'accuratezza dell'elaborazione dipende dalla completezza dei dati registrati e dalla qualità nell'esecuzione delle prove.

In primo luogo, per verificare che non ci siano stati problemi nel corso delle prove, viene creato il grafico riportato in Figura 28, che rappresenta l'andamento di portata e di pressione, in funzione del tempo di esecuzione delle prove.

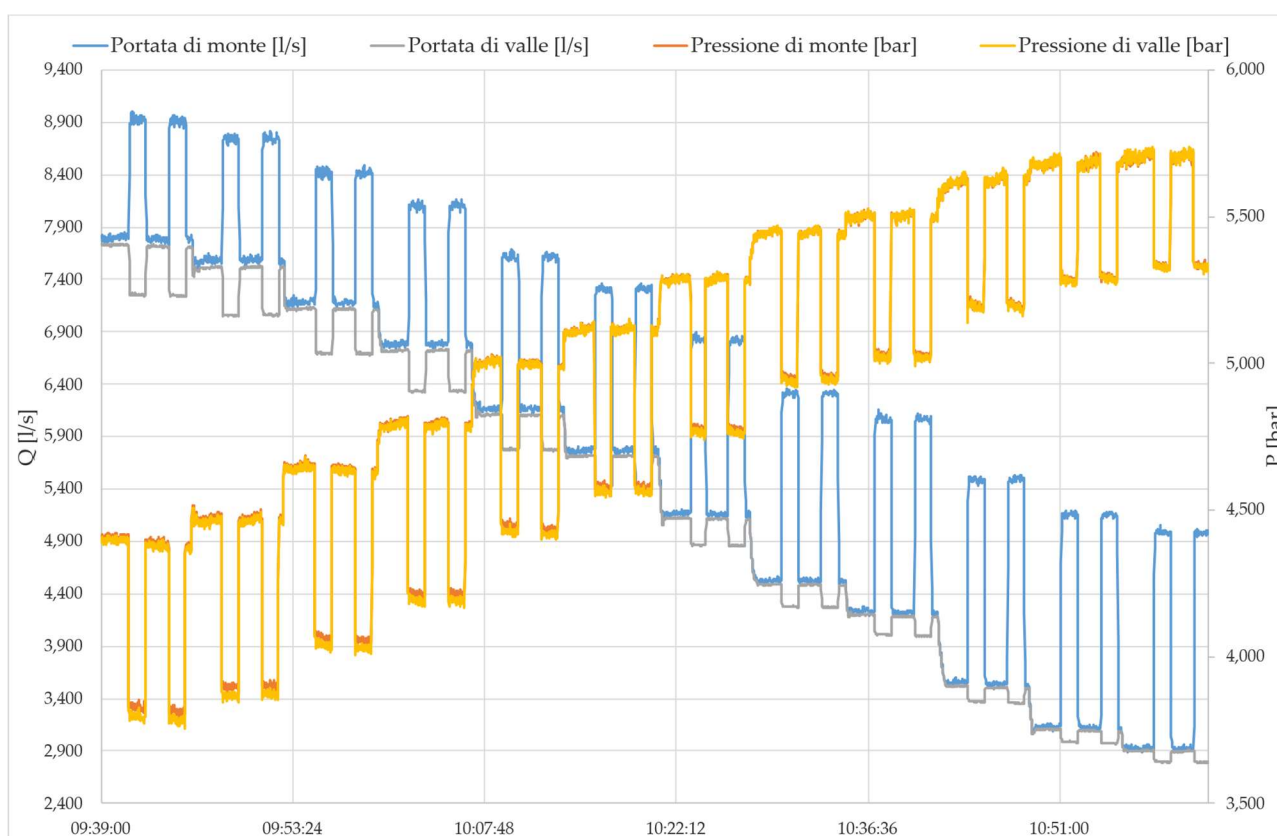


Figura 28. Grafico esempio dell'andamento della portata e della pressione durante le prove, sia a monte sia a valle.
PVC - Taglio longitudinale - 78 mm² - 50 Hz

Come mostrato nel grafico, all'apertura delle valvole motorizzate si verifica una variazione sia della portata sia della pressione: in particolare, la pressione diminuisce sia a monte sia a valle, poiché il sistema passa dalla condizione operativa di impianto chiuso a quella di impianto aperto. Tale transizione introduce una discontinuità nel sistema, ossia la perdita, modificando le condizioni di moto del fluido e determinando una redistribuzione delle pressioni lungo la condotta. Allo stesso tempo, la portata, misurata a monte della perdita, aumenta sensibilmente, mentre la portata registrata a valle diminuisce, in quanto una parte di volume transitante viene disperso attraverso la rottura presente lungo la parete della condotta.

Analizzando le prove effettuate, si osserva che con la chiusura progressiva della valvola a flusso avviato, nelle condizioni di impianto aperto, la portata a monte tende ad aumentare notevolmente, discostandosi in modo significativo dal valore di portata nella condizione di impianto chiuso; quella di valle invece mostra variazioni progressivamente più contenute.

Per analizzare al meglio i risultati delle prove sperimentali, si è scelto di considerare non solo i dati registrati durante l'intervallo di tempo di funzionamento in condizioni di impianto aperto, ma anche quelli registrati un minuto prima dell'apertura, ad impianto chiuso. Questo permette di osservare l'evoluzione di pressione e di portata nel tempo.

Per l'analisi dei dati è stato realizzato un foglio di calcolo Excel annotando gli orari in cui sono state eseguite le singole prove, le aperture, le chiusure e le portate, è stato così possibile elaborare i dati in maniera precisa e accurata.

I dati registrati durante le prove sono stati elaborati utilizzando 3 tabelle diverse: la prima è riferita alla condizione d'impianto chiuso (Figura 29), la seconda alla condizione d'impianto aperto (Figura 30) e la terza riguarda il calcolo dei valori di perdita, in termini di portata, per ogni caso testato (Figura 31).

L'elaborazione dei dati registrati nella condizione d'impianto chiuso è stata eseguita calcolando i valori medi di portata e di pressione registrati dai rispettivi misuratori nel minuto precedente l'apertura delle valvole motorizzate. Inoltre, è stata analizzata la

differenza tra le letture del misuratore di portata di monte e quello di valle indicata come ΔQ [l/s]: questo valore è stato utilizzato come coefficiente di correzione al fine di rendere le misure il più simile possibile tra loro.

Sono stati inoltre considerati i valori registrati dal misuratore di livello, confrontando la media nei 15 secondi precedenti l'apertura dell'impianto con il valore registrato 15 secondi successivi alla chiusura. Ciò consente di analizzare la variazione del livello del pelo libero nella vasca di raccolta della perdita. Si nota come all'aumentare del livello, il valore in millimetri diminuisce, in quanto il misuratore indica la distanza tra la superficie libera e il sensore.

IMPIANTO CHIUSO							
	Q1 (l/s)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q2 (l/s)	LIVELLO (mm)		ΔQ (l/s)
1	7,810721	4,406180328	4,396705	7,730705	650,9	441,6	0,08002
	7,784426	4,386114754	4,376754	7,713295	440,7	239,0	0,07113
2	7,587197	4,472344262	4,463787	7,516459	537,3	328,6	0,07074
	7,591082	4,47704918	4,468623	7,518951	652,5	440,5	0,07213
3	7,186262	4,653131148	4,646082	7,124148	684,6	465,2	0,06211
	7,178279	4,640721311	4,633623	7,119049	464,6	252,9	0,05923
4	6,786475	4,800098361	4,794213	6,722852	602,4	379,2	0,06362
	6,785016	4,79942623	4,793525	6,72477	652,7	428,3	0,06025
5	6,164721	5,011081967	5,007246	6,112066	683,4	451,6	0,05266
	6,166033	4,999655738	4,995705	6,105787	451,1	224,7	0,06025
6	5,773934	5,120672131	5,117557	5,718311	572,7	336,1	0,05562
	5,768984	5,120688525	5,117377	5,715656	633,6	394,5	0,05333
7	5,17223	5,289704918	5,288344	5,122754	664,9	446,1	0,04948
	5,156459	5,292590164	5,290689	5,116574	682,4	431,9	0,03989
8	4,526541	5,451754098	5,451607	4,490295	673,5	413,8	0,03625
	4,522525	5,45047541	5,449918	4,488115	661,4	402,8	0,03441
9	4,236934	5,504360656	5,504098	4,200951	680,1	416,2	0,03598
	4,219131	5,506540984	5,506951	4,184967	656,3	393,2	0,03416
10	3,557344	5,620360656	5,622885	3,52059	668,2	396,4	0,03675
	3,538443	5,629770492	5,630918	3,504639	682,3	409,0	0,03380
11	3,131984	5,685327869	5,68718	3,106885	680,3	400,4	0,02510
	3,118508	5,684606557	5,68759	3,092262	671,0	390,4	0,02625
12	2,927803	5,709557377	5,711885	2,903754	681,8	400,1	0,02405
	2,921492	5,707672131	5,710852	2,899787	668,7	387,9	0,02170
MEDIA PERIODO INDISTURBATO (15 SECONDI PRIMA DELL'APERTURA)					Dopo 15s dalla chiusura (valore puntuale)		

Figura 29. Impianto chiuso; PVC - Taglio longitudinale - 78 mm² - 50 Hz

L'elaborazione dei dati registrati nella condizione d'impianto aperto è stata eseguita analogamente, ma, in questo caso, sono stati considerati i valori medi di portata e di pressione registrati nell'intervallo di tempo successivi all'apertura delle valvole motorizzate. In particolare, dei 69 secondi totali, ne sono stati considerati solo 49, trascurando i primi 20, in modo da consentire al sistema di raggiungere condizioni stazionarie in termini di portata e di pressione. Alle stesse condizioni, al fine di determinare l'innalzamento del pelo libero nel serbatoio di raccolta, sono stati considerati i valori registrati dal misuratore di livello dopo 20 e 50 secondi dall'apertura delle valvole.

IMPIANTO APERTO					
Q1' (l/s)	P1 (bar)	P2 (bar)	Q2' (l/s)	LIVELLO(mm)	
8,93088	3,82762	3,79736	7,25524	601,7	518,1
8,91922	3,81242	3,78268	7,24466	393,4	312,5
8,7422	3,89714	3,86846	7,05926	488,0	405,3
8,74766	3,89982	3,87088	7,06344	601,8	518,1
8,42832	4,06516	4,03948	6,6964	634,7	546,5
8,42082	4,05496	4,02926	6,69366	414,2	330,0
8,11006	4,21494	4,19192	6,33506	548,0	460,0
8,11592	4,21518	4,19234	6,33552	599,0	509,6
7,6154	4,44518	4,42622	5,77902	632,7	537,9
7,62158	4,43398	4,41516	5,77406	397,7	307,9
7,30604	4,57846	4,5622	5,4178	516,5	423,3
7,31404	4,57926	4,56308	5,41568	577,4	482,1
6,829951	4,777683	4,764805	4,866756	605,2	506,6
6,81812	4,77816	4,76308	4,85878	622,5	522,4
6,31468	4,94864	4,93836	4,27858	611,8	508,7
6,3172	4,95232	4,94246	4,27258	601,4	498,0
6,07286	5,02754	5,01852	4,01218	616,0	511,4
6,0716	5,02774	5,01904	3,99946	593,1	488,5
5,48764	5,19768	5,19198	3,37158	603,1	494,2
5,49472	5,19744	5,19192	3,35822	616,5	507,0
5,15742	5,28332	5,2788	2,98772	611,2	500,2
5,15712	5,28896	5,28466	2,97416	602,7	490,6
4,99148	5,33022	5,32642	2,79788	614,1	501,2
4,98496	5,33154	5,32886	2,79148	599,7	488,6
				Dopo 20s dall'apertura (valore puntuale)	Dopo 50s dall'apertura (valore puntuale)

Figura 30. Impianto aperto; PVC - Taglio longitudinale - 78 mm² - 50 Hz

Nell'ultima tabella sono stati calcolati i valori di perdita QL, in l/s, ottenuti come differenza tra le portate misurate a monte e a valle della rottura in condizioni d'impianto aperto, e il

volume perso in 30 secondi di prova, calcolato sia in funzione della portata, che in funzione della variazione dell'altezza del pelo libero nel serbatoio di raccolta. I valori così ottenuti sono stati confrontati tra loro per verificarne l'affidabilità e rafforzare la solidità dei risultati.

WATER LOSS												
P(bar)	QL (Q1'-Q2') (l/s)	media	DEV.ST.	Volume (l)	ΔH(mm)	ΔH media	Volume (l)	QL (l/s)	QL (l/s)	QL media (l/s)	DEV.ST.	Volume (l)
4,40618	1,67564	1,6751	0,000764	50,25	83,6	82,3	48,56	1,61873	1,595624	1,59953	0,005519	47,99
4,386115	1,67456				80,9				1,603429			
4,472344	1,68294	1,68358	0,000905	50,51	82,7	83,2	49,12	1,63743	1,612202	1,61215	8,02E-05	48,36
4,477049	1,68422				83,7				1,612089			
4,653131	1,73192	1,72954	0,003366	51,89	88,2	86,2	50,89	1,69647	1,669805	1,66887	0,001326	50,07
4,640721	1,72716				84,2				1,66793			
4,800098	1,77500	1,7777	0,003818	53,33	88,0	88,7	52,37	1,74567	1,711377	1,71577	0,006206	51,47
4,799426	1,78040				89,4				1,720154			
5,011082	1,83638	1,84195	0,007877	55,26	94,8	92,3	54,50	1,81652	1,783724	1,78550	0,00251	53,56
4,999656	1,84752				89,8				1,787274			
5,120672	1,88824	1,8933	0,007156	56,80	93,2	94,3	55,65	1,85490	1,832617	1,83882	0,008779	55,16
5,120689	1,89836				95,3				1,845032			
5,289705	1,96320	1,961268	0,002726	58,84	98,6	99,4	58,66	1,95527	1,91372	1,91659	0,004055	57,50
5,29259	1,95934				100,1				1,919455			
5,451754	2,03610	2,04036	0,006025	61,21	103,1	103,3	60,96	2,03202	1,999854	2,00503	0,007323	60,15
5,450475	2,04462				103,4				2,01021			
5,504361	2,06068	2,06641	0,008103	61,99	104,6	104,6	61,76	2,05859	2,024696	2,03134	0,00939	60,94
5,506541	2,07214				104,6				2,037976			
5,620361	2,11606	2,12628	0,014453	63,79	108,9	109,2	64,47	2,14912	2,079306	2,09100	0,01654	62,73
5,62977	2,13650				109,5				2,102697			
5,685328	2,16970	2,17633	0,009376	65,29	111,0	111,6	65,86	2,19537	2,144602	2,15066	0,008565	64,52
5,684607	2,18296				112,1				2,156714			
5,709557	2,19360	2,19354	8,49E-05	65,81	112,9	112,0	66,13	2,20423	2,169551	2,170662951	0,001573	65,12
5,707672	2,19348				111,1				2,171775			
	DIFFERENZA DI PORTATE				DIFFERENZA DI LIVELLO				DIFFERENZA DI PORTATE CORRETTA			

Figura 31. WATER LOSS; PVC - Taglio longitudinale - 78 mm² - 50 Hz

Inoltre, è stato elaborato, per ogni prova, un grafico di confronto tra il volume di perdita calcolato tramite i misuratori di portata e il volume di perdita calcolato tramite il misuratore di livello in funzione della pressione (

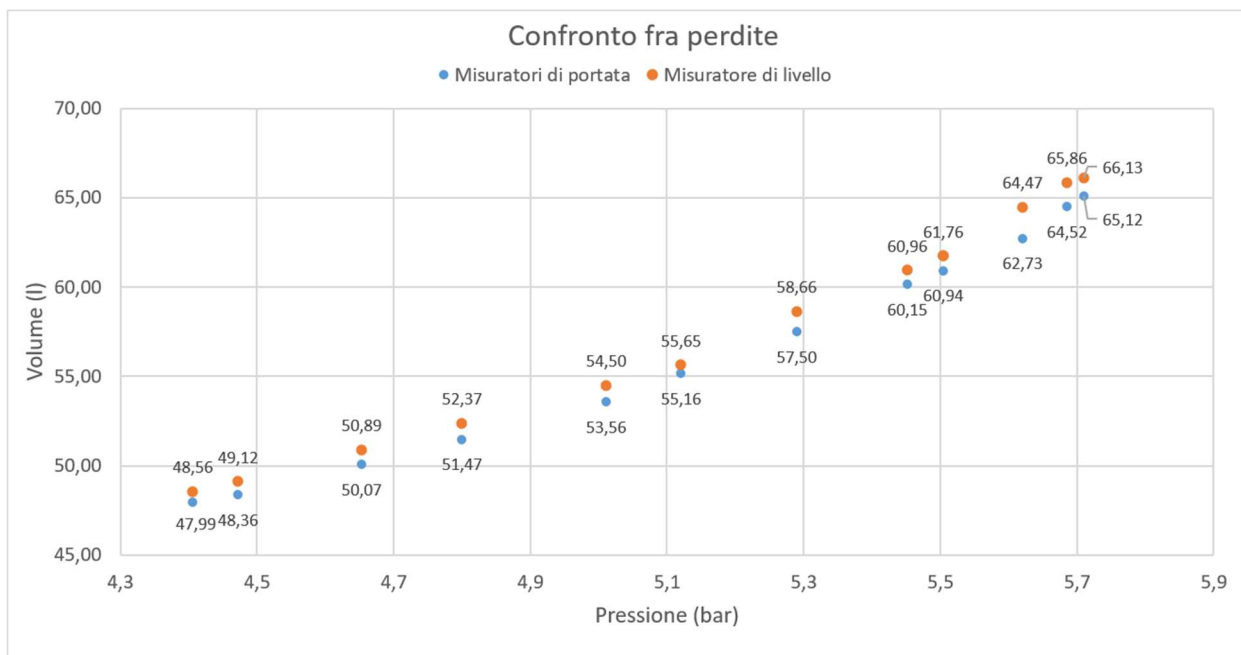


Figura 32), verificando quindi che l'errore sia $\leq 5\%$ come stimato.

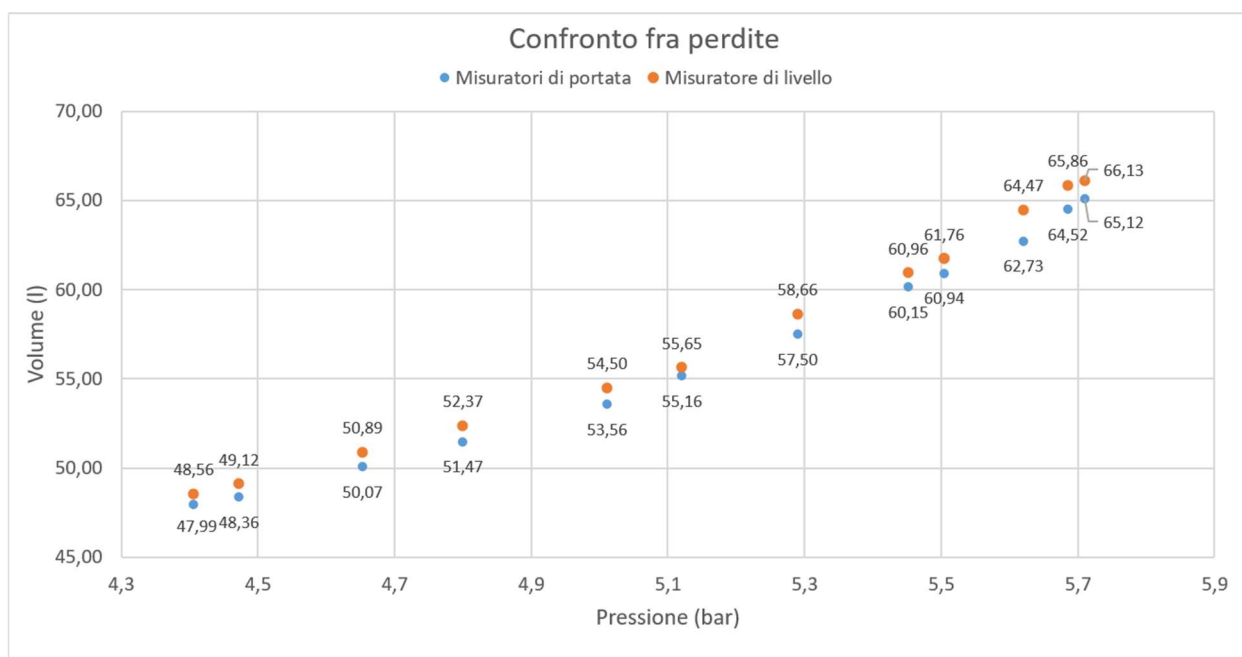


Figura 32. Confronto fra perdite; PVC - Taglio longitudinale - 78 mm² - 50 Hz

6. Modellazione Teorico-Sperimentale

Di seguito è riportato lo studio di Cassa e di VanZyl considerato fondamentale a livello internazionale, in quanto mostra come la relazione tra la pressione e le perdite dipenda in maniera significativa sia dalla deformabilità del materiale, sia dalla geometria della rottura e afferma che le condotte plastiche risultano più sensibili alle variazioni di pressione rispetto ai materiali più rigidi.

Nel loro lavoro, VanZyl e Cassa analizzano inizialmente la validità delle principali formulazioni utilizzate per descrivere la relazione tra pressione e perdite, valutandone il comportamento al variare delle condizioni di pressione, della geometria del foro e del materiale della condotta.

Nella formulazione IWA (1),

$$Q = a * H^b \quad (1)$$

Dove Q è la portata di perdita espressa in [l/s], H la prevalenza in [m], a è il coefficiente di perdita e b l'esponente di perdita.

Gli autori evidenziano come l'esponente di perdita b , non possa essere considerato una caratteristica costante, ma vari in base alle condizioni operative. In particolare, per la medesima perdita, il valore di b tende a 0,5 quando la pressione del sistema si avvicina a zero e cresce progressivamente, fino a valori prossimi a 1,5, all'aumentare della pressione.

Gli autori affermano, nella loro pubblicazione sul "Journal of Hydraulic Engineering", quanto segue: "It was found that the conventional power leakage equation does not provide a satisfactory characterization of elastic leaks".

ossia: "È emerso che l'equazione di potenza tradizionalmente utilizzata per descrivere le perdite non fornisce una caratterizzazione soddisfacente delle perdite elastiche."

Quindi, per considerare il contributo elastico, gli autori fanno riferimento al concetto FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges), secondo cui l'area del foro non rimane necessariamente costante al variare della pressione, ma può aumentare a causa delle

deformazioni elastiche della condotta stessa e dell'apertura della perdita, a tal punto che gli autori, per le condotte flessibili, giungono, nella medesima pubblicazione, alla seguente affermazione: “All leaks will increase in area with increasing pressure”.

Risulta così necessario introdurre un modello che tenga conto di questa componente e, per questo, gli autori dello studio in questione giungono così alla formulazione di Cassa e VanZyl (2):

$$Q = k_1 * H^{0,5} + k_2 * H^{1,5} \quad (2)$$

nella quale il primo termine rappresenta il contributo della componente geometrica, sostanzialmente costante, riconducibile alla legge di Torricelli (3)

$$Q = a * H^{0,5} \quad (3)$$

mentre il secondo termine descrive l'effetto dell'incremento dell'area di perdita dovuto alle deformazioni elastiche: quest'ultimo assume un peso crescente nei materiali più flessibili e deformabili, come il PVC e il polietilene, mentre risulta generalmente trascurabile nelle condotte più rigide, come quelle in ghisa.

7. Influenza della geometria del foro sui parametri a e b della Power Equation

Per l'analisi dell'influenza della geometria della rottura sulle perdite nelle condotte in pressione, si è fatto riferimento all'equazione di interpolazione dei dati sperimentali, mediante una funzione di potenza (1). I grafici della relazione H-QL (pressione-portata uscente dalla rottura) ottenuti per ciascun caso, al variare della dimensione della rottura, sono riportati dalla Figura 33 alla Figura 37, dalle quali si evince che la condotta in ghisa con taglio longitudinale è soggetta ad una perdita maggiore di portata, seguita dai tagli trasversali e dai fori circolari sullo stesso materiale rispetto alle condotte in PVC con le medesime rotture.

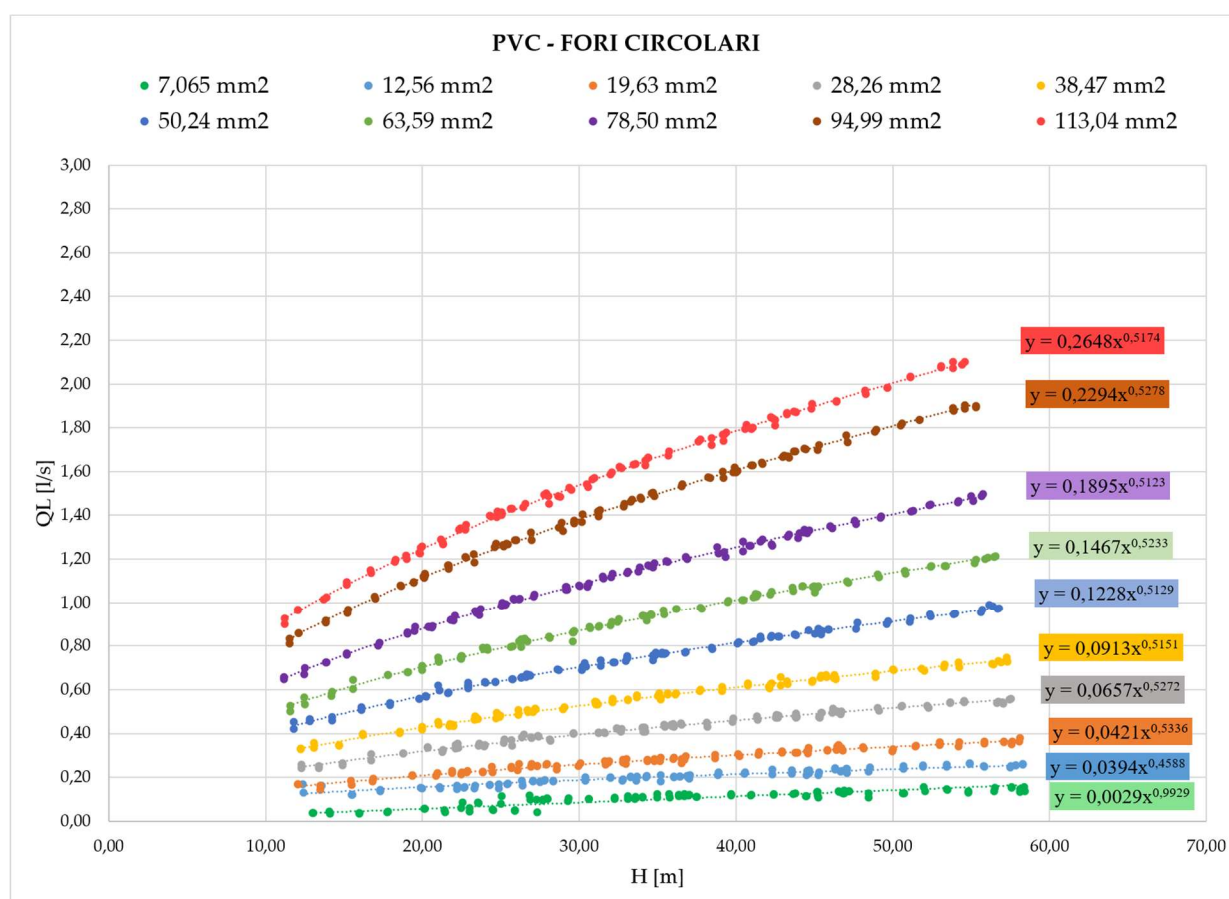


Figura 33. PVC - FORI CIRCOLARI andamenti delle equazioni di interpolazione

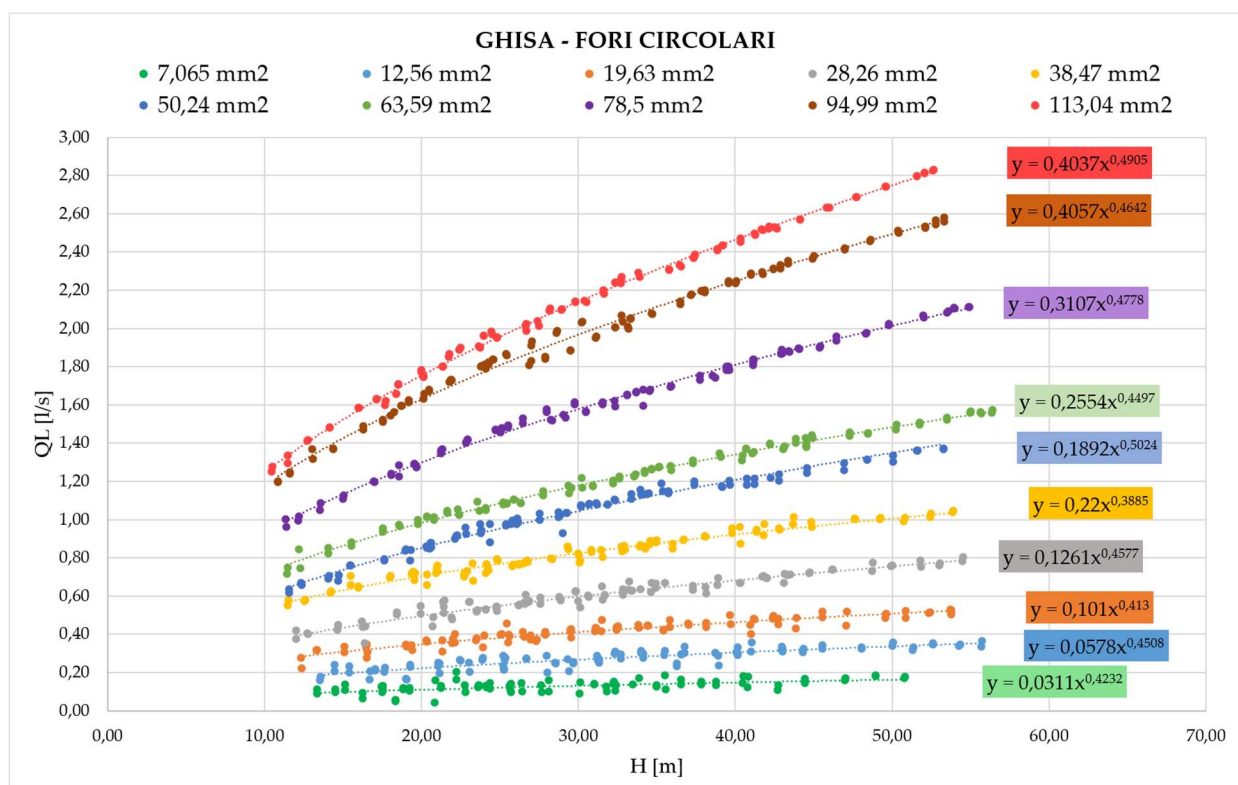


Figura 34. GHISA - FORI CIRCOLARI andamenti delle equazioni di interpolazione

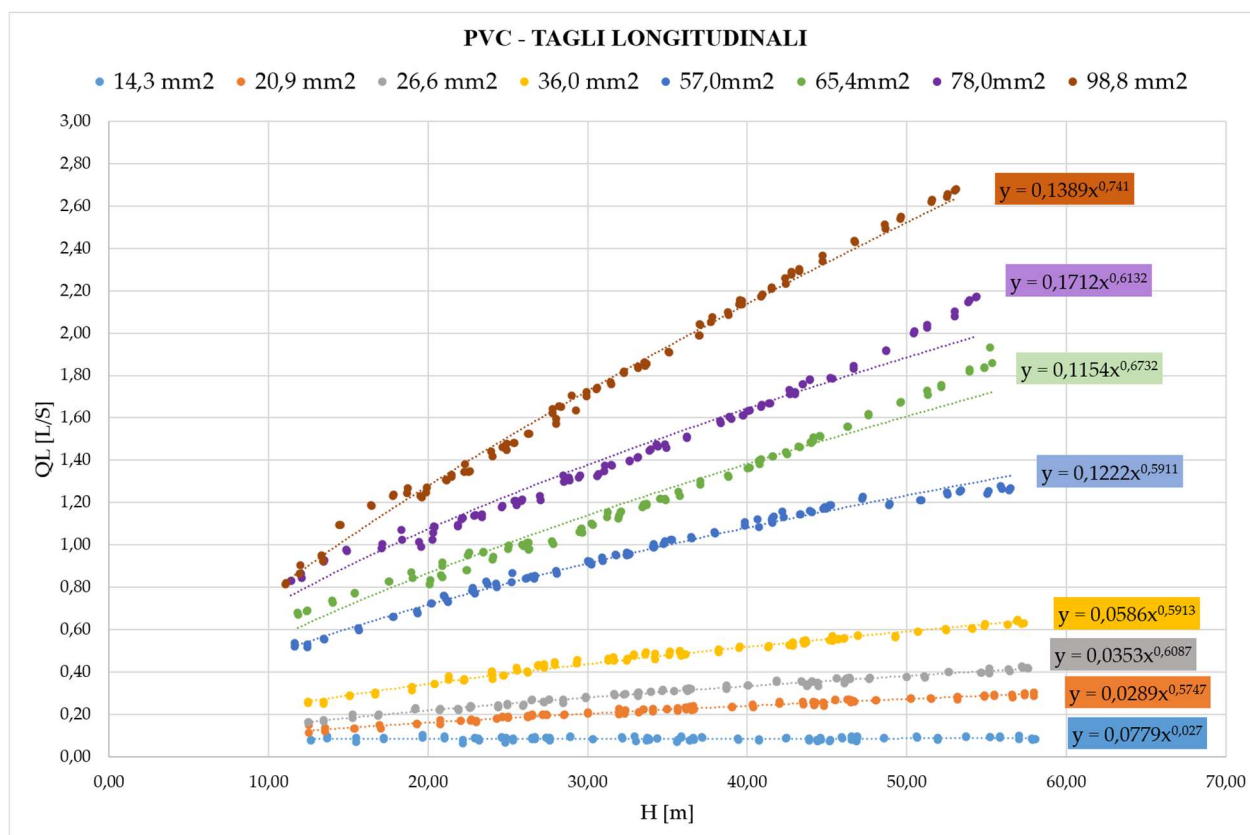


Figura 35. PVC - TAGLI LONGITUDINALI andamenti delle equazioni di interpolazione

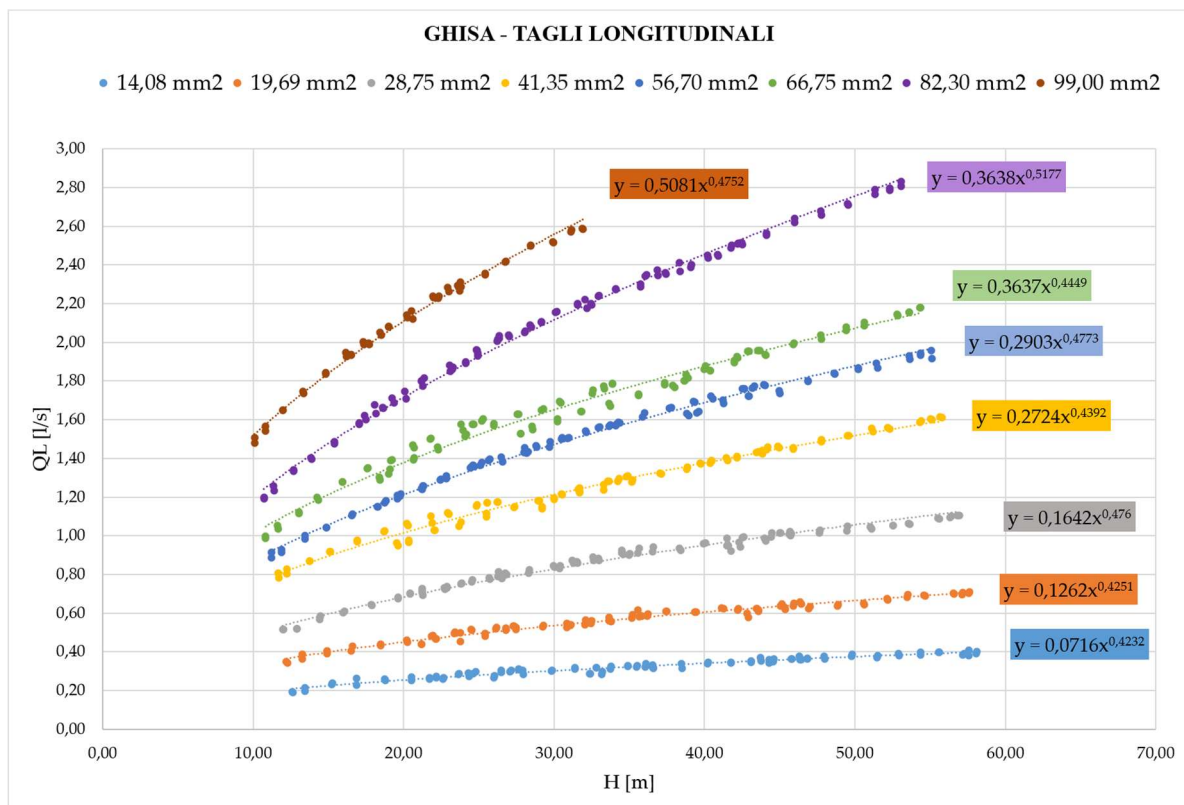


Figura 36. GHISA - TAGLI LONGITUDINALI andamenti delle equazioni di interpolazione

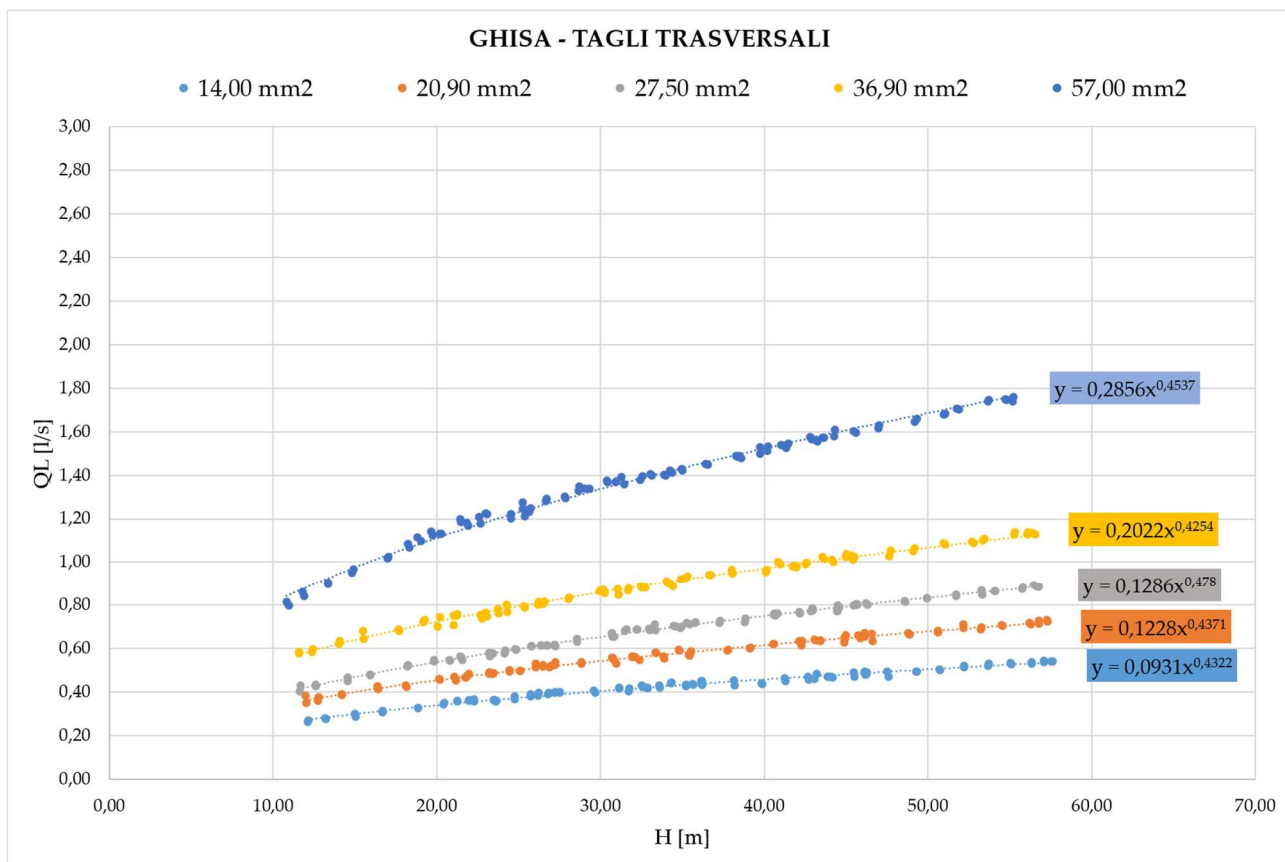


Figura 37. GHISA - TAGLI TRASVERSALI andamenti delle equazioni di interpolazione

Nel grafico di Figura 38 sono rappresentati i valori del parametro a in funzione delle dimensioni della rottura, considerando tutti i casi analizzati. Inoltre, i valori ottenuti dalle prove sperimentali sono stati interpolati con una retta di regressione, al fine di evidenziare l'andamento del parametro all'aumentare delle dimensioni della rottura.

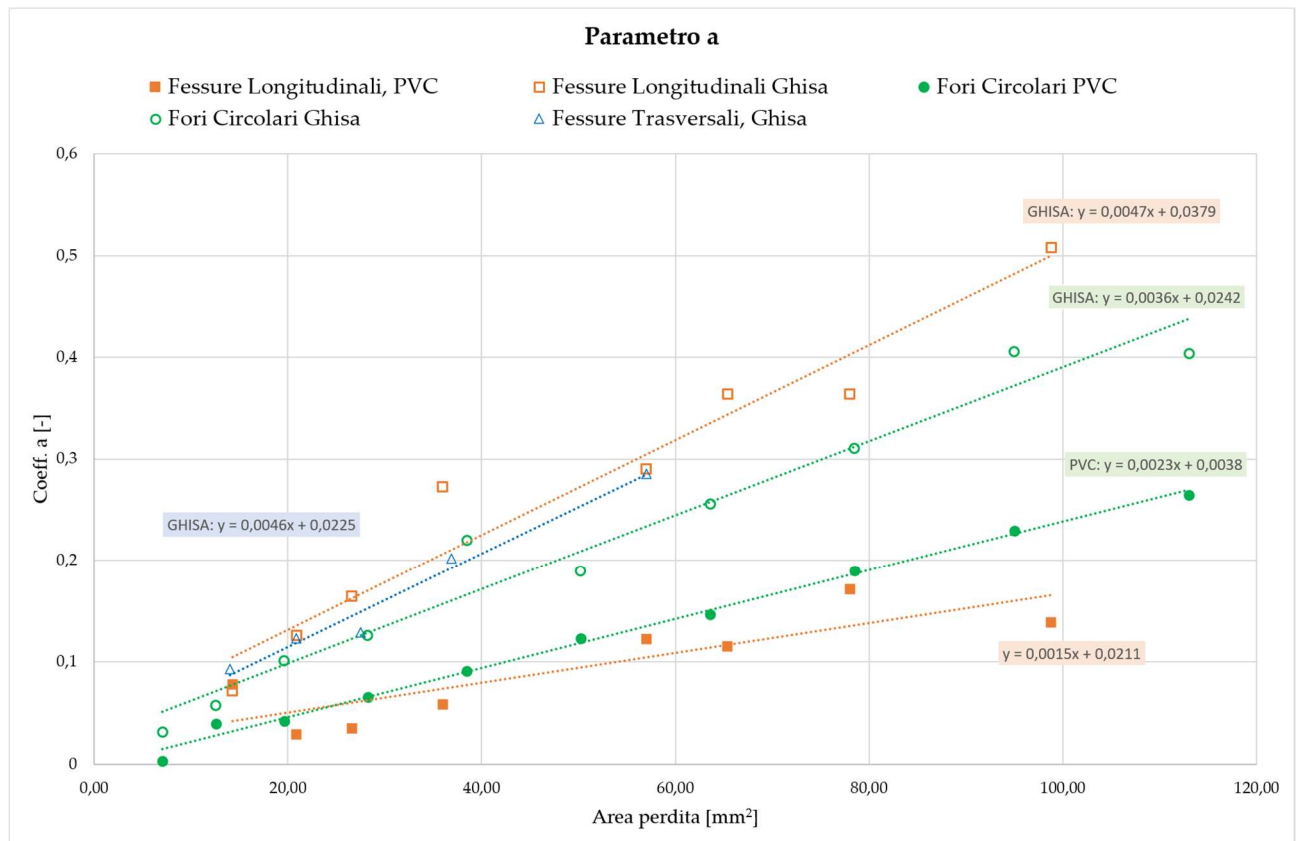


Figura 38. Andamento del parametro "a"

Dal grafico si osserva che il parametro a assume valori significativamente più elevati per le fessure longitudinali sulla ghisa rispetto alla stessa tipologia di rottura sul PVC; analogamente avviene per i fori circolari.

Per le fessure trasversali sulla ghisa il parametro a risulta elevato, sebbene leggermente inferiore rispetto alle fessure longitudinali sullo stesso materiale.

Nel grafico di Figura 39 sono riportati i valori del parametro b per tutti i casi analizzati. È anche riportato il valore $b=0,5$, corrispondente al caso in cui la legge di potenza interpolante

equivale alla formulazione di Torricelli. Eventuali scostamenti da tale valore evidenziano quindi un comportamento differente da quello previsto dalla relazione torricelliana.

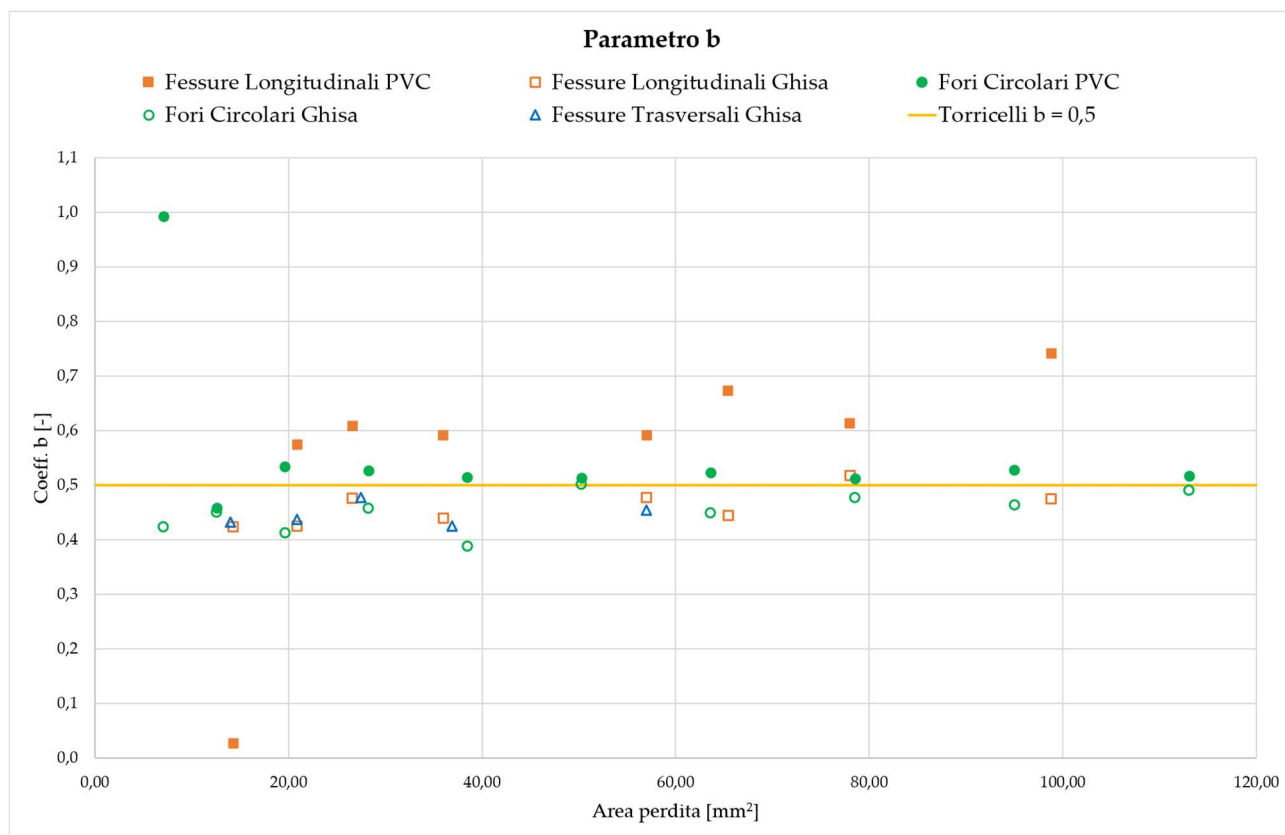


Figura 39. Andamento del parametro "b"

Dal grafico si osserva che, per le fessure sul PVC, i valori del parametro b si attestano al di sopra dell'esponente torricelliano ($b=0,5$), mentre le fessure sulla ghisa, per entrambe le tipologie di taglio, si collocano al di sotto di tale valore di riferimento. Per quanto riguarda i fori circolari, per entrambi i materiali, i valori di b si posizionano in prossimità del valore dell'esponente torricelliano. Si nota che il primo valore dei fori circolari sul PVC e il primo valore delle fessure longitudinali sempre sul PVC assumono valori molto diversi tra loro a causa delle ridotte dimensioni del foro e dei bassissimi valori di perdita.

Successivamente, sono state confrontate le portate uscenti dalla fessura in funzione dell'area e della geometria del foro. Il confronto è stato svolto considerando alcuni valori di prevalenza H [m] pari a 20 m, 30 m, 40 m e 50 m, scelti come rappresentativi dell'intero insieme delle prove sperimentali condotte. I risultati sono riportati dalla Figura 40 alla Figura 43.

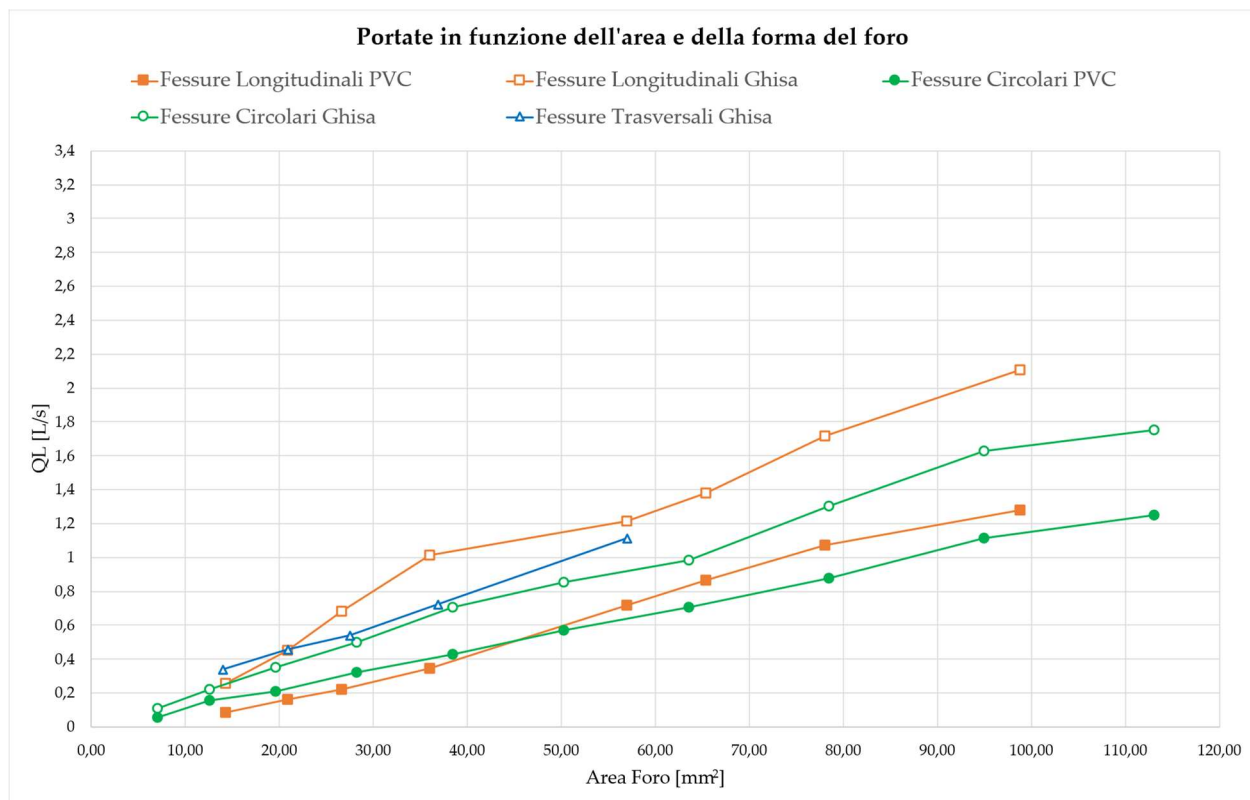


Figura 40. $H = 20\text{ m}$

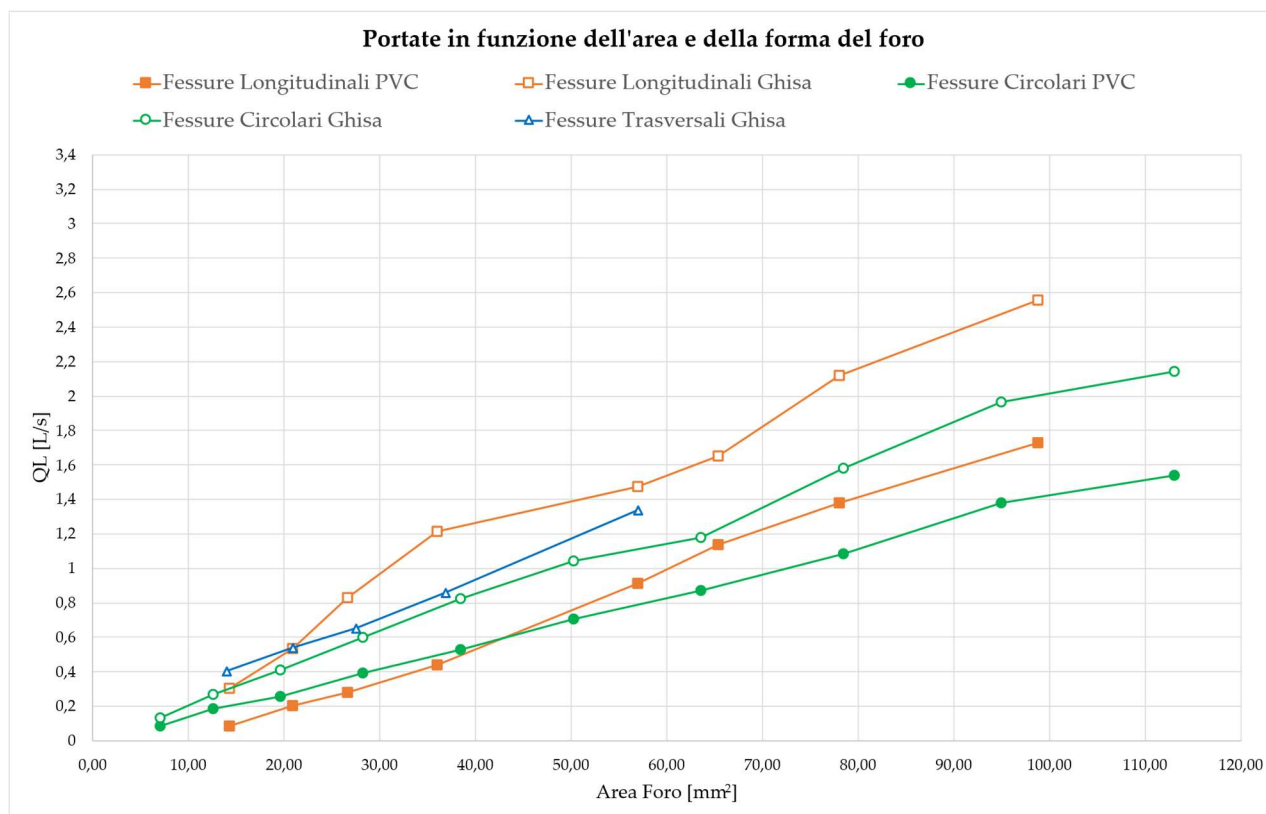


Figura 41. $H = 30\text{ m}$

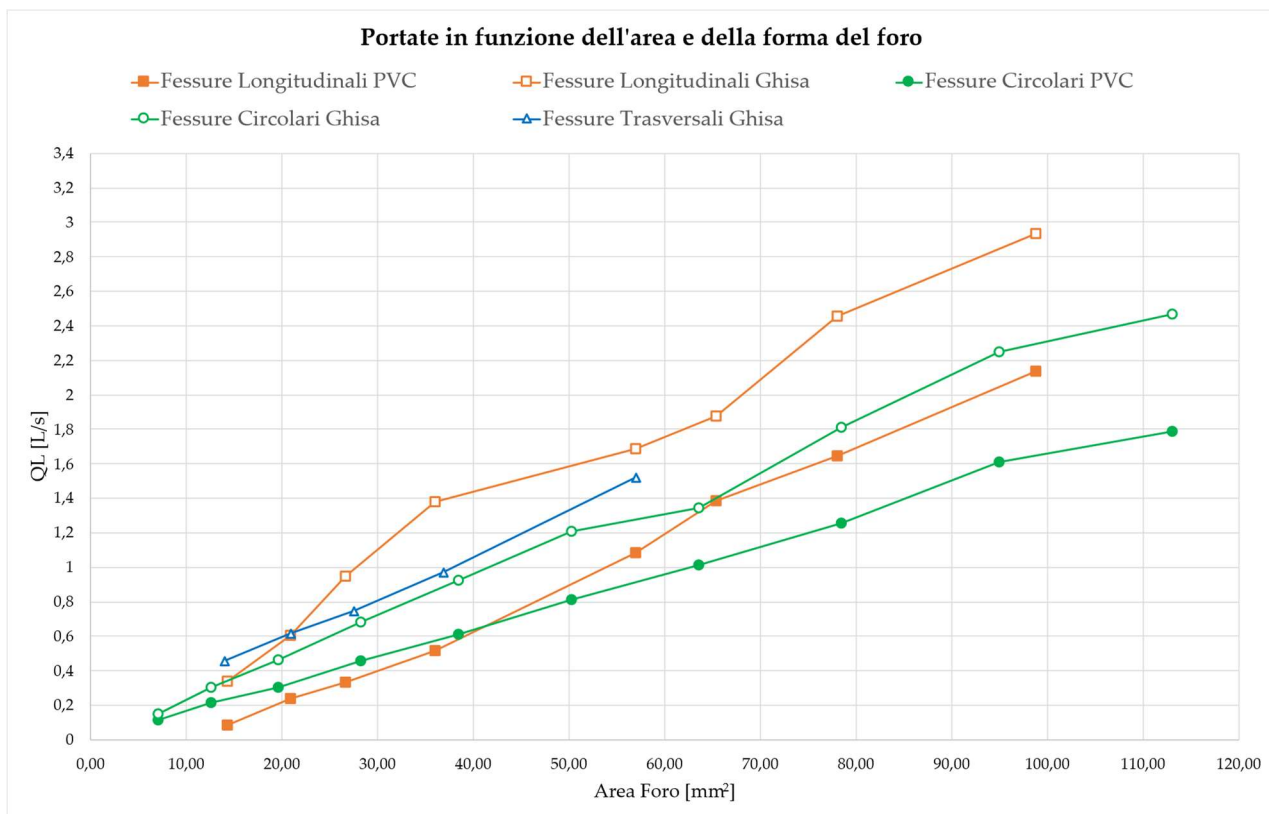


Figura 42. $H = 40 \text{ m}$

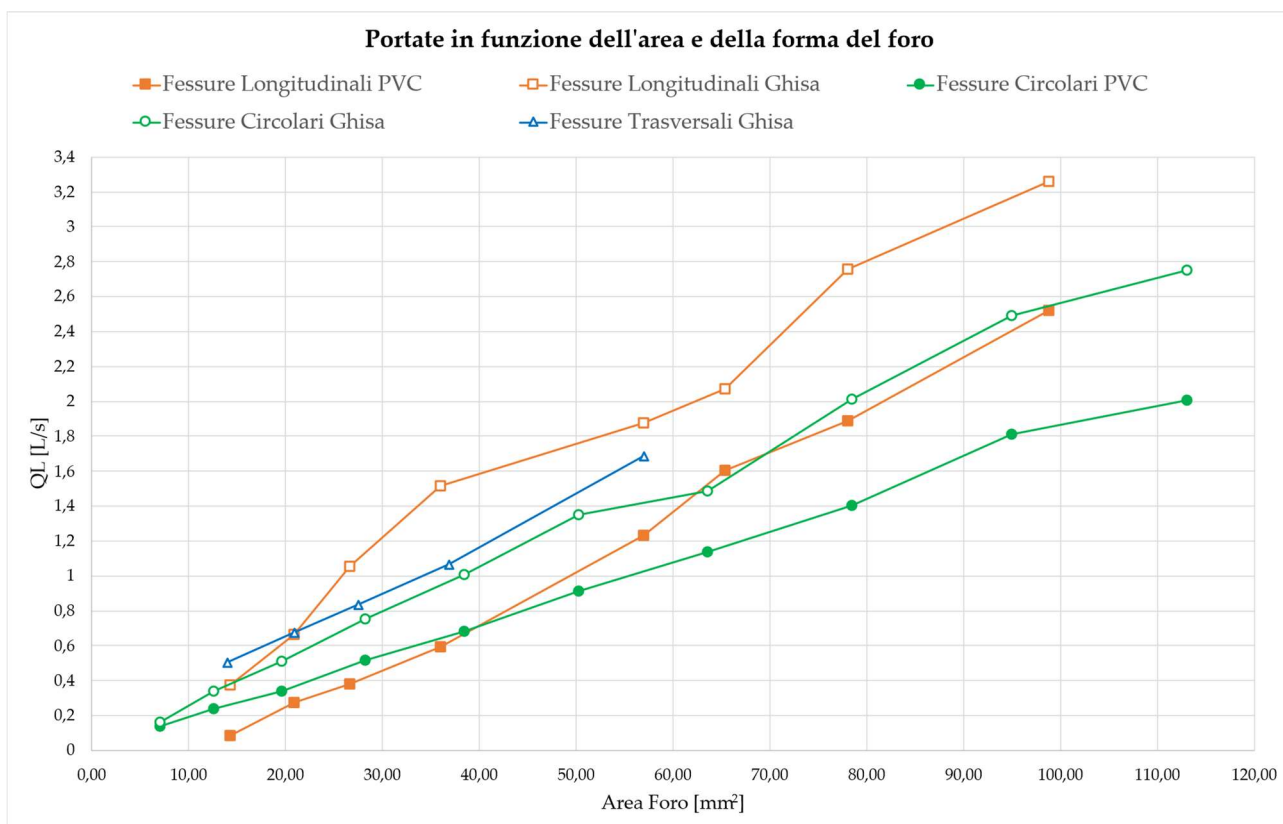


Figura 43. $H = 50 \text{ m}$

I grafici evidenziano come, a parità di forma di rottura, le perdite sulla condotta in ghisa sono sempre maggiori rispetto a quelle da condotte in PVC. Tra tutte le configurazioni analizzate, quella della fessura longitudinale sulla ghisa produce la maggiore portata di perdita, seguita da quella trasversale e poi quella di foro circolare, entrambe sulla condotta in ghisa.

Nel caso della condotta in PVC, sia con foro circolare che con fessura longitudinale, si osserva una perdita minore rispetto al caso della ghisa in entrambe le configurazioni. All'aumentare dell'area, la portata fuoriuscita dalla fessura longitudinale sul PVC tende a superare quella fuoriuscita dal foro circolare sulla medesima condotta, questa tendenza si manifesta ad alte prevalenze anche ad aree della rottura sempre più piccole.

Infine, all'aumentare della prevalenza gli andamenti della portata fuoriuscita dalle rotture su condotte in PVC, specialmente nel caso di fessura longitudinale, si avvicinano progressivamente agli andamenti della portata fuoriuscita dalla condotta in ghisa. Questo comportamento è probabilmente legato all'elasticità del materiale PVC.

L'analisi si conclude con il calcolo dei rapporti di perdita espressi in termini percentuali nelle condizioni appena analizzate illustrati nella Figura 44, nella quale sono presenti tutte le tipologie di rottura sulle condotte sia in ghisa che in PVC raggruppate in intervalli di dimensioni, espressi in $[mm^2]$, chiamate "bande". Il rapporto percentuale è stato calcolato rispetto al foro circolare, assunto come riferimento, mentre le bande sono state individuate sulla base di dimensioni simili dell'area di rottura, ciò consente di quantificare in modo immediato gli andamenti delle portate di perdita in funzione dell'area del foro, già illustrati precedentemente.

Banda [mm ²]	Forma	Materiale	Area [mm ²]	20 m	30 m	40 m	50 m
13-14	Circolare	PVC	12,56	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	14,30	-46%	-54%	-60%	-63%
	Circolare	Ghisa	12,56	43%	43%	42%	42%
	Longitudinale	Ghisa	14,30	63%	61%	59%	58%
	Trasversale	Ghisa	14,00	118%	116%	114%	113%
19-20	Circolare	PVC	19,63	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	20,90	-22%	-21%	-20%	-19%
	Circolare	Ghisa	19,63	67%	59%	54%	50%
	Longitudinale	Ghisa	20,90	117%	107%	101%	96%
	Trasversale	Ghisa	20,90	118%	110%	104%	100%
26-28	Circolare	PVC	28,26	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	26,60	-31%	-29%	-27%	-26%
	Circolare	Ghisa	28,26	56%	52%	49%	46%
	Longitudinale	Ghisa	26,60	114%	110%	107%	105%
	Trasversale	Ghisa	27,50	69%	66%	63%	61%
36-38.5	Circolare	PVC	38,47	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	36,00	-19%	-17%	-15%	-14%
	Circolare	Ghisa	38,47	65%	57%	51%	47%
	Longitudinale	Ghisa	36,00	138%	130%	125%	122%
	Trasversale	Ghisa	36,90	69%	63%	59%	56%
50-57	Circolare	PVC	50,24	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	57,00	40%	27%	29%	31%
	Circolare	Ghisa	50,24	66%	45%	44%	44%
	Longitudinale	Ghisa	57,00	136%	105%	102%	100%
	Trasversale	Ghisa	57,00	117%	86%	82%	80%
63-66	Circolare	PVC	63,59	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	65,40	23%	31%	37%	41%
	Circolare	Ghisa	63,59	40%	36%	33%	31%
	Longitudinale	Ghisa	65,40	96%	90%	86%	82%
	Trasversale	Ghisa	\	\	\	\	\
78-80	Circolare	PVC	78,50	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	78,00	22%	27%	31%	34%
	Circolare	Ghisa	78,50	48%	46%	44%	43%
	Longitudinale	Ghisa	78,00	95%	96%	96%	96%
	Trasversale	Ghisa	\	\	\	\	\
95-99	Circolare	PVC	94,99	Riferimento	Riferimento	Riferimento	Riferimento
	Longitudinale	PVC	98,80	15%	25%	33%	39%
	Circolare	Ghisa	94,99	46%	42%	40%	38%
	Longitudinale	Ghisa	98,80	89%	85%	82%	80%
	Trasversale	Ghisa	\	\	\	\	\

Figura 44. Tassi e rapporti di perdita alle varie prevalenze

Dall'analisi si evidenzia che per la ghisa, il taglio longitudinale presenta percentuali di perdita maggiori rispetto a quelle registrate su le altre rotture sempre in riferimento al foro circolare sul PVC. Il taglio trasversale sulla ghisa, come già evidenziato precedentemente, assume invece un comportamento intermedio, collocandosi tra i valori del foro circolare e quelli del taglio longitudinale.

Per quanto riguarda il PVC, il confronto tra fori circolari e tagli longitudinali mostra un comportamento differente. Per le aree di rottura minori, le fessure longitudinali presentano portate inferiori di circa il 15%–25% rispetto ai corrispondenti fori circolari. All'aumentare dell'area, tuttavia, tale tendenza si inverte: i tagli longitudinali iniziano infatti a generare perdite superiori, tra il 15% e il 25% in più rispetto a quelle associate a fori circolari di area e materiale equivalente.

Inoltre, emerge che un taglio longitudinale su una condotta in ghisa può determinare perdite superiori del 125% rispetto a quelle generate da un foro circolare sul PVC di area confrontabile, valore che va a ridursi all'aumentare della prevalenza e delle dimensioni del foro.

I risultati di Tabella 44 sono illustrati da Figura 45 a Figura 48 per i valori di prevalenza H , pari a 20 m, 30 m, 40 m e 50 m, scelti come rappresentativi dell'intero insieme delle prove sperimentali condotte

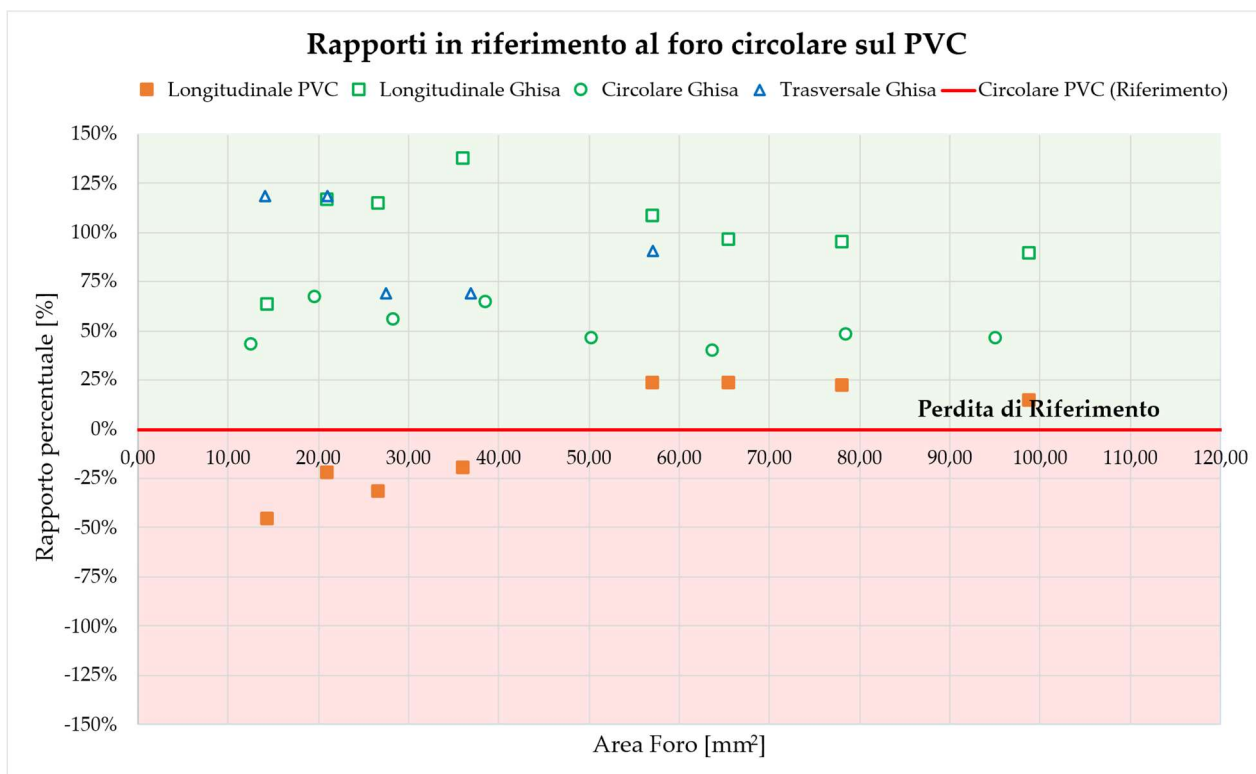


Figura 45. Confronto grafico tassi e rapporti percentuali $H = 20\text{ m}$

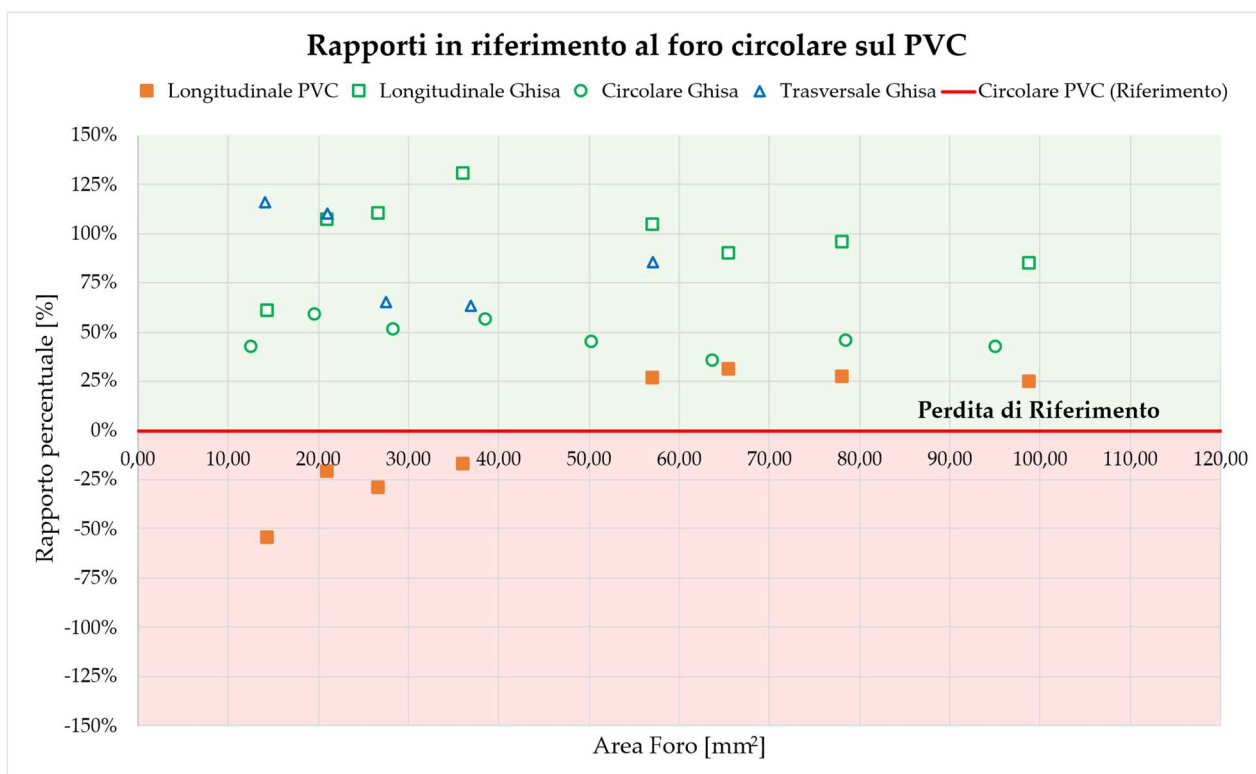


Figura 46. Confronto grafico tassi e rapporti di perdita $H = 30\text{ m}$

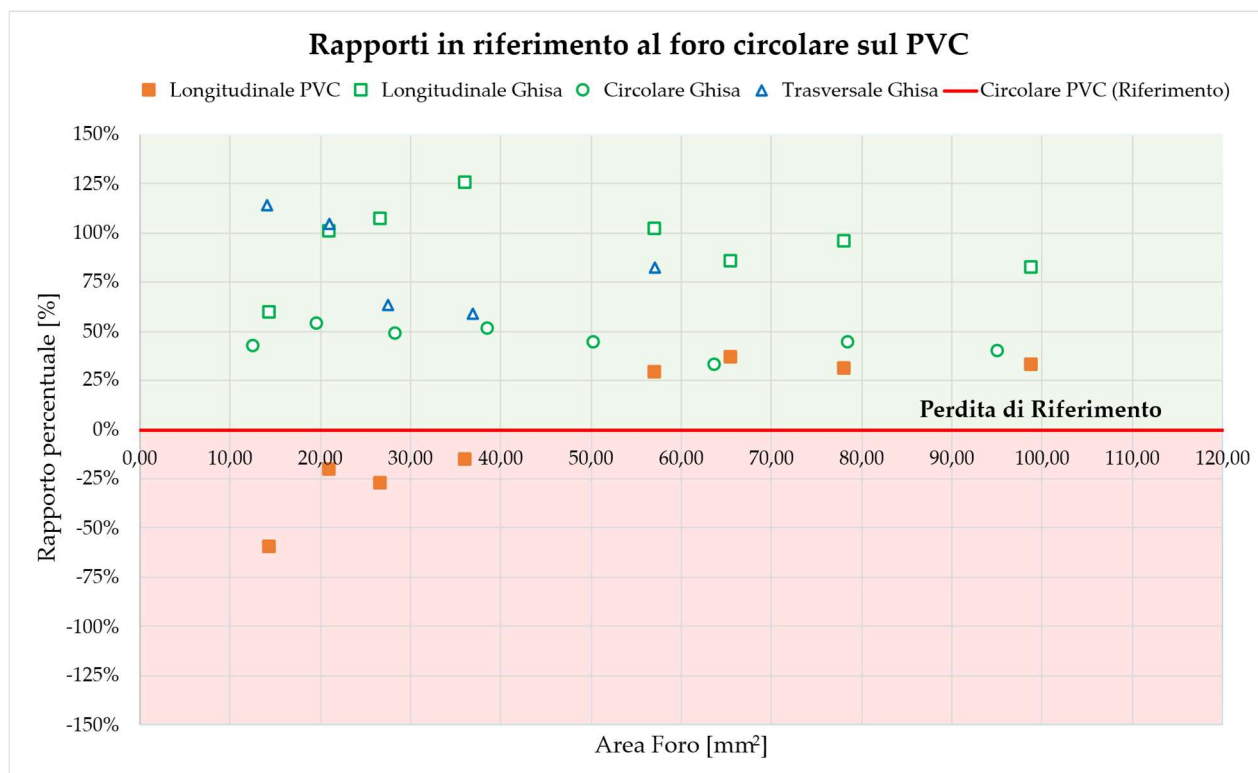


Figura 47. Confronto grafico tassi e rapporti percentuali $H = 40\text{ m}$

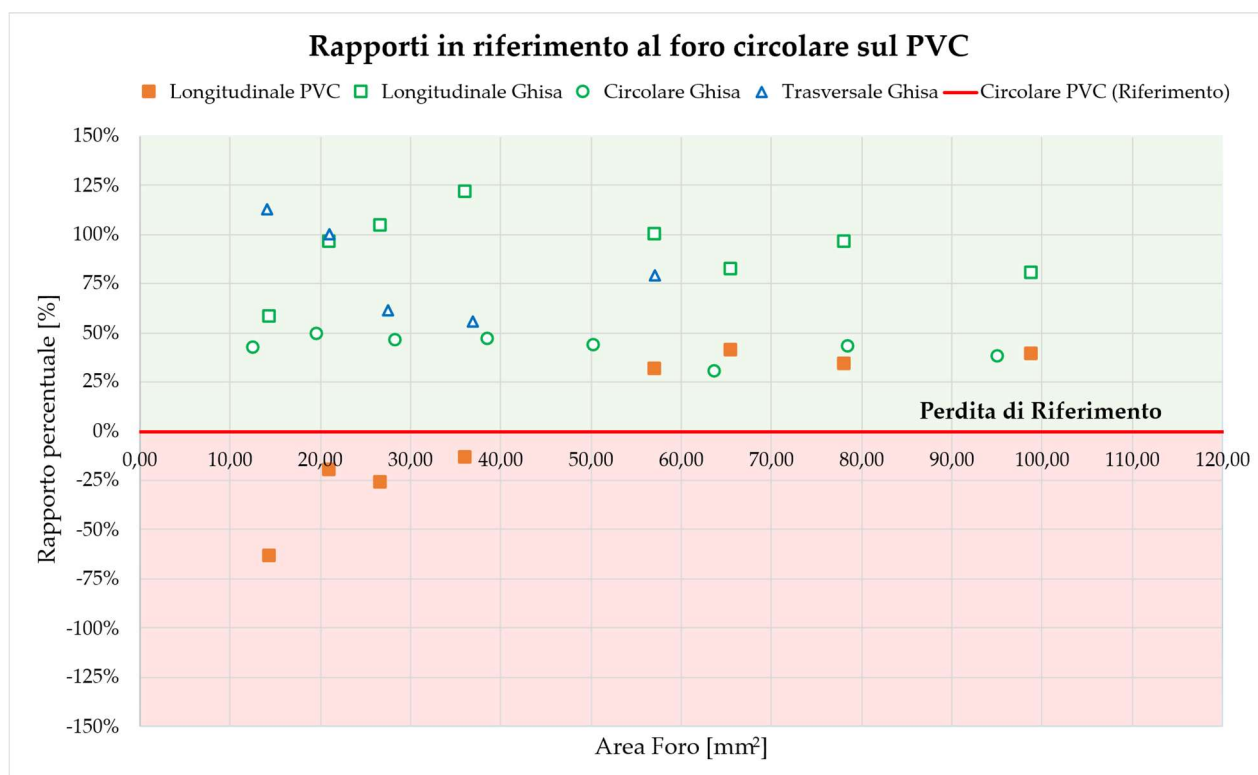


Figura 48. Confronto grafico tassi e rapporti di perdita $H = 50\text{ m}$

8. Analisi dei risultati sperimentali

L'analisi dei dati raccolti durante la campagna sperimentale è stata condotta tenendo in considerazione due aspetti fondamentali: l'influenza del materiale costituente le condotte e l'influenza della forma della rottura sul fenomeno delle perdite idriche.

In primo luogo, per valutare l'effetto del materiale, sono stati confrontati i dati relativi a rotture di uguale forma e dimensione realizzate su condotte di materiale differente.

In secondo luogo, per valutare l'effetto della geometria della rottura, l'analisi è stata eseguita considerando la stessa condotta sulla quale sono state realizzate rotture di forme diverse. In questo modo è stato possibile isolare l'influenza della sola geometria del foro, a parità di materiale.

Per ciascuna delle configurazioni analizzate, è stato valutato l'adattamento ai dati raccolti di tre differenti formulazioni teorico-sperimentali, al fine di individuare il modello maggiormente rappresentativo del comportamento osservato.

Le equazioni considerate sono le seguenti:

- La formulazione di Torricelli (3) la quale non considera esplicitamente gli effetti della deformazione elastica della condotta e della perdita. Un buon adattamento di questa legge ai dati sperimentali indica pertanto una limitata influenza delle deformazioni del materiale sul valore finale della perdita e, quindi, una geometria della perdita sostanzialmente costante al variare della pressione;
- La formulazione di Cassa e VanZyl (2) illustrata al capitolo 6;
- L'equazione di potenza (1) nella quale i coefficienti a e b vengono determinati mediante interpolazione dei dati sperimentali.

Quest'ultima formulazione non deriva da un modello fisico specifico, ma consente di descrivere empiricamente l'andamento della portata di perdita in funzione della prevalenza, fornendo un utile termine di confronto con le altre relazioni considerate. Inoltre, grazie alla flessibilità dei suoi coefficienti, essa verrà utilizzata nei successivi approfondimenti

sperimentali, in particolare nell'analisi dell'influenza della geometria del foro, al fine di valutare e confrontare il comportamento delle diverse configurazioni di perdita.

Per ciascuna delle equazioni analizzate, è stato infine calcolato l'errore normalizzato al quadrato rispetto ai valori di portata di perdita Q_L (l/s), misurati sperimentalmente mediante il misuratore di portata elettromagnetico alle diverse prevalenze H (m), valutando quantitativamente la capacità delle diverse formulazioni di rappresentare il comportamento osservato durante la campagna sperimentale.

I grafici relativi a ciascun materiale e al rispettivo foro sono riportati in Appendice A, B.

Un esempio è riportato in Figura 49.

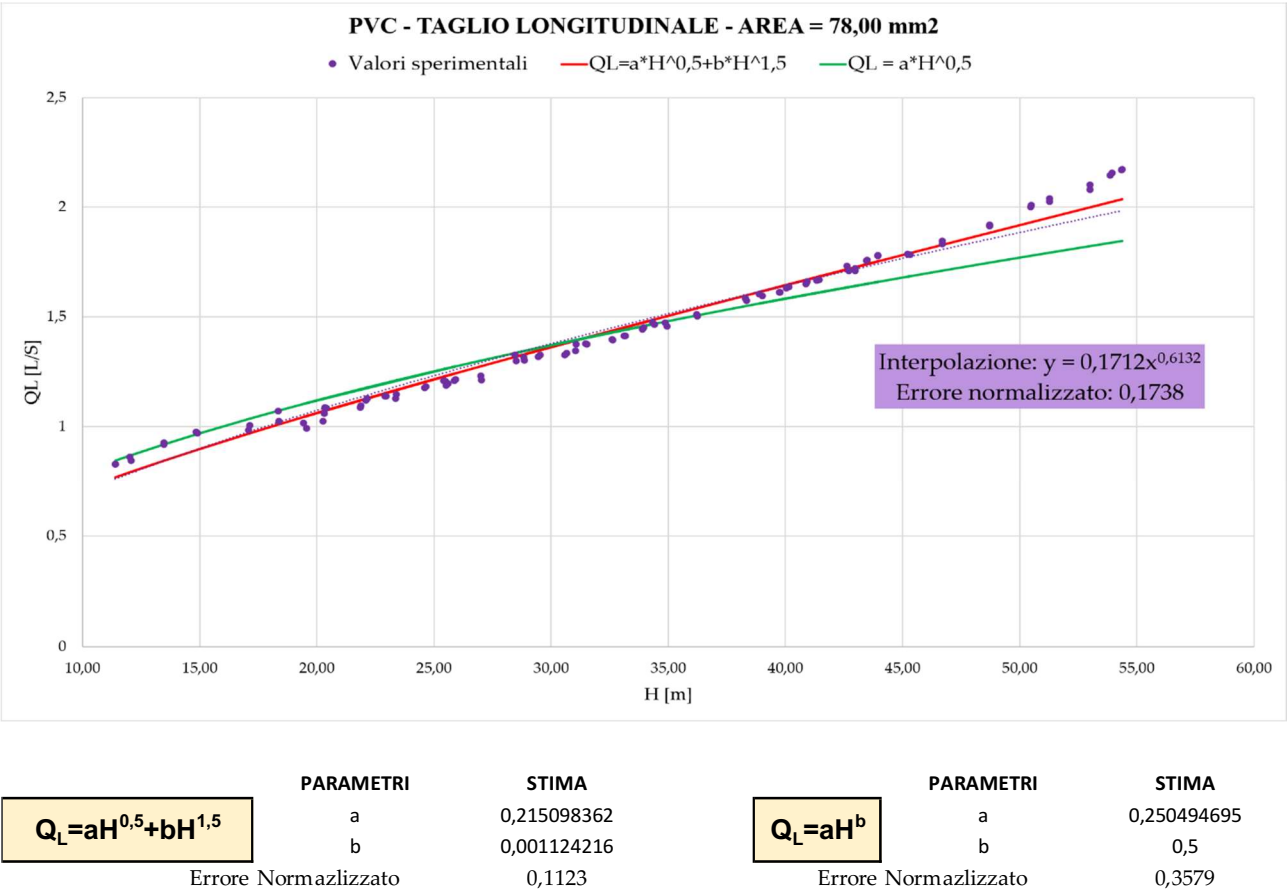


Figura 49. Adattamento delle curve ai valori sperimentali

I risultati ottenuti dall'analisi sperimentale hanno evidenziato come il materiale della condotta esercita un ruolo fondamentale nell'evoluzione e nell'entità delle perdite idriche.

Seguendo la formulazione di Cassa e VanZyl, in presenza di fori circolari su condotte in PVC, il secondo termine dell'equazione, riferito all'incremento di portata dovuto alla deformazione dell'area della rottura, è nullo per fori di piccole dimensioni (parametro $b=0$). Ciò implica una corrispondenza di questa equazione con quella proposta da Torricelli, la quale presenta una buona approssimazione ai dati sperimentali. All'aumentare delle dimensioni del foro circolare, si verifica un incremento del parametro b fino ad assumere valori dell'ordine di 10^{-4} : in questo modo, la formulazione di Cassa e VanZyl tende ad adattarsi meglio ai valori sperimentali.

In Figura 50 e 51 sono riportati rispettivamente i grafici del foro di area $12,56 \text{ mm}^2$, il secondo della serie per dimensione (non è stata presa in considerazione la dimensione ancora più piccola in quanto non rappresentativa) e di quello di area pari a $113,04 \text{ mm}^2$ (il foro più grande della serie).

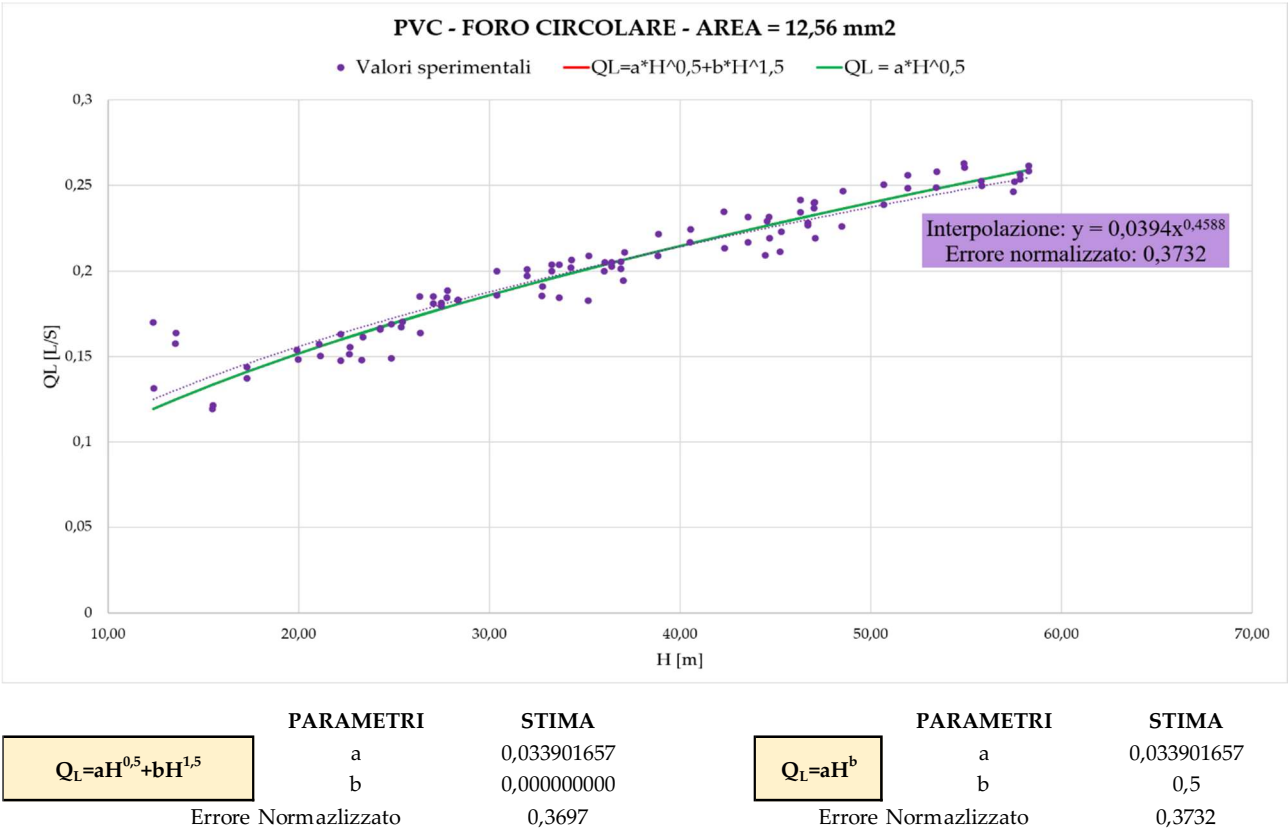


Figura 50. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni $12,56 \text{ mm}^2$ sulla condotta in PVC

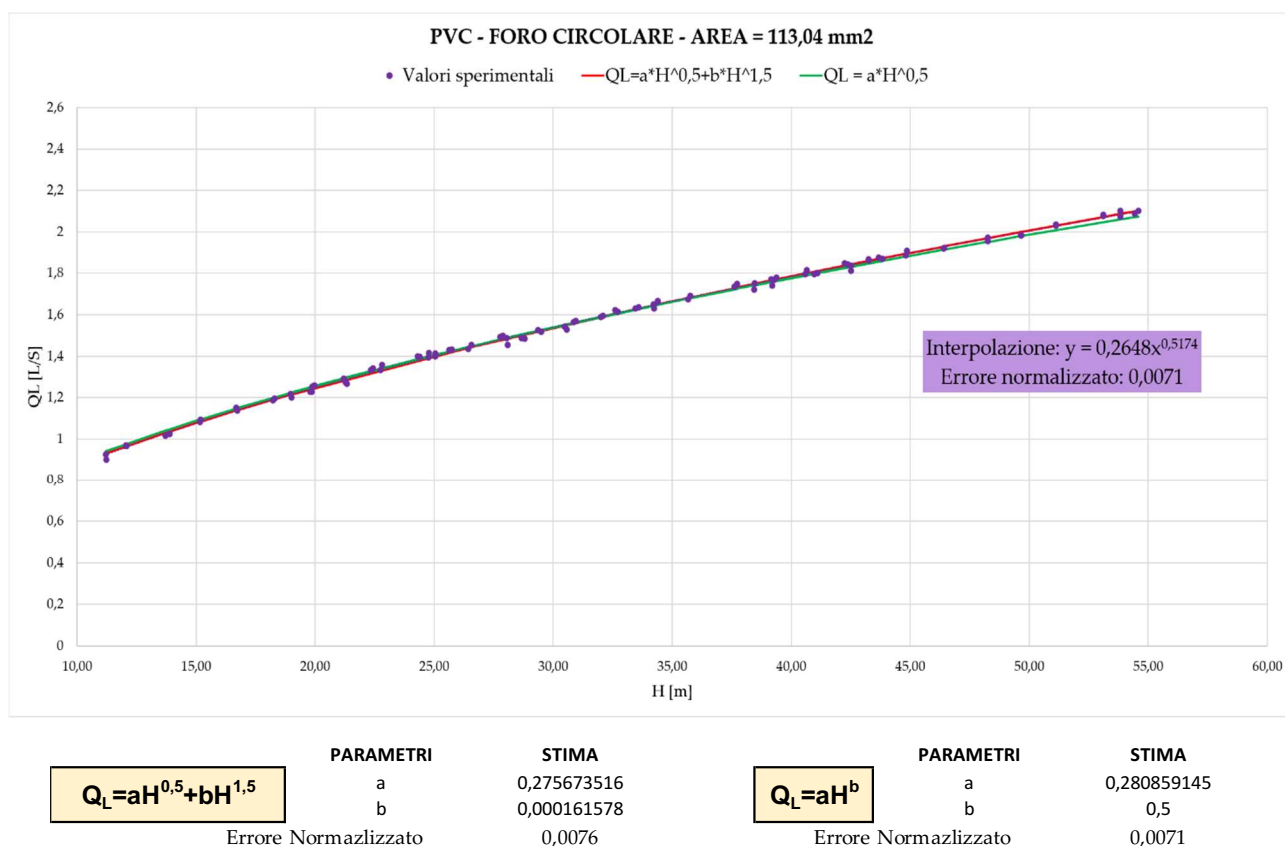


Figura 51. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 113,04 mm² sul PVC

Nelle condotte in ghisa che presentano fori circolari, la deformazione elastica della rottura non è rilevante. La formulazione di Cassa e VanZyl si riduce all'equazione di Torricelli, il cui adattamento ai valori sperimentali rappresenta coerentemente la perdita tramite il solo contributo geometrico.

In Figura 52 e 53 seguito sono riportati i grafici del foro di area 12,56 mm², il secondo della serie per dimensione (non è stata presa in considerazione la dimensione ancora più piccola in quanto non rappresentativa) e di quello di area pari a 113,04 mm² (il foro più grande della serie).

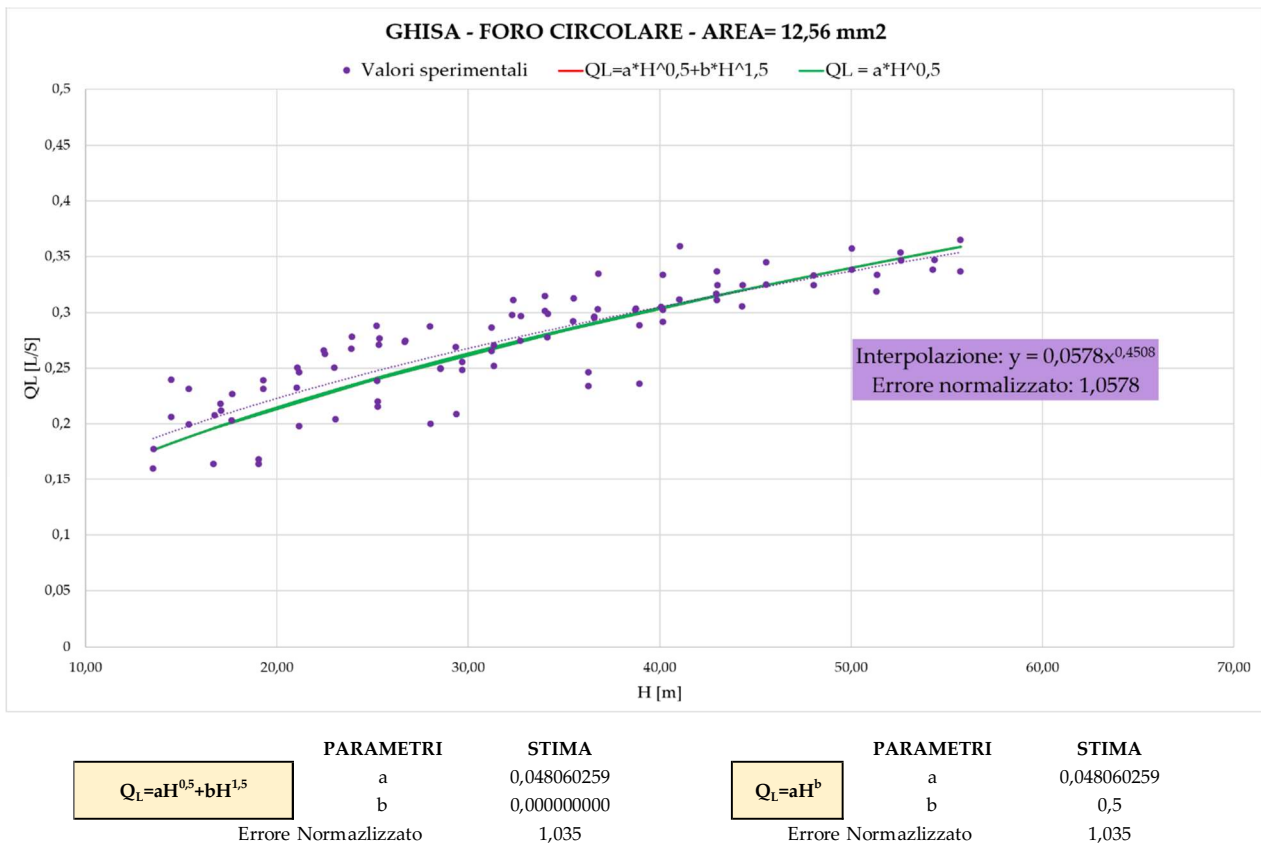


Figura 52. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 12,56 mm² sulla ghisa

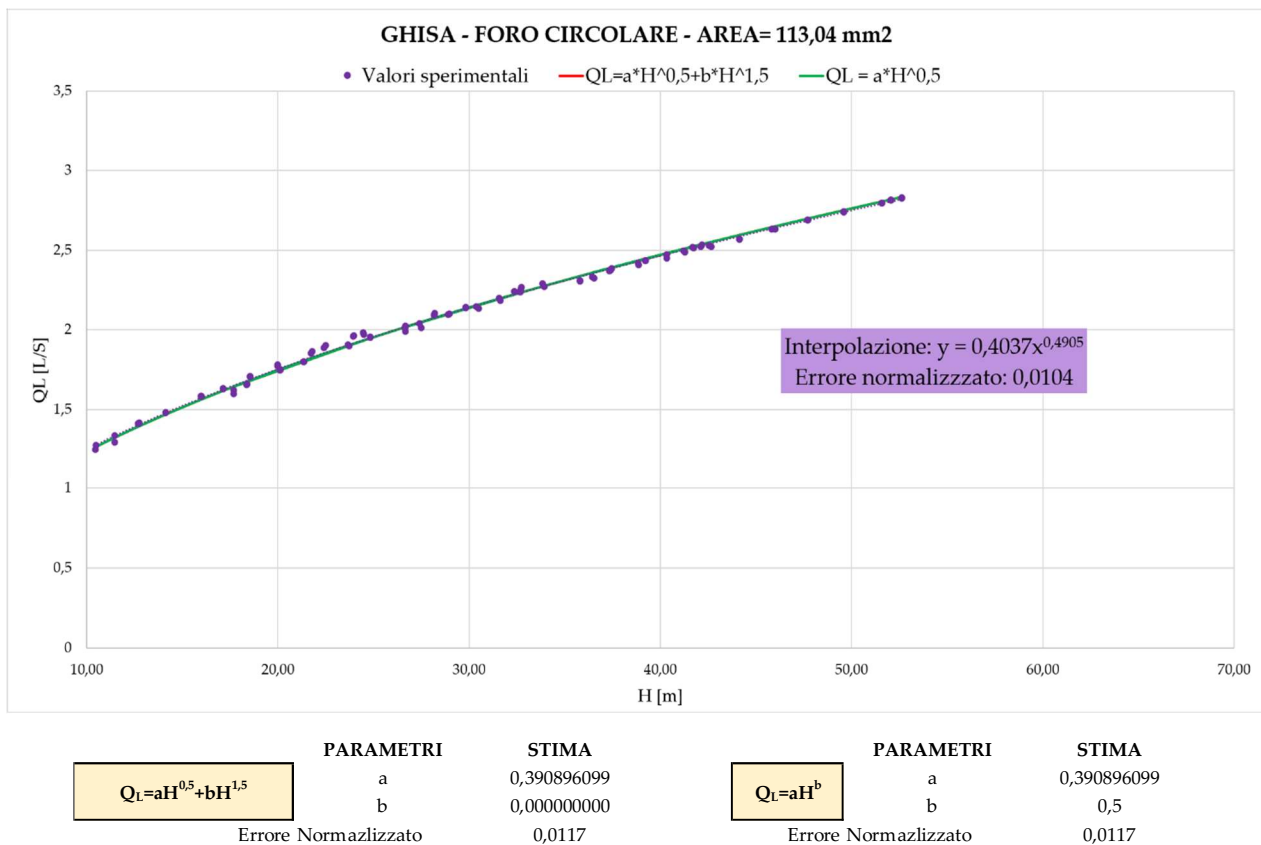


Figura 53. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 113,04 mm² sulla ghisa

sono riportati i valori dei parametri della formulazione di Cassa e VanZyl per fori circolari su condotte in PVC e in ghisa

Tabella 2 Valori dei parametri a e b nella formulazione di Cassa e VanZyl tagli longitudinali sul PVC e sulla ghisa

FORI CIRCOLARI					
Area foro	PVC		Area foro	GHISA	
[mm ²]	a	b	[mm ²]	a	b
7,07	0,006522461	0,000253610	7,065	0,019374235	0,000085932
12,56	0,033901657	0,000000000	12,56	0,048060259	0,000000000
19,63	0,045480589	0,000050449	19,63	0,07461921	0,000000000
28,26	0,068790871	0,000077082	28,26	0,108843515	0,000000000
38,47	0,094707976	0,000041655	38,47	0,150680586	0,000000000
50,24	0,126441463	0,000054824	50,24	0,190535298	0,000000000
63,59	0,155144117	0,000112998	63,59	0,214644223	0,000000000
78,50	0,195032379	0,000076225	78,5	0,287959067	0,000000000
94,99	0,244830292	0,000226139	94,99	0,359405481	0,000000000
113,04	0,275673516	0,000161578	113,04	0,390896099	0,000000000

Nel caso di fessure longitudinali su condotte in PVC, invece, il secondo termine della formulazione di Cassa e VanZyl, assume valori diversi da 0 sin dalle dimensioni più piccole del taglio, e si osserva un progressivo aumento al crescere delle dimensioni della rottura. L'andamento dei valori sperimentali non è dunque rappresentabile attraverso l'equazione di Torricelli, dal momento che la componente geometrica rappresenta soltanto una parte della perdita totale.

In Figura 54 e 55 sono riportati i grafici del foro di area 20,90 mm², il secondo della serie per dimensione (non è stata presa in considerazione la dimensione ancora più piccola in quanto non rappresentativa) e di quello di area pari a 98,80 mm² (il foro più grande della serie).

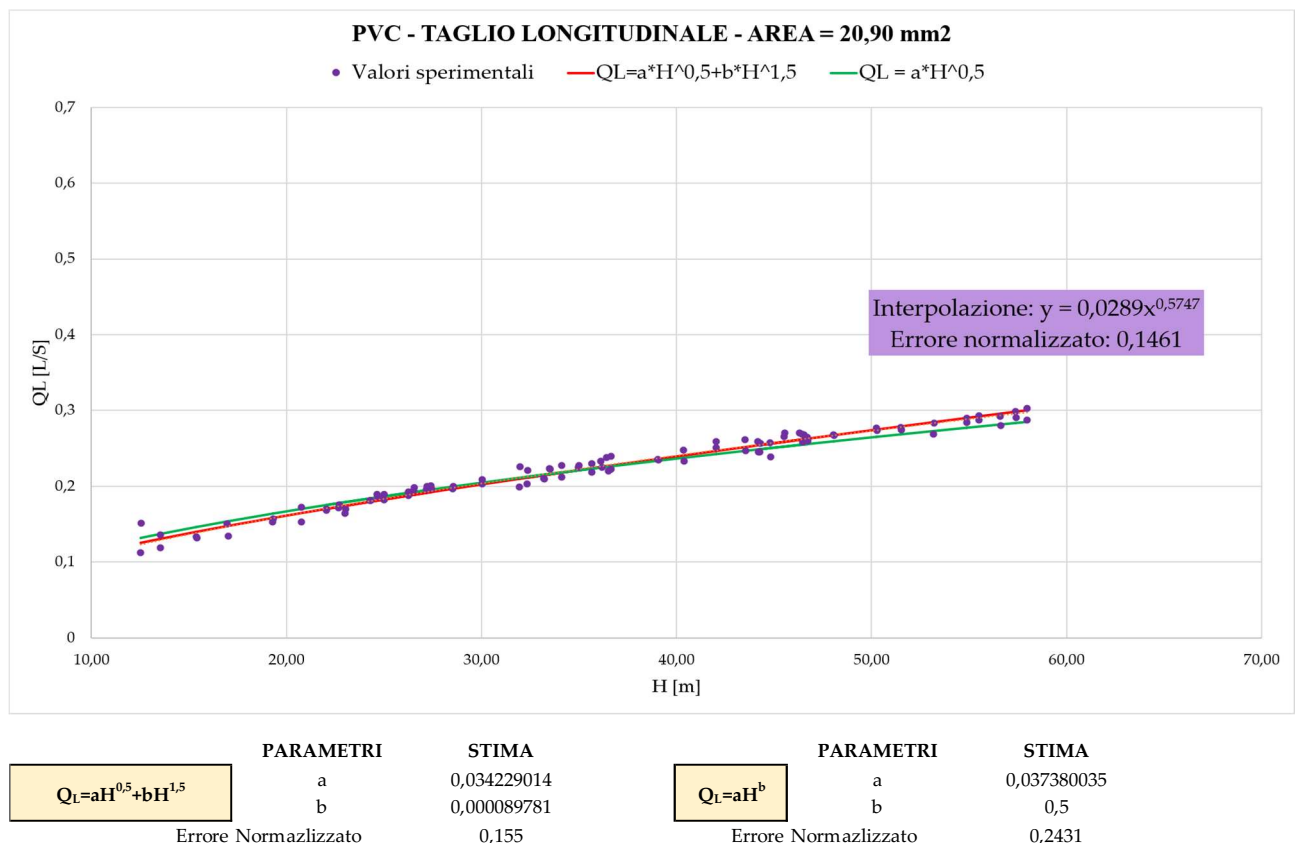


Figura 54. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 20,90 mm² sul PVC

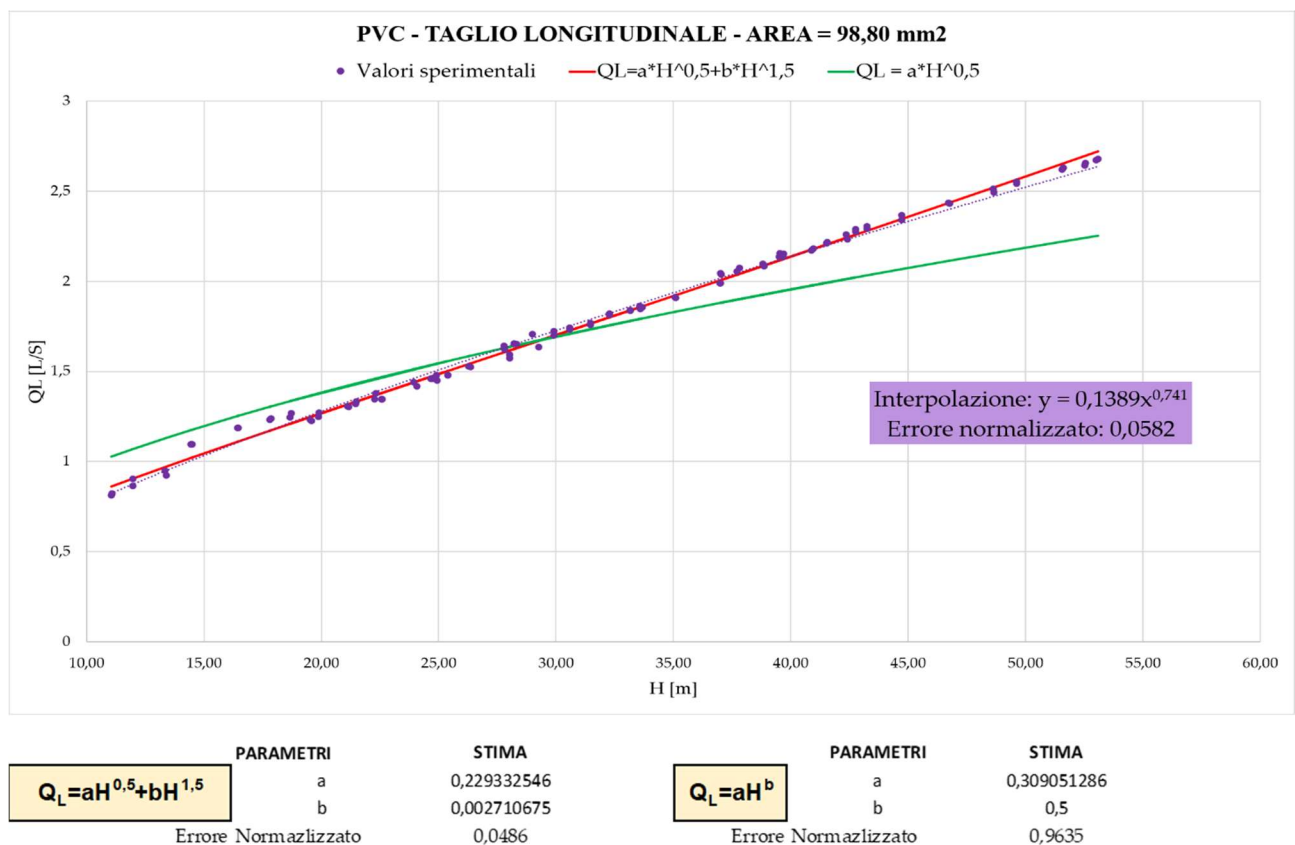


Figura 55. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 98,80 mm² sul PVC

Nel caso di tagli longitudinali su condotte in ghisa, al contrario, il termine b rimane nullo per quasi tutta la serie; solo nel caso della rottura di area = 82,03 mm², il termine b assume valori diversi da zero, dell'ordine di 10⁻³. Questo aspetto determina un migliore adattamento ai valori sperimentali della formulazione di Cassa e VanZyl rispetto all'equazione di Torricelli. Il risultato lascia ipotizzare che il contributo dovuto all'elasticità possa diventare apprezzabile per tagli di dimensioni maggiori rispetto a quelle considerate nel presente studio, aspetto che però richiederebbe ulteriori approfondimenti sperimentali per essere confermato.

In Figura 56 e 57 sono riportati i grafici del foro di area 19,69 mm², il secondo della serie per dimensione (non è stata presa in considerazione la dimensione ancora più piccola in quanto non rappresentativa) e di quello di area pari a 82,03 mm² il secondo foro più grande della serie (non è stata presa in considerazione la dimensione ancora più grande della serie in quanto la prova non è stata portata a termine a causa dei grandi volumi di perdita).

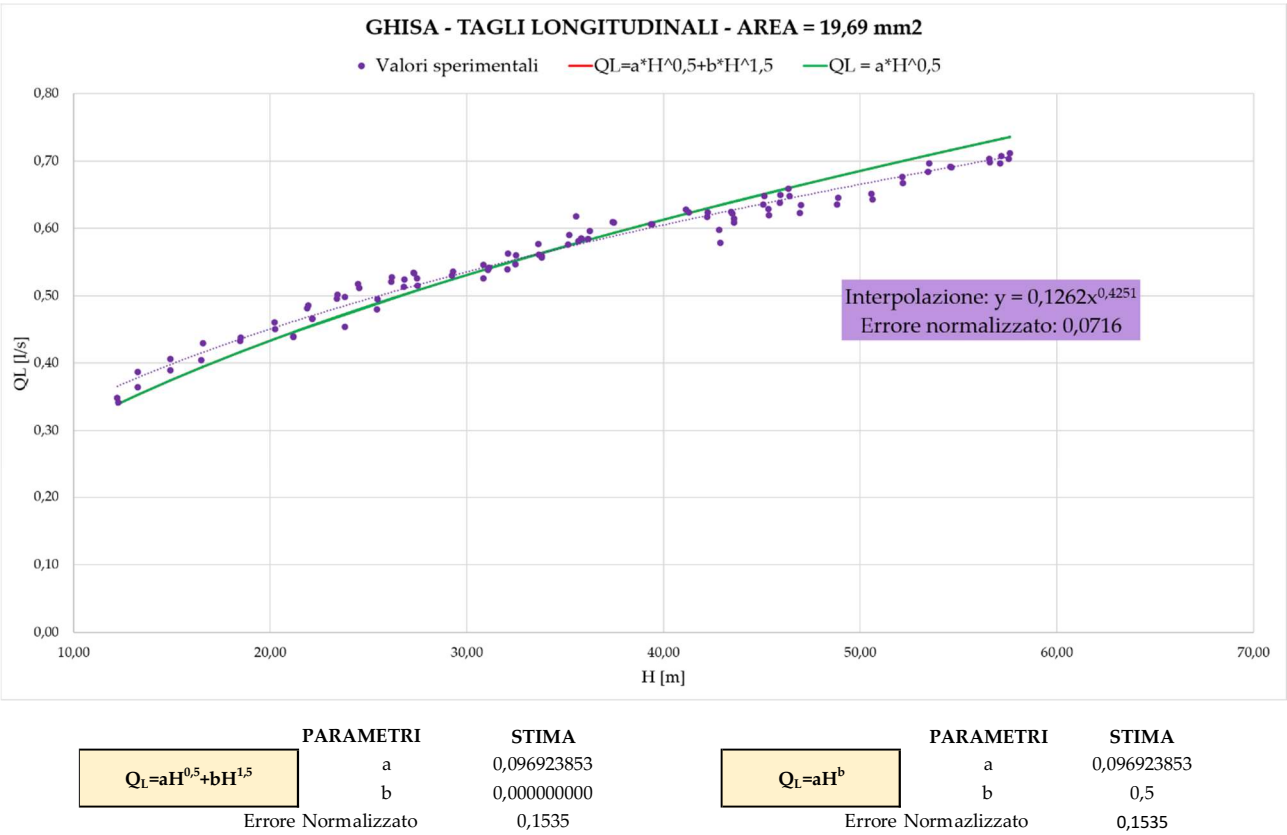


Figura 56. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 19,69 mm² sulla ghisa

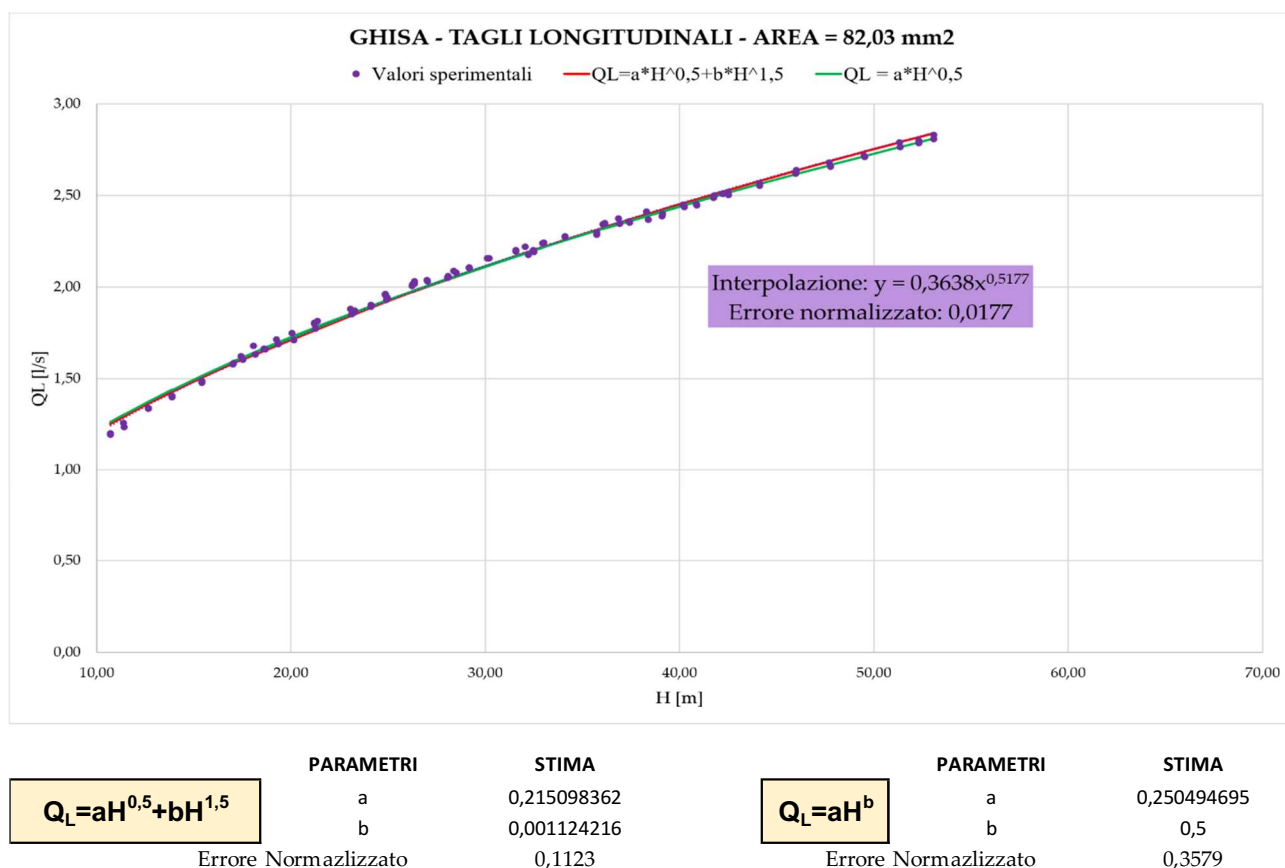


Figura 57. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 82,03 mm² sulla ghisa

Nella Tabella 3 sono rappresentati i parametri della formulazione di Cassa e VanZyl su condotte in PVC e in ghisa con tagli longitudinali.

Tabella 3 Andamento dei parametri a e b nella formulazione di Cassa e VanZyl
 tagli longitudinali sul PVC e sulla ghisa

TAGLI LONGITUDINALI					
Area foro	PVC		Area foro	GHISA	
[mm ²]	a	b	[mm ²]	a	b
14,30	0,013944223	0,000000000	14,08	0,054559783	0,000000000
20,90	0,034229014	0,000089781	19,69	0,096923853	0,000000000
26,60	0,045403653	0,00017537	28,75	0,151033863	0,000000000
36,00	0,072766032	0,00021844	41,35	0,22085256	0,000000000
57,00	0,151453516	0,000464860	56,70	0,268620059	0,000000000
65,40	0,165422879	0,0013195	66,75	0,301334879	0,000000000
78,00	0,215098362	0,00112422	82,30	0,380322498	0,000179189
98,80	0,229332546	0,00271067	99,00	0,471790933	0,000000000

L'indagine è stata estesa anche alla geometria dei tagli trasversali, ma esclusivamente per le condotte in ghisa, quindi, i relativi grafici, pur non permettendo ancora un confronto con il comportamento del PVC, sono riportati in Appendice C per completezza di trattazione.

E' possibile comunque osservare che in questo caso, come per i precedenti casi sulla ghisa, non si ha alcuna rilevanza della componente elastica sulla perdita: la formulazione di Cassa e VanZyl risulta quindi coincidere con l'equazione di Torricelli. Il termine b assume valori diversi da zero (dell'ordine di 10^{-5}) solo nella prova con taglio di area = 27,5 mm². Tale aspetto potrebbe essere attribuito a variazioni delle condizioni sperimentali durante l'esecuzione della prova e non necessariamente a un effettivo contributo della deformazione elastica della rottura.

In Figura 58 e 59 sono riportati i grafici del foro di area 14,00 mm², il più piccolo della serie e quello di area pari a 56,70 mm², il foro più grande della serie.

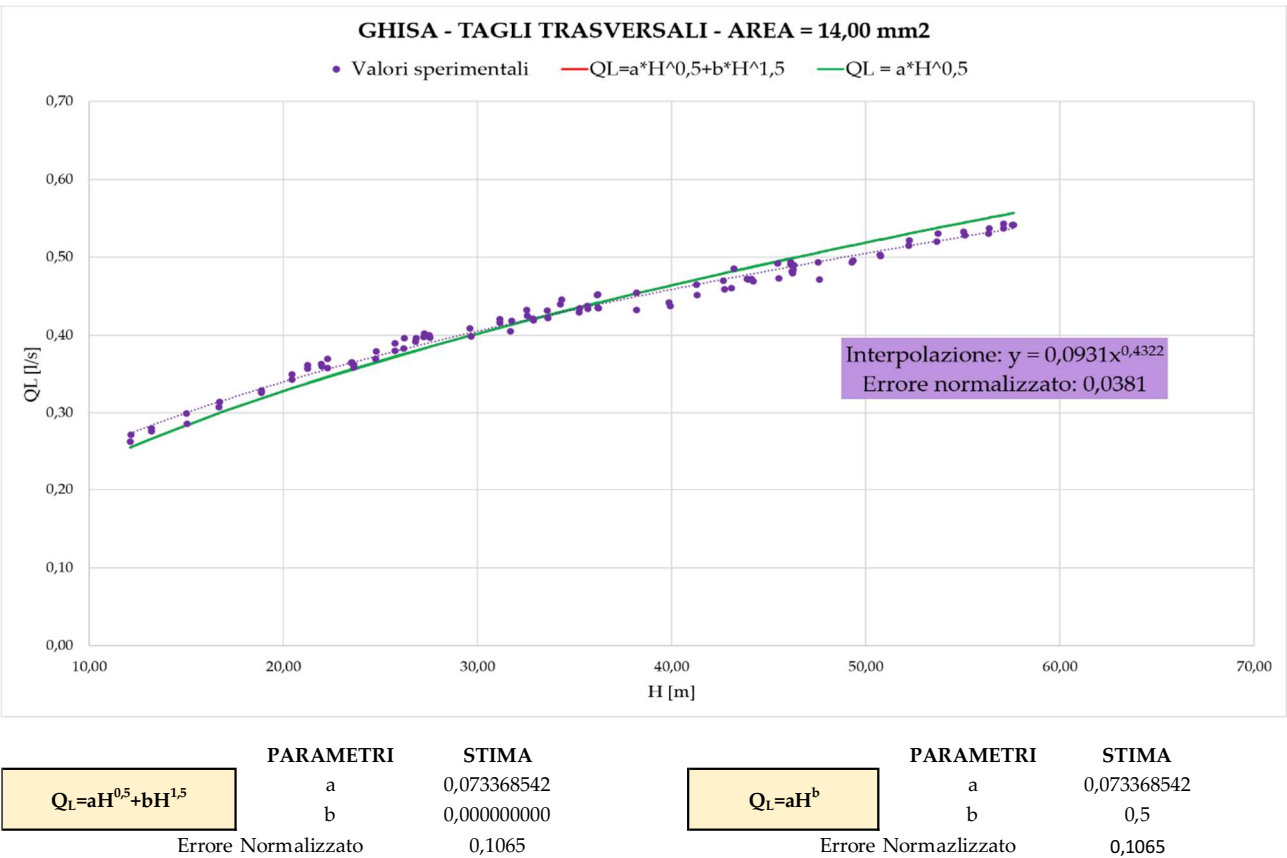
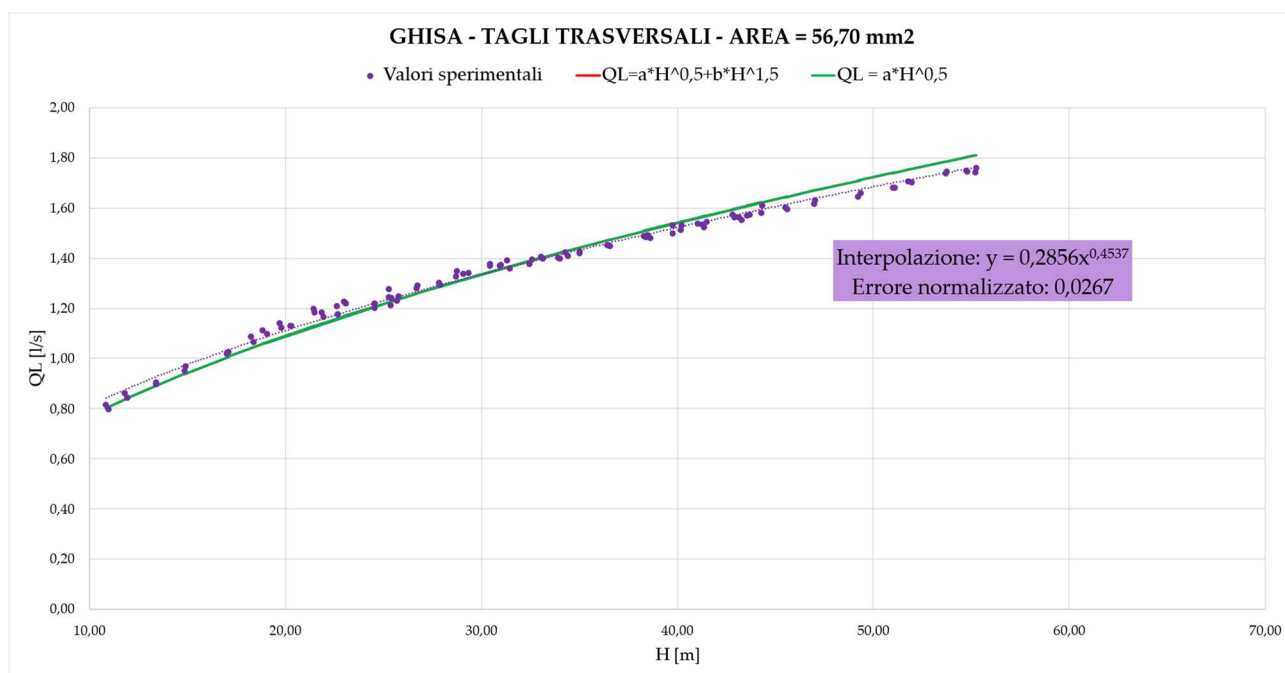


Figura 58. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 14,00 mm² sulla ghisa



$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	PARAMETRI		STIMA	$Q_L = aH^b$	PARAMETRI		STIMA
	a	b			a	b	
	0,243688895	0,000000000			0,243688895	0,5	
Errore Normalizzato	0,0607			Errore Normazlizzato	0,0607		

Figura 59. Adattamento delle curve ai valori sperimentali per il foro di dimensioni 56,70 mm² sulla ghisa

In Tabella 4 sono rappresentati i parametri della formulazione di Cassa e VanZyl su condotte in ghisa con tagli trasversali.

Tabella 4 Andamento dei parametri a e b nella formulazione di Cassa e VanZyl tagli trasversa sulla ghisa

TAGLI TRASVERSALI		
Area foro	GHISA	
[mm ²]	a	b
14,00	0,073368542	0,000000000
20,90	0,098525405	0,000000000
28,75	0,117429288	0,000019429
36,90	0,156035244	0,000000000
57,00	0,243688895	0,000000000

9. Conclusioni

La campagna sperimentale condotta ha permesso di approfondire il comportamento delle perdite idriche nelle condotte in pressione, mettendo in evidenza i ruoli fondamentali che ricoprono il materiale costituente la condotta e la tipologia di rottura, in termini di portata e volumi di perdita.

In primo luogo, l'analisi si è concentrata sull'influenza del materiale della condotta, con particolare riferimento alla ghisa e al PVC.

È emerso che le perdite da condotte in ghisa sono ben descritte dall'equazione di Torricelli, espressa dalla relazione $Q = a * H^{0,5}$, a conferma del fatto che la deformazione del materiale incide in modo limitato, se non trascurabile, sulla portata di perdita complessiva. Diversamente, nelle condotte in PVC la sola legge di Torricelli non è sufficiente a rappresentare il fenomeno, poiché non si possono trascurare gli effetti della deformazione elastica della tubazione e dell'aumento dell'apertura della perdita al crescere della pressione. Per questo motivo si è fatto riferimento alla teoria FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges), utilizzando la formulazione proposta da Cassa e VanZyl: $Q = a * H^{0,5} + b * H^{1,5}$. In questa espressione, il primo termine rappresenta il contributo riconducibile alla legge di Torricelli, mentre il secondo termine tiene conto dell'incremento della perdita dovuto alle deformazioni elastiche del materiale. Quest'ultimo contributo risulta significativo nei materiali più deformabili, come il PVC e il polietilene, mentre tende a essere trascurabile nei materiali più rigidi, come la ghisa.

Dall'analisi dei parametri a e b della legge di potenza $Q = a * H^b$ seguita dal confronto delle portate in funzione dell'area e della geometria del foro, è inoltre emerso che le perdite nella ghisa risultano sistematicamente superiori a quelle nel PVC. A basse prevalenze e per le aree minori, si osservano differenze superiori al 50%–55%, che tendono progressivamente a ridursi fino a valori medi dell'ordine del 30% all'aumentare della prevalenza e della dimensione del foro. Questo comportamento potrebbe essere associato alla diversa risposta meccanica dei materiali e, in particolare, al ruolo delle deformazioni elastiche che

caratterizzano il PVC. Tale effetto, rappresentato dal secondo termine della formulazione di Cassa e VanZyl, contribuisce infatti a modificare la relazione tra pressione e portata di perdita.

Successivamente, l'attenzione si è concentrata sull'influenza della geometria del foro.

In particolare sono stati oggetto di studio i fori circolari e le fessure longitudinali, quest'ultime orientate secondo la direzione di sviluppo della condotta. L'analisi delle fessure trasversali, orientate ortogonalmente al flusso, è stata invece limitata da problematiche sperimentali legate all'entrata di aria nella condotta durante le fasi di impianto chiuso.

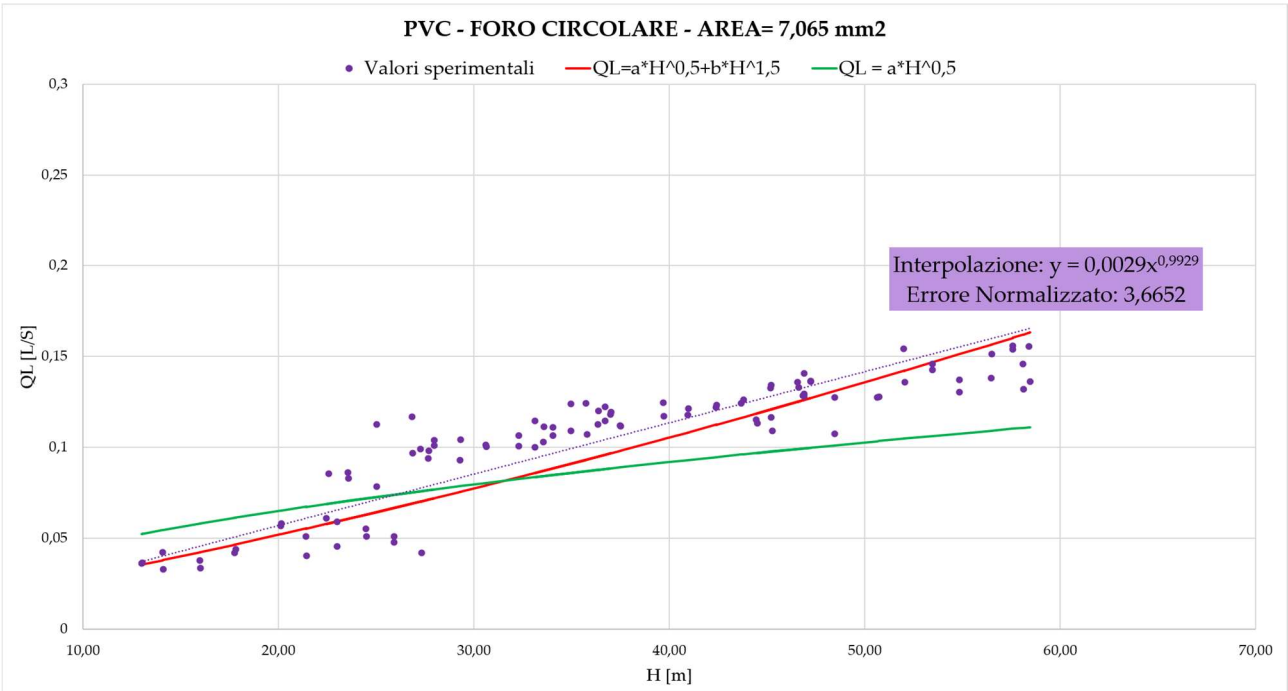
Per quanto riguarda il PVC, le fessure longitudinali presentano, alle aree minori, portate di perdita inferiori di circa il 15% e il 25% rispetto ai corrispondenti fori circolari. Tuttavia, all'aumentare dell'area della perdita, questa tendenza si inverte e le fessure longitudinali arrivano a generare portate superiori, mediamente comprese tra il 15% e il 25%, rispetto ai fori circolari di area equivalente. Nelle condotte in ghisa si osserva un comportamento analogo, ma più marcato: le fessure longitudinali presentano infatti percentuali di perdita superiori rispetto alle altre tipologie di rottura, mentre le fessure trasversali si collocano in una posizione intermedia tra le due configurazioni. Questo comportamento, osservato sia nel PVC sia nella ghisa, può essere ricondotto all'orientamento della rottura rispetto alla direzione del flusso. In particolare, si può ipotizzare che la diversa distribuzione delle pressioni e delle velocità in prossimità dell'apertura favorisca il deflusso attraverso le fessure longitudinali in misura maggiore rispetto alle altre geometrie considerate. Questa interpretazione potrebbe contribuire a spiegare sia il progressivo incremento delle perdite nelle fessure longitudinali sul PVC all'aumentare della prevalenza, sia il divario osservato nella ghisa tra fessure longitudinali e fori circolari.

Infine, la maggiore entità delle perdite osservate nella ghisa rispetto al PVC potrebbe essere causata da diversi fattori, che richiedono indagini sperimentali dedicate. Tra questi si possono citare: i fenomeni di contrazione della vena fluida in corrispondenza dell'apertura,

le caratteristiche geometriche e superficiali dei bordi del foro, le eventuali variazioni locali della condotta dovute alle lavorazioni eseguite per la realizzazione delle perdite, i possibili distacchi del rivestimento interno in malta cementizia e, più in generale, l'effetto dell'invecchiamento dei materiali sulle loro proprietà meccaniche.

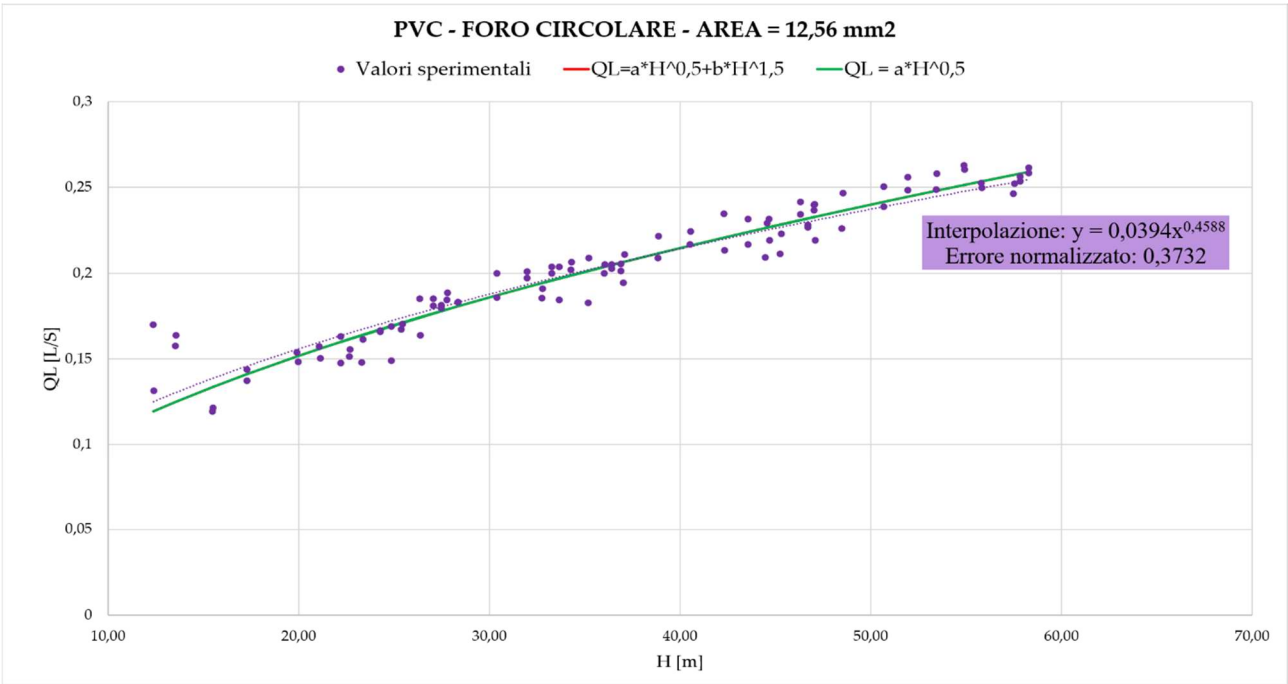
10. Appendice

A. Legame perdita-pressione di tubi in PVC e ghisa per fori circolari



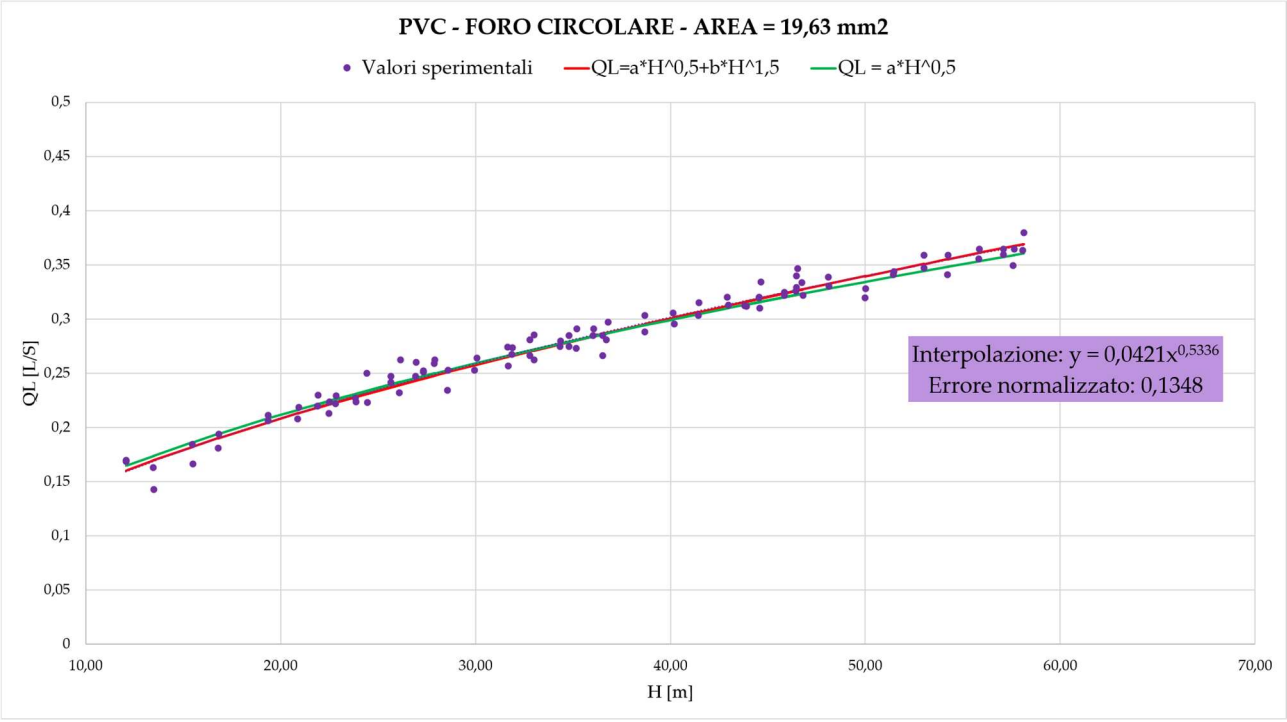
PARAMETRI			STIMA		
$QL=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$QL=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		

0,006522461	0,014535057
0,000253610	0,5
3,601	8,5514

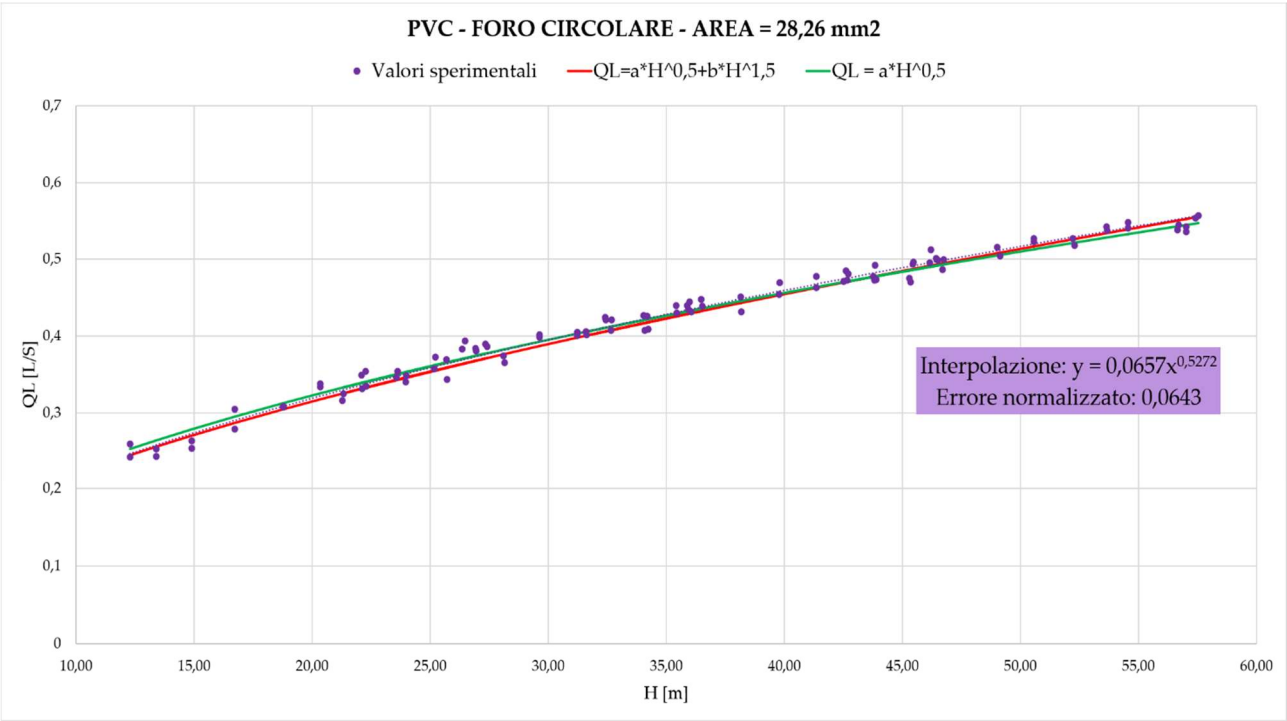


PARAMETRI			STIMA		
$QL=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$QL=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		

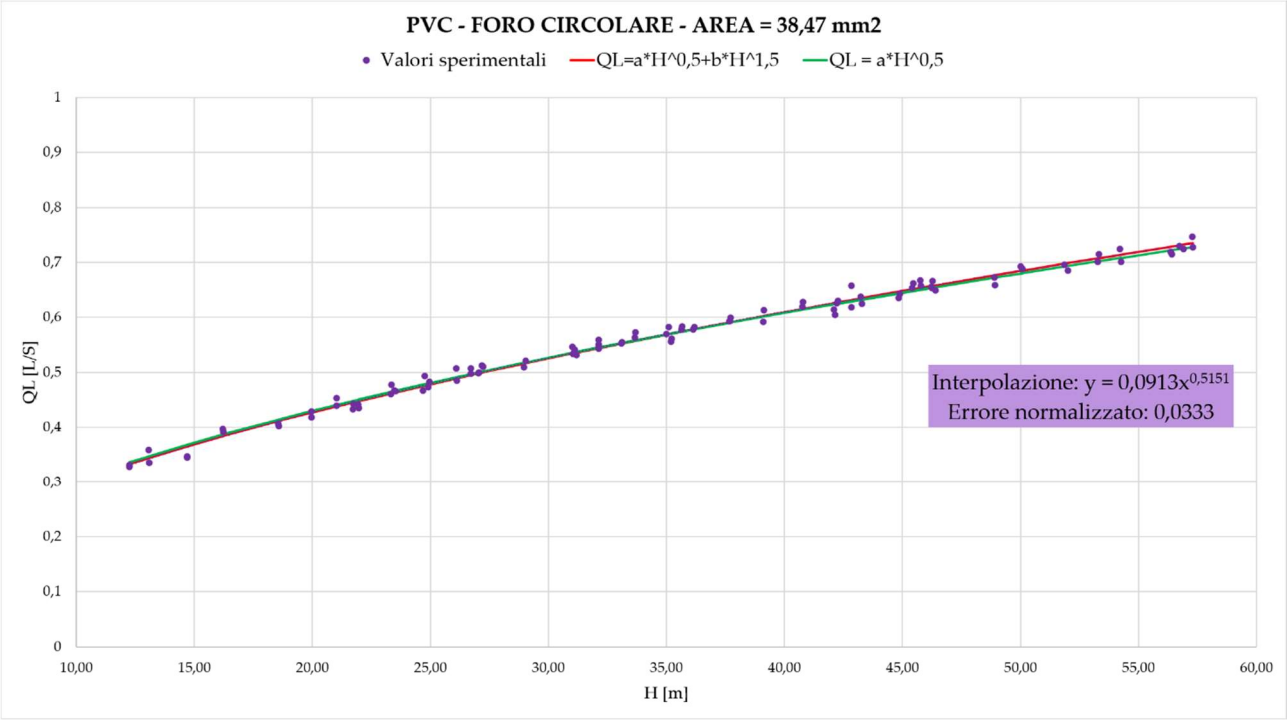
0,033901657	0,033901657
0,000000000	0,5
0,3697	0,3732



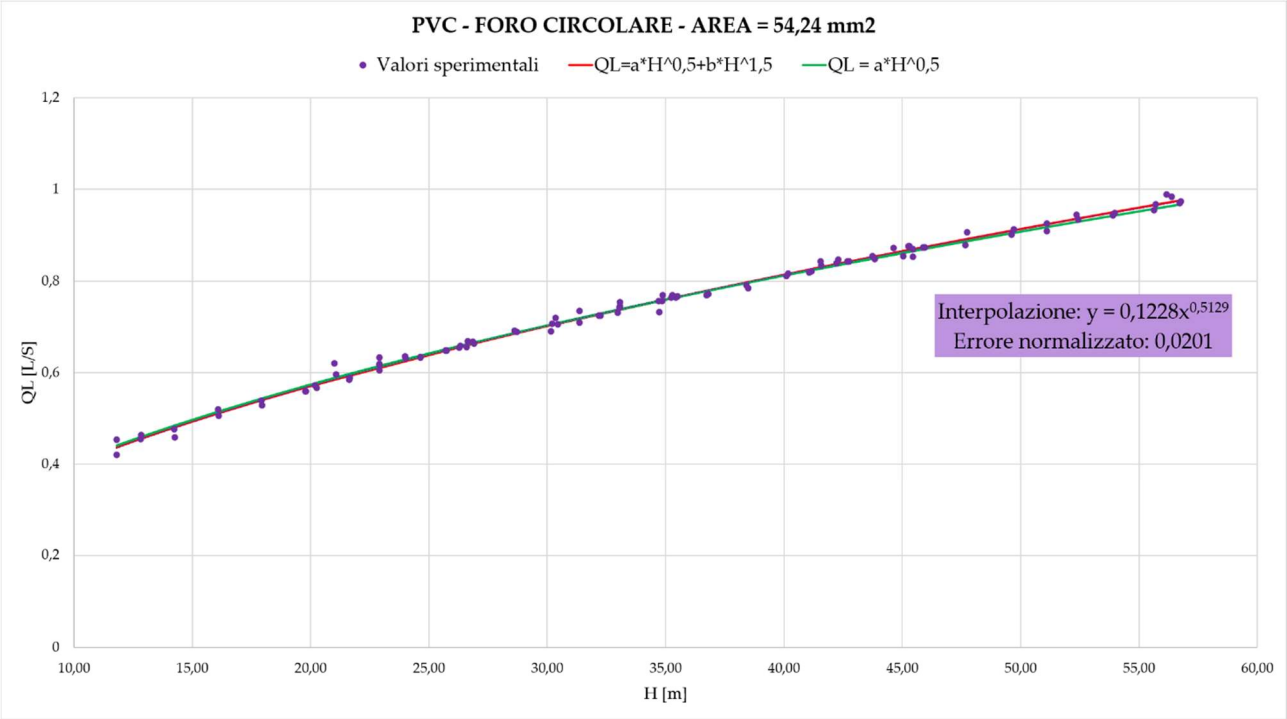
PARAMETRI			PARAMETRI		
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,045480589	$Q_L = aH^b$	a	0,047268557
	b	0,000050449		b	0,5
	Errore Normazlizzato	0,139		Errore Normazlizzato	0,1563



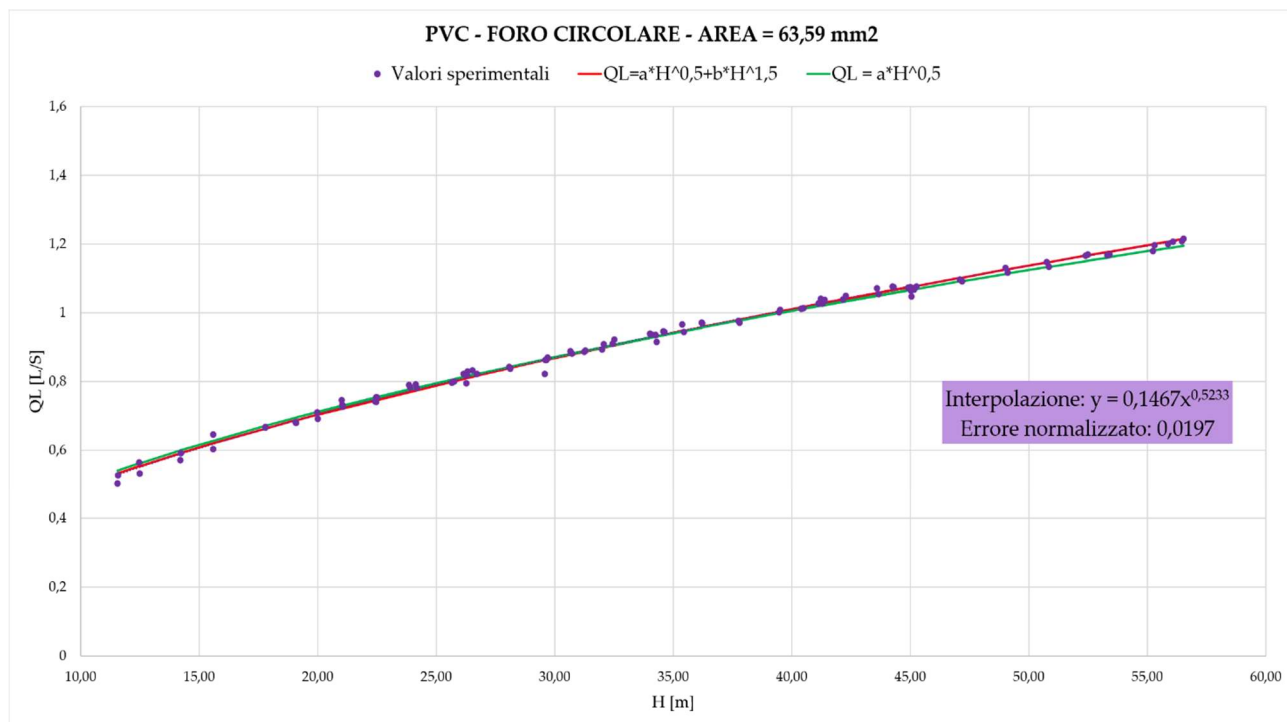
PARAMETRI			PARAMETRI		
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,068790871	$Q_L = aH^b$	a	0,072176858
	b	0,000077082		b	0,5
	Errore Normazlizzato	0,0771		Errore Normazlizzato	0,077



	PARAMETRI	STIMA		PARAMETRI	STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,094707976	$Q_L = aH^b$	a	0,096154559
	b	0,000041655		b	0,5
	Errore Normazlizzato	0,0343		Errore Normazlizzato	0,0370

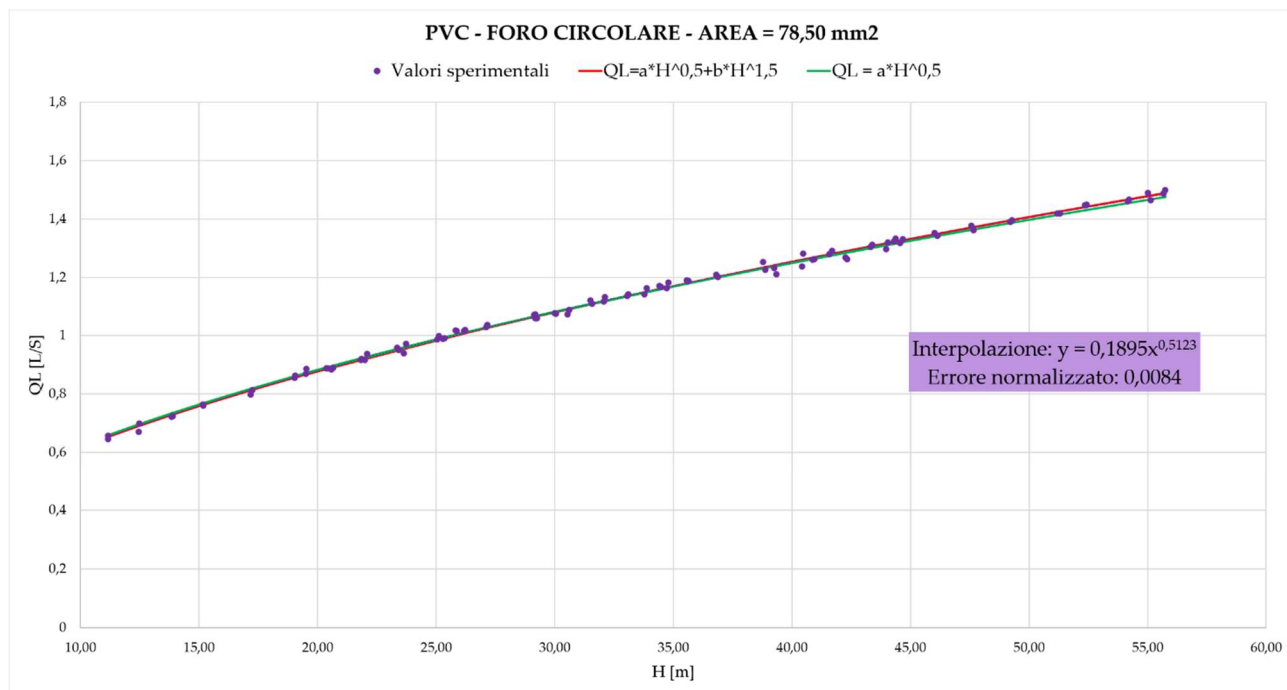


	PARAMETRI	STIMA		PARAMETRI	STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,126441463	$Q_L = aH^b$	a	0,128315306
	b	0,000054824		b	0,5
	Errore Normazlizzato	0,0202		Errore Normazlizzato	0,0229



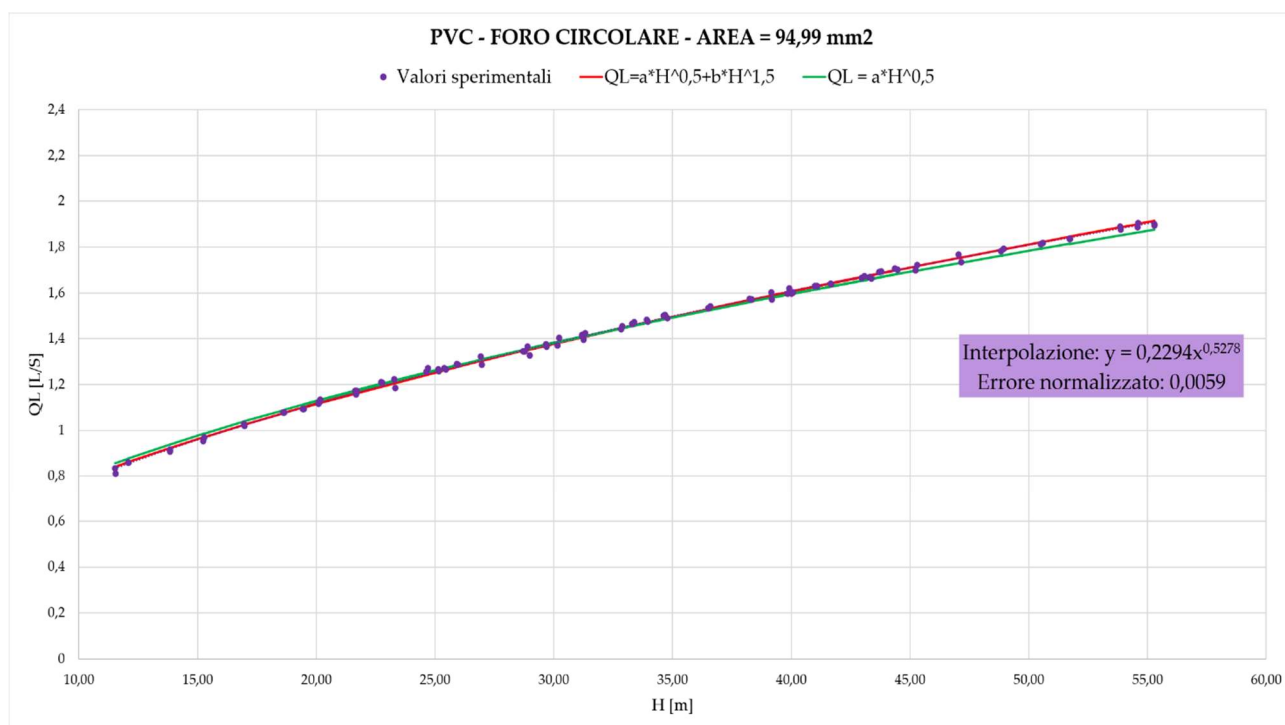
PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,155144117
	b	0,000112998
Errore Normazlizzato		0,0215

PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^b$	a	0,158946471
	b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0288

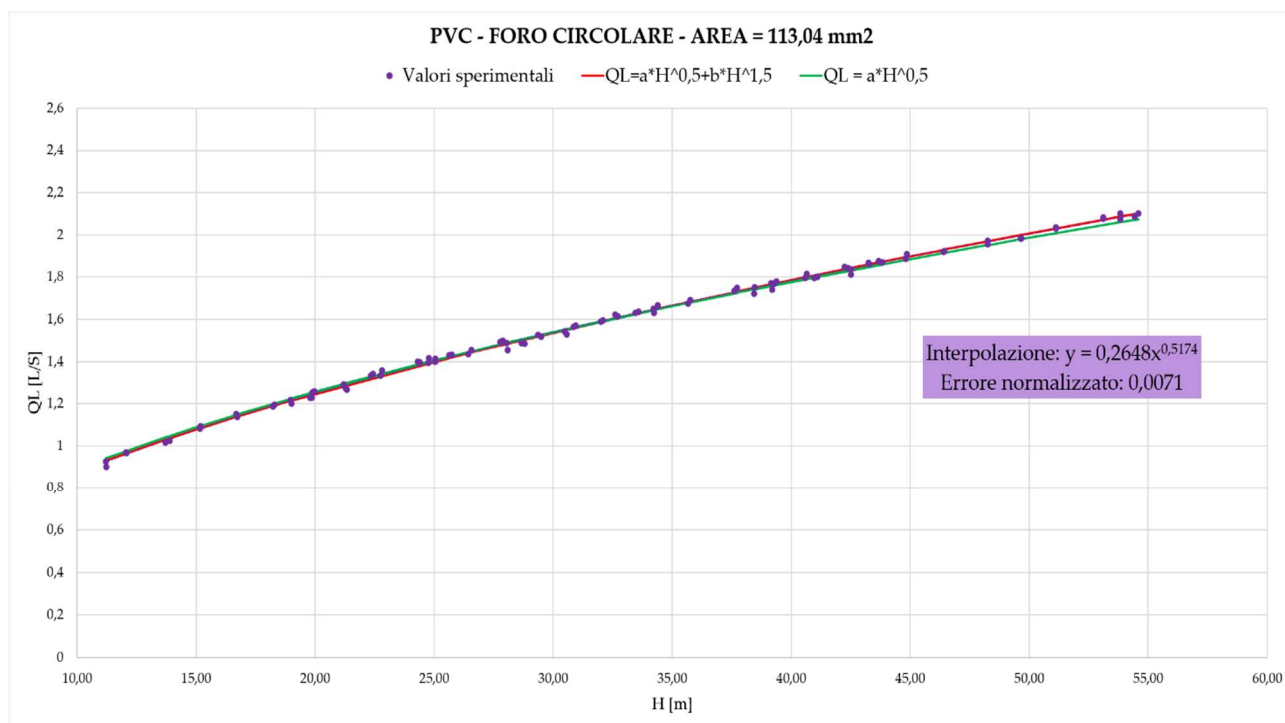


PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,195032379
	b	0,000076225
Errore Normazlizzato		0,0087

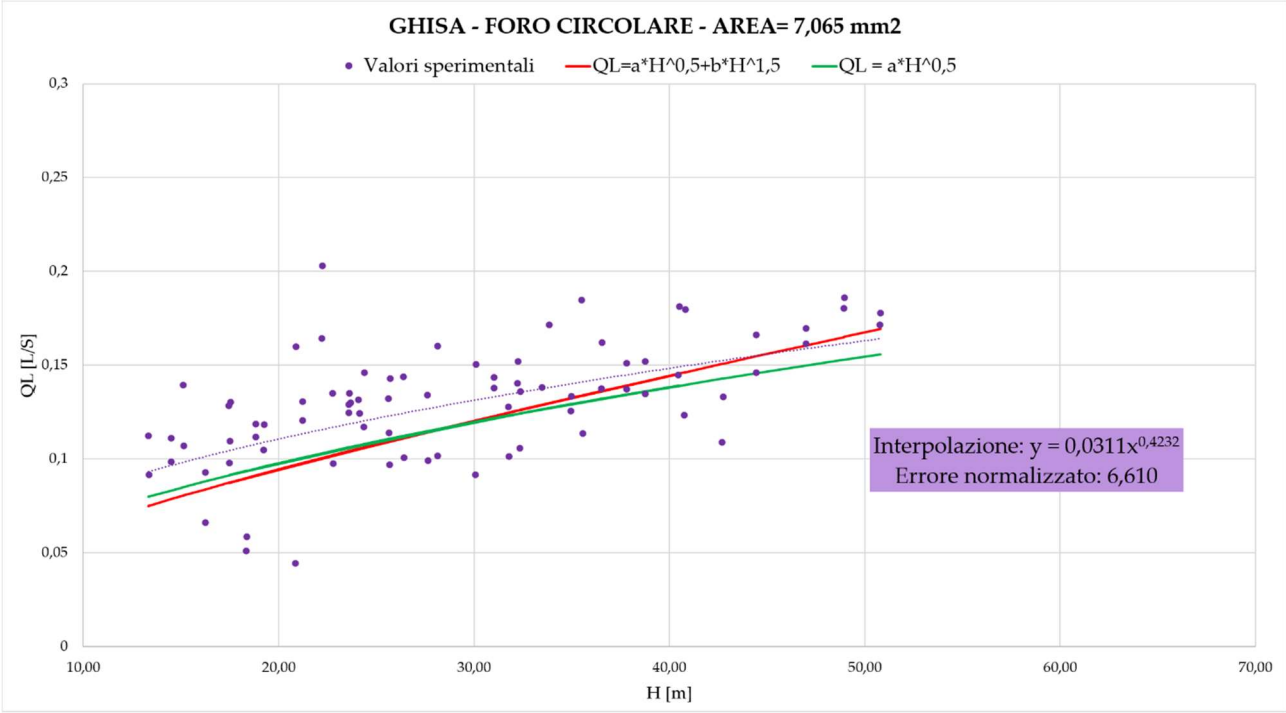
PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^b$	a	0,197552752
	b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0107



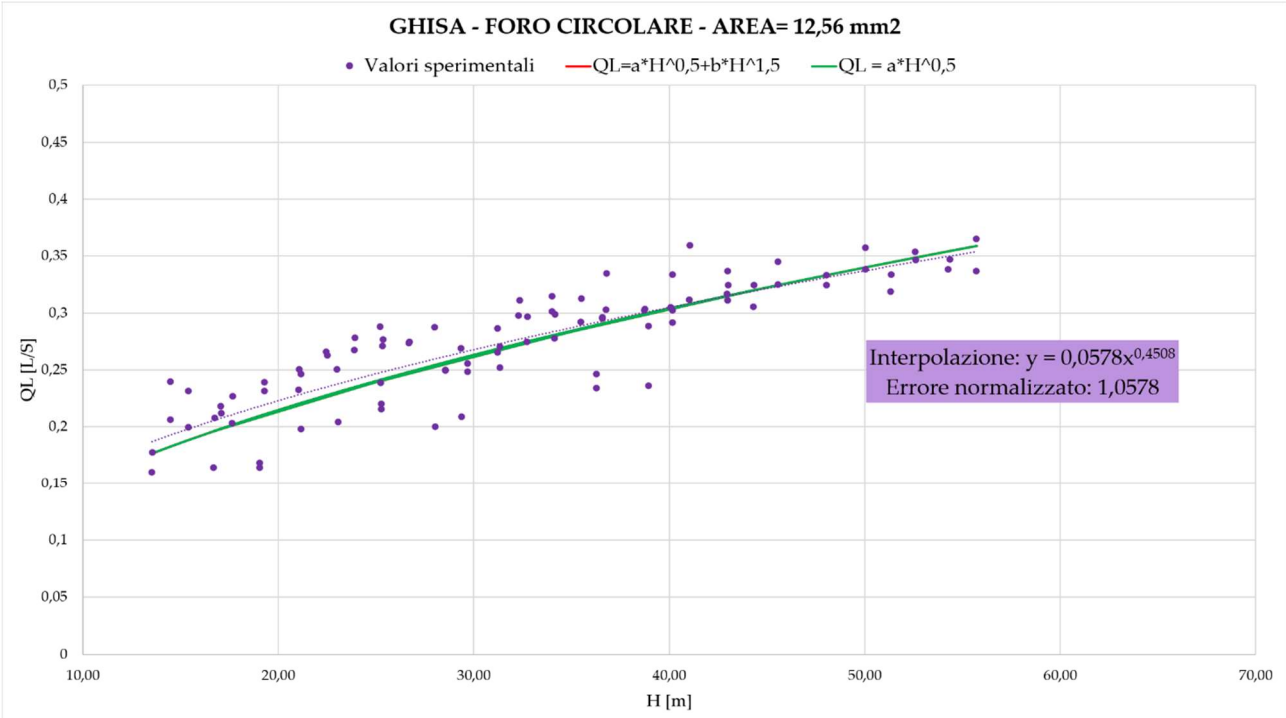
PARAMETRI			STIMA		
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$Q_L=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		



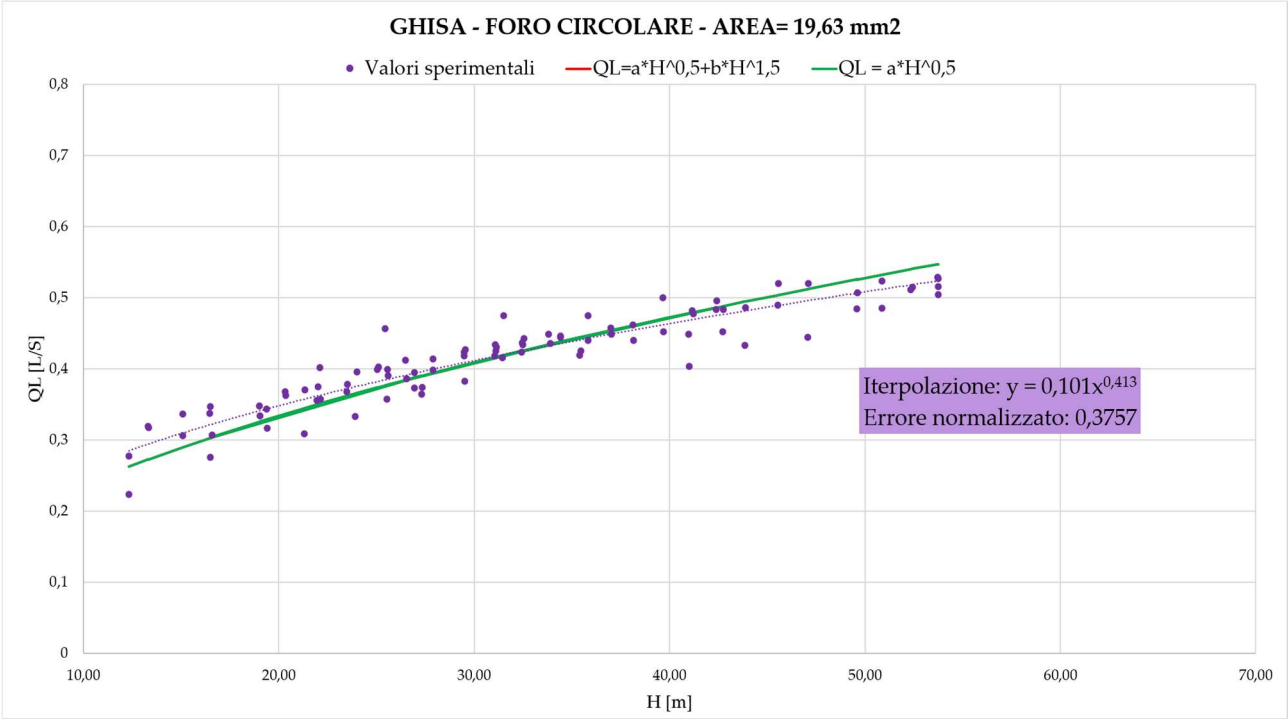
PARAMETRI			STIMA		
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$Q_L=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		



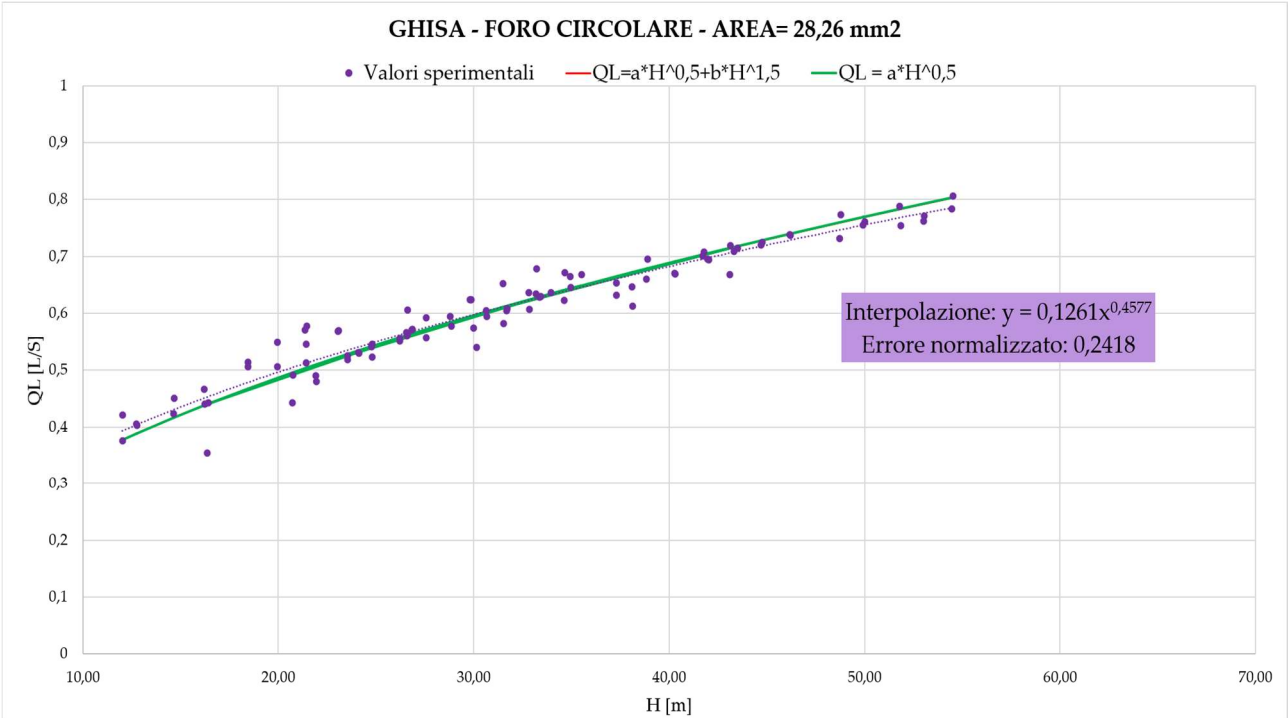
PARAMETRI			STIMA		
$QL=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$QL=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		
		5,4423			5,5529



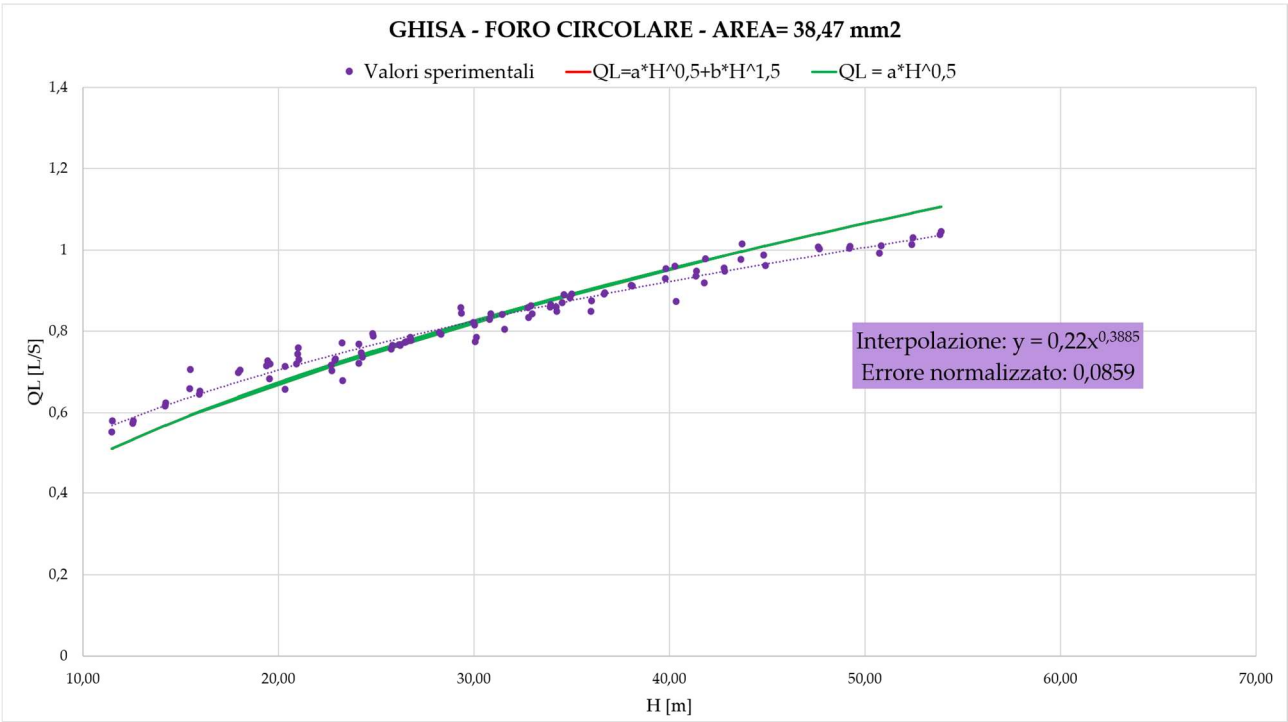
PARAMETRI			STIMA		
$QL=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$QL=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		
		1,035			1,035



PARAMETRI			STIMA	PARAMETRI			STIMA
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		0,07461921	$Q_L=aH^b$	a		0,07461921
	b		0,000000000		b		0,5
Errore Normazlizzato			0,441	Errore Normazlizzato			0,441

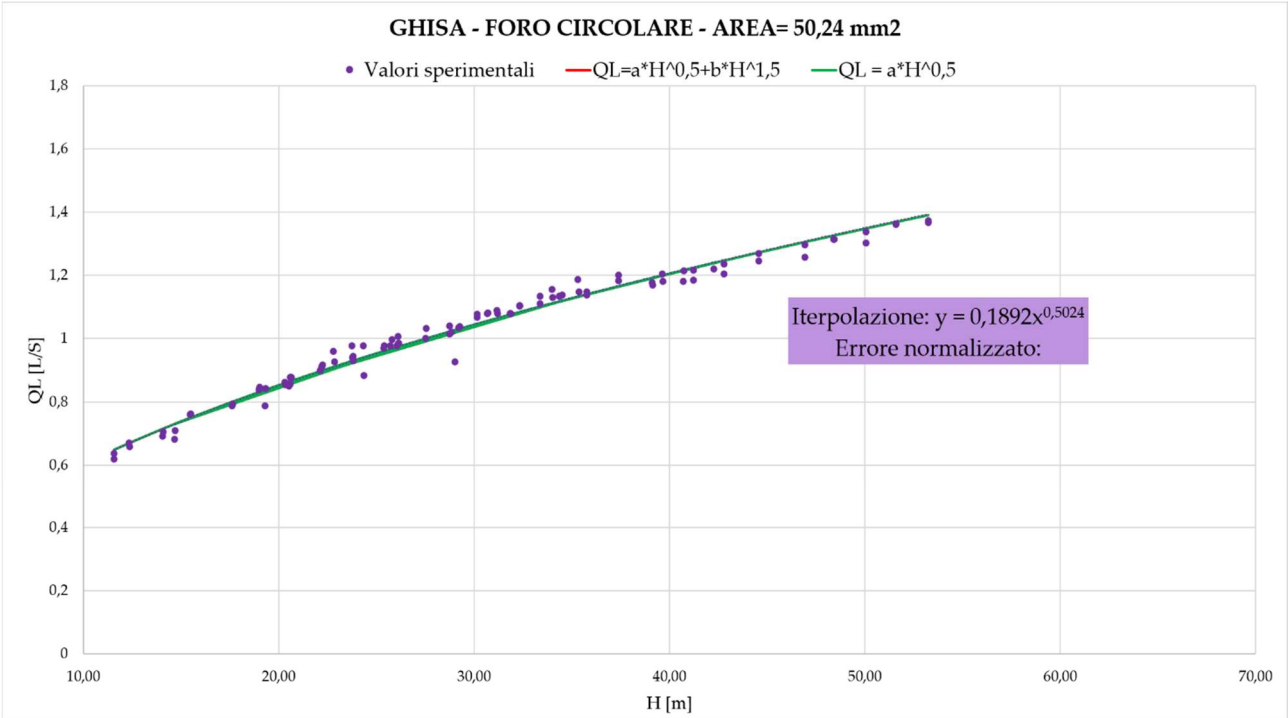


PARAMETRI		STIMA	PARAMETRI		STIMA
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,108843515	$Q_L=aH^b$	a	0,108843515
	b	0,000000000		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,2551	Errore Normazlizzato		0,2551



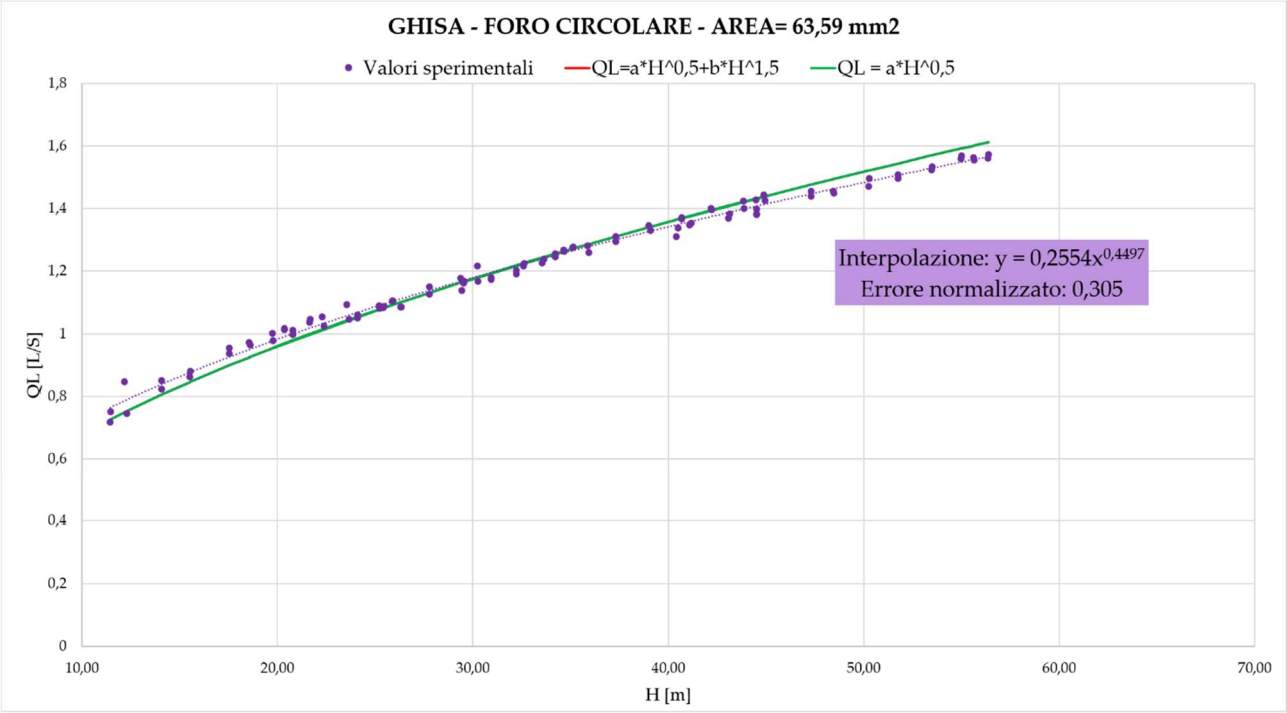
PARAMETRI			STIMA		
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$Q_L=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		

0,150680586	0,000000000	0,2461	0,150680586	0,5	0,2461
-------------	-------------	--------	-------------	-----	--------

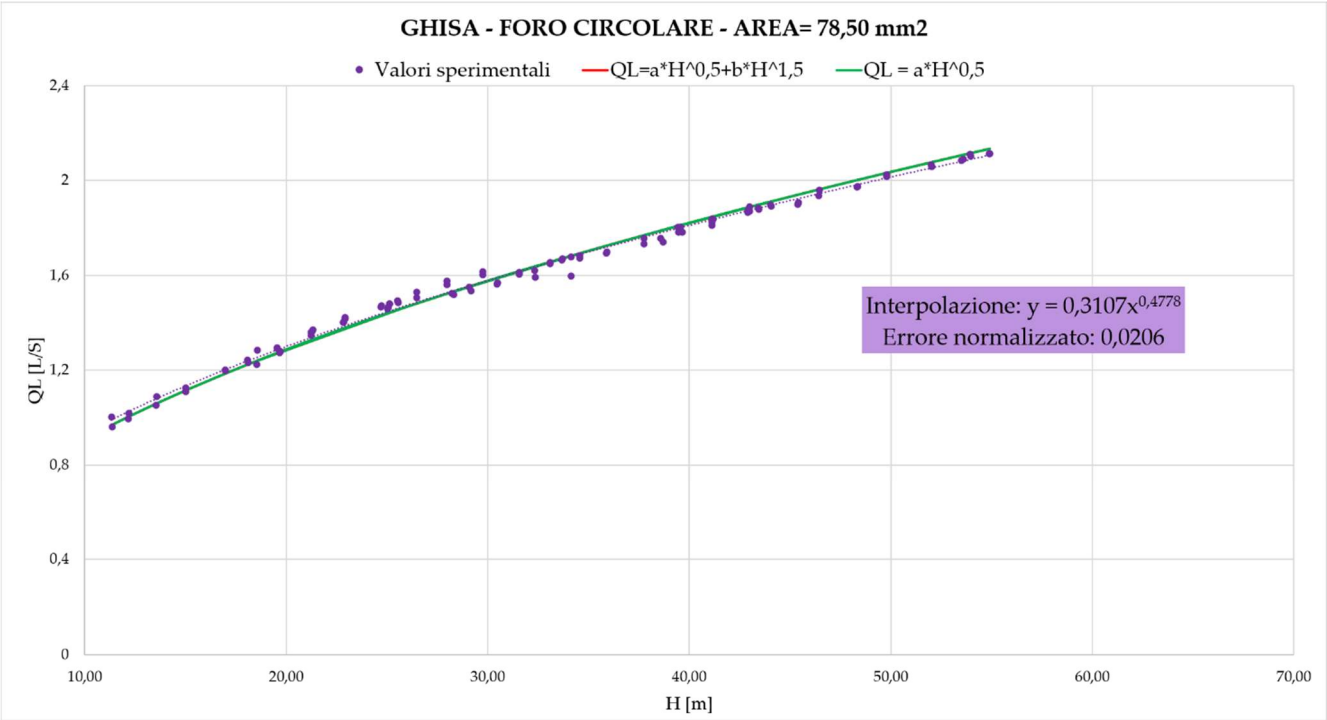


PARAMETRI			STIMA		
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a		$Q_L=aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		

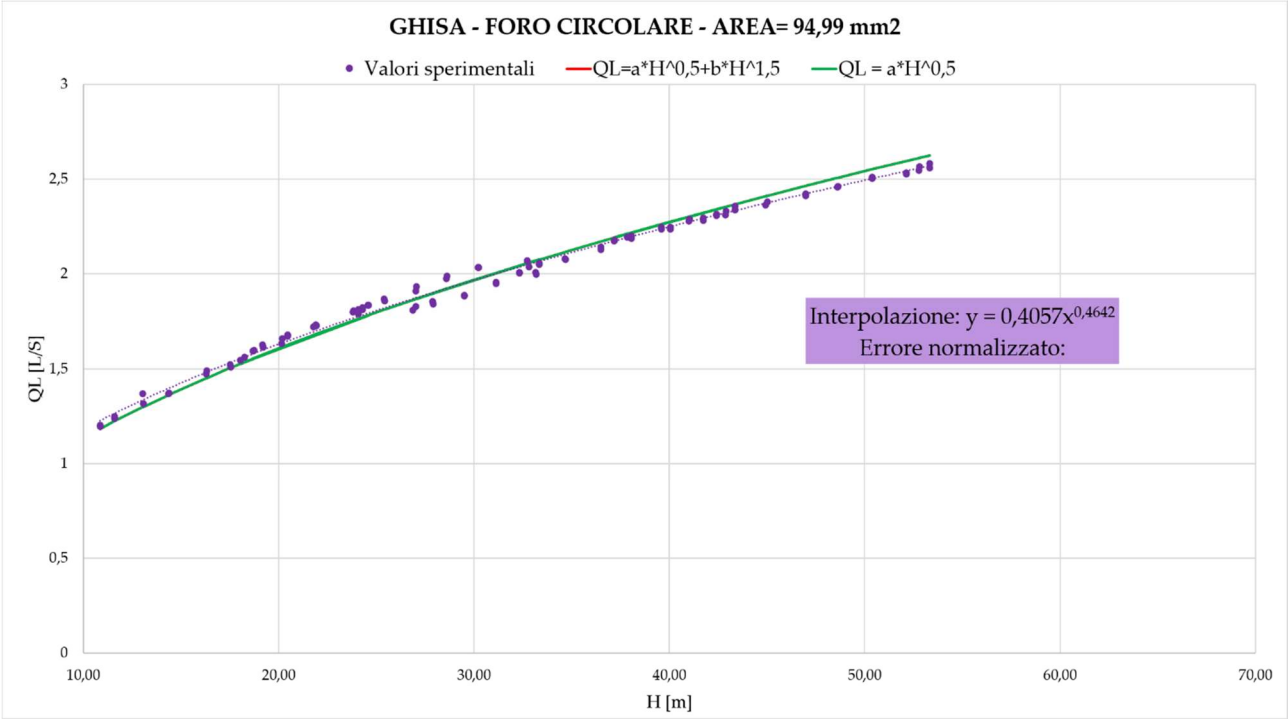
0,190535298	0,000000000	0,0629	0,190535298	0,5	0,0629
-------------	-------------	--------	-------------	-----	--------



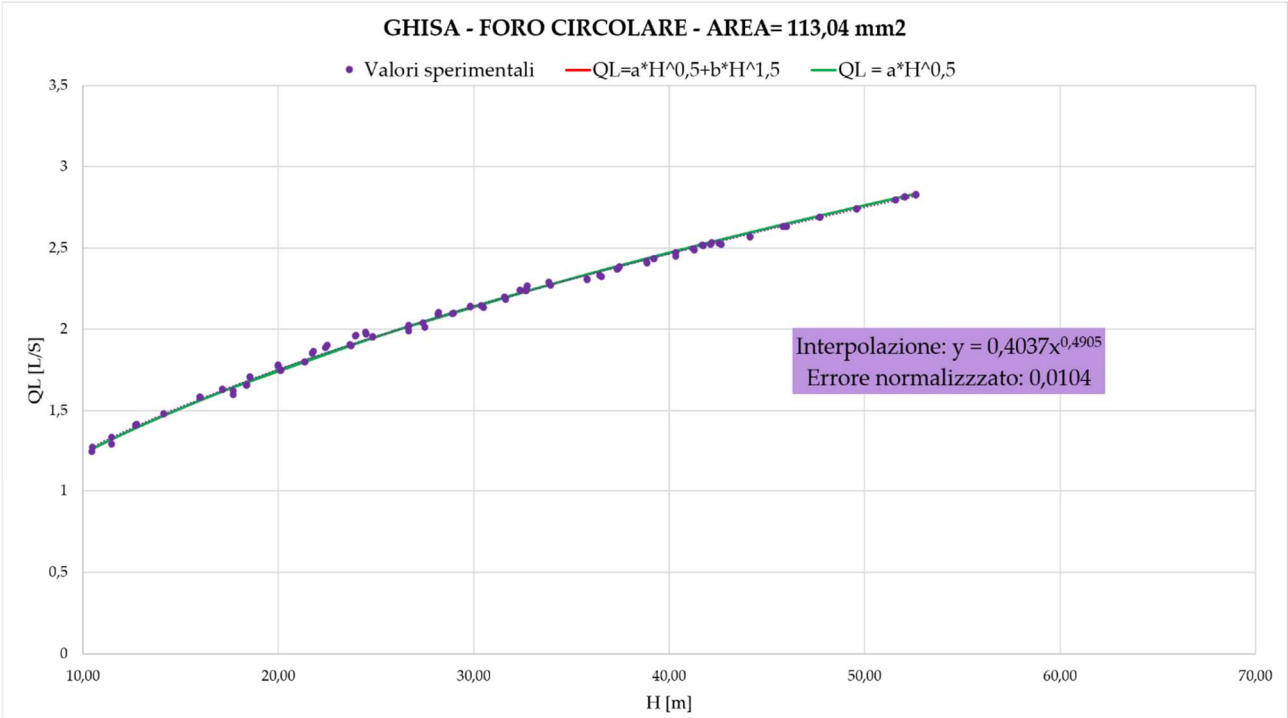
PARAMETRI		STIMA	PARAMETRI		STIMA
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,214644223	$Q_L=aH^b$	a	0,214644223
	b	0,000000000		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0681	Errore Normazlizzato		0,0681



PARAMETRI		STIMA	PARAMETRI		STIMA
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,287959067	$Q_L=aH^b$	a	0,287959067
	b	0,000000000		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0281	Errore Normazlizzato		0,0281

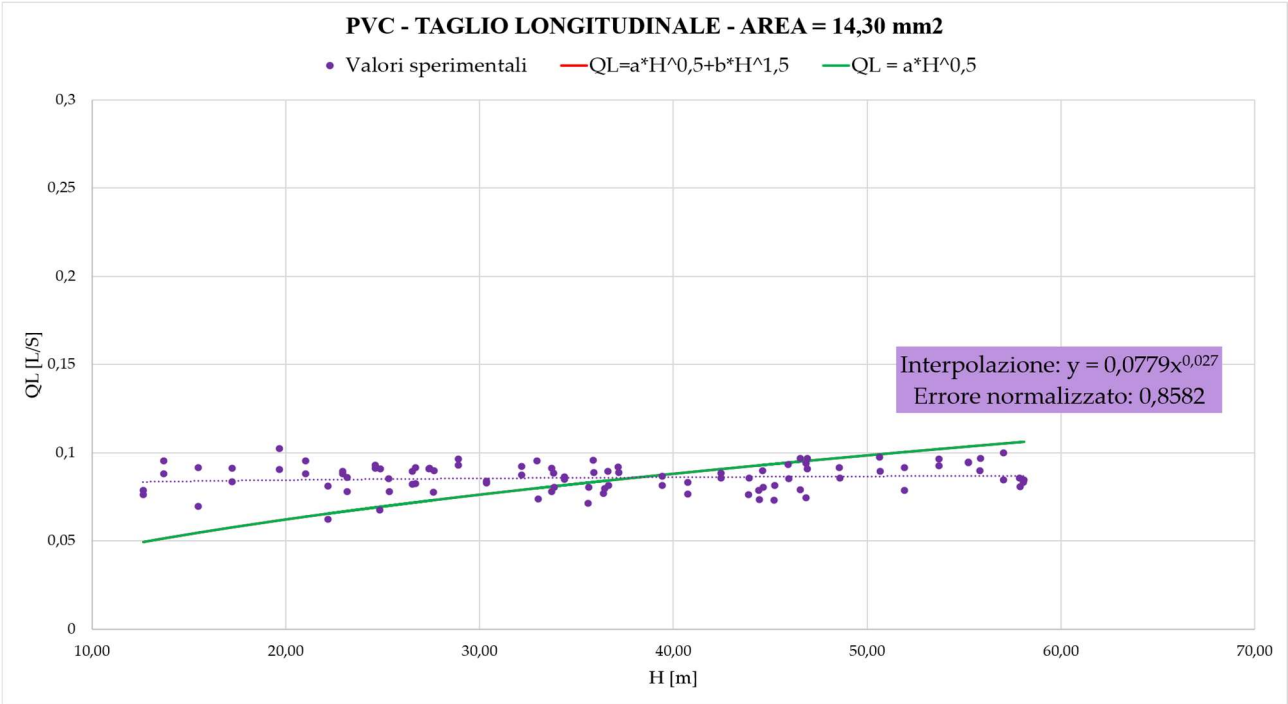


PARAMETRI		STIMA	PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,359405481	$Q_L = aH^b$	a	0,359405481
	b	0,000000000		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0458	Errore Normazlizzato		0,0458



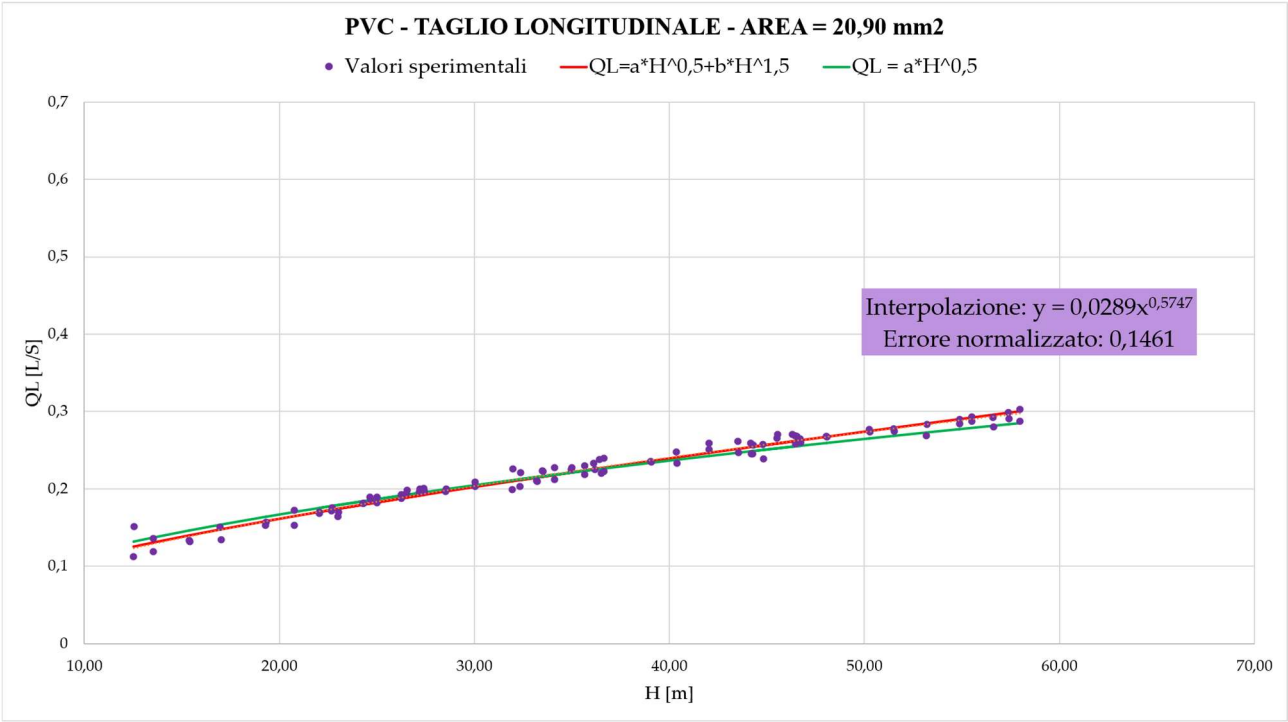
PARAMETRI		STIMA	PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,390896099	$Q_L = aH^b$	a	0,390896099
	b	0,000000000		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0117	Errore Normazlizzato		0,0117

B. Legame perdita-pressione di tubi in PVC e ghisa per tagli longitudinali



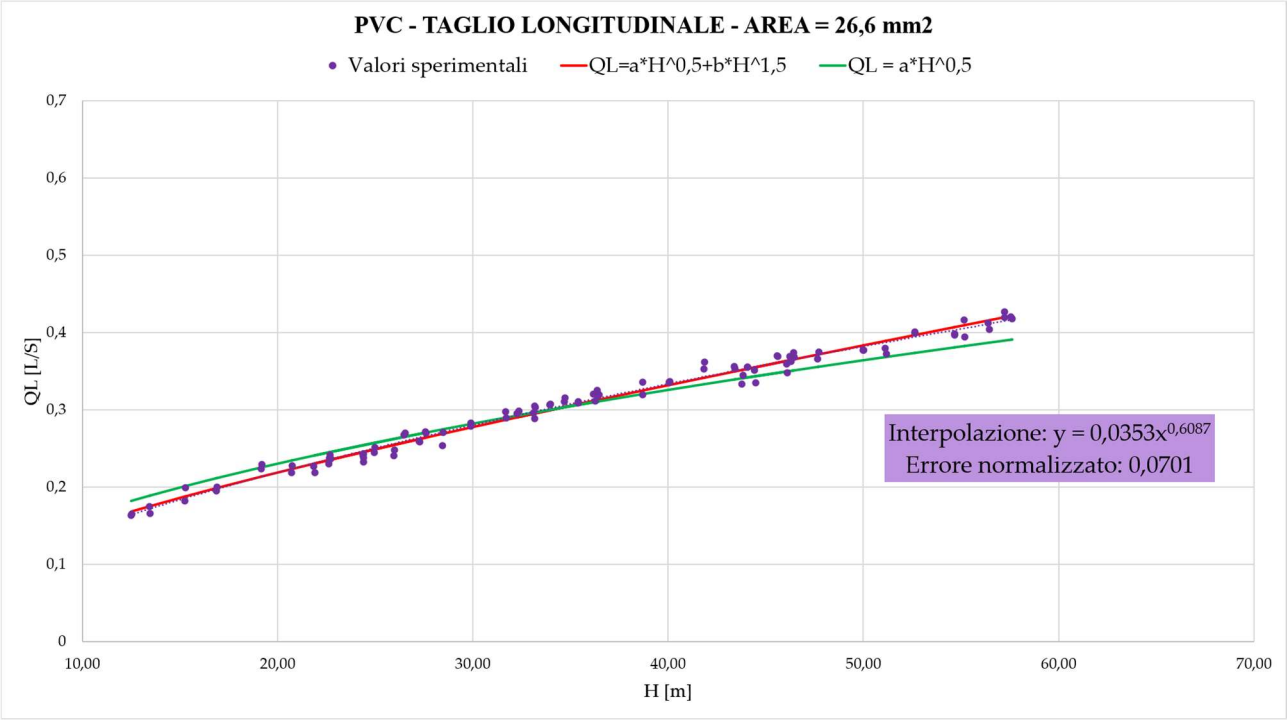
PARAMETRI			STIMA		
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a		$Q_L = aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		

0,013944223	0,013944223
0,000000000	0,5
3,461	3,461

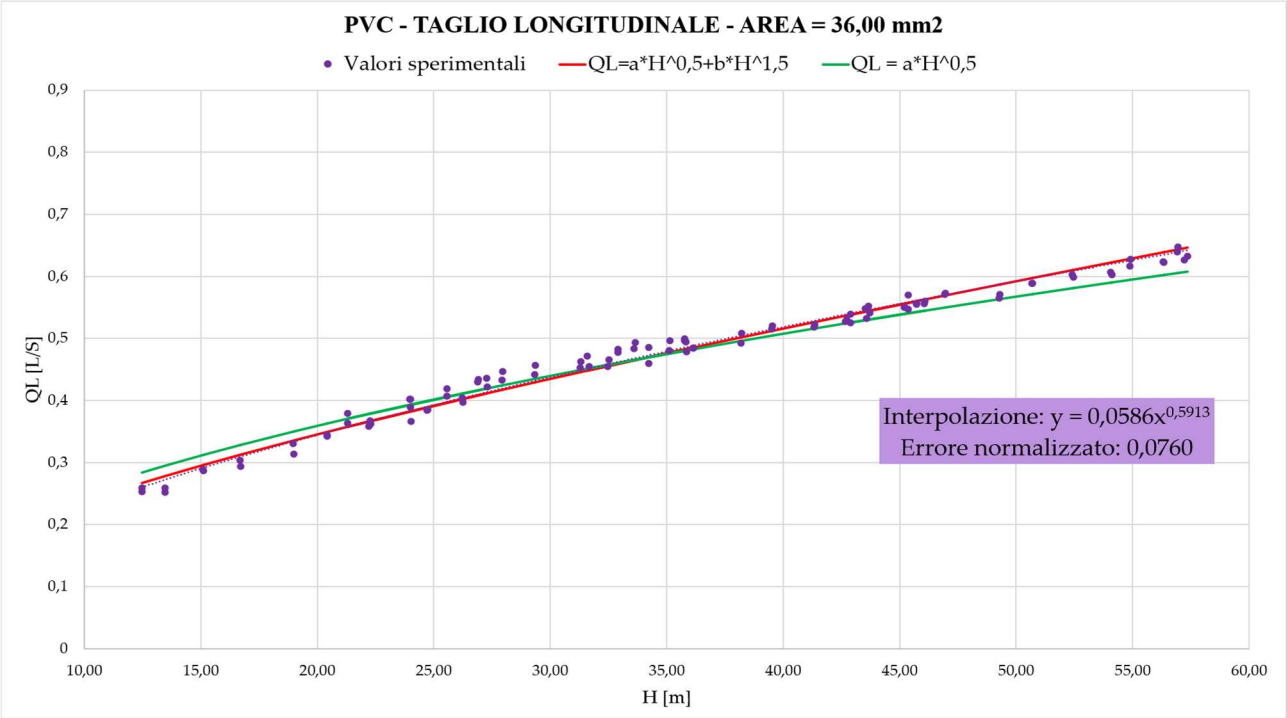


PARAMETRI			STIMA		
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a		$Q_L = aH^b$	a	
	b			b	
Errore Normazlizzato			Errore Normazlizzato		

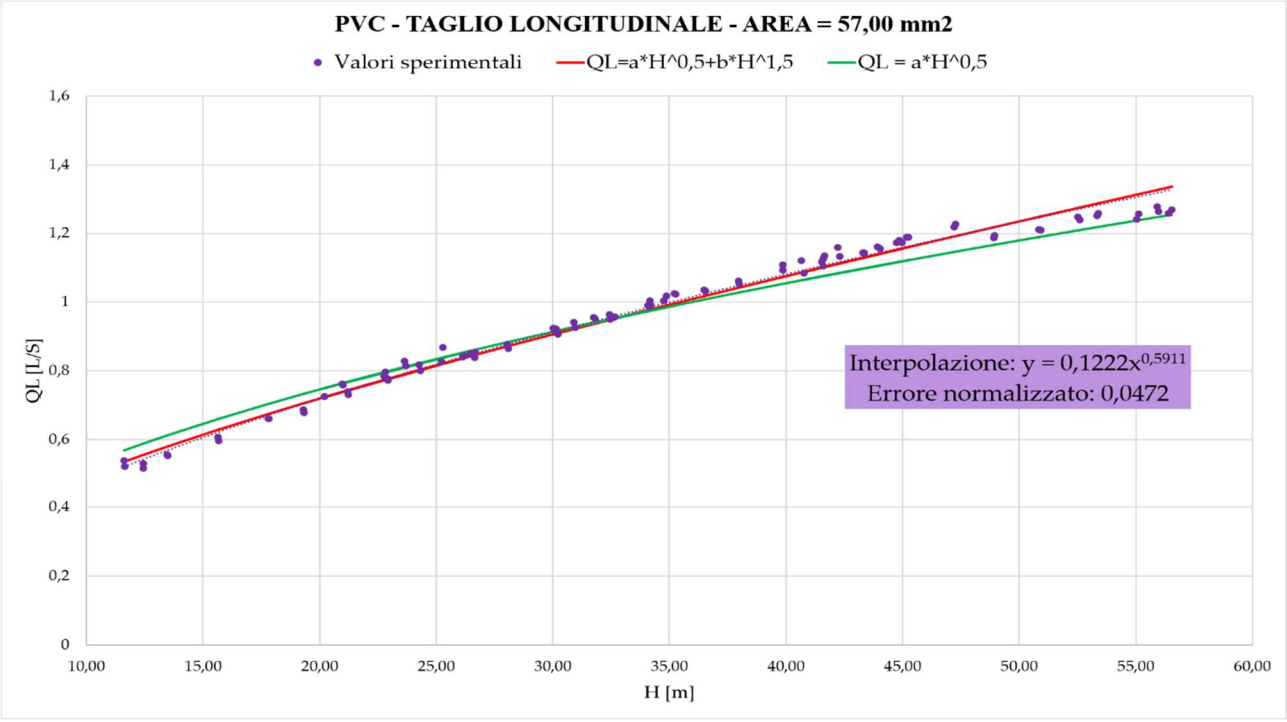
0,034229014	0,037380035
0,000089781	0,5
0,155	0,2431



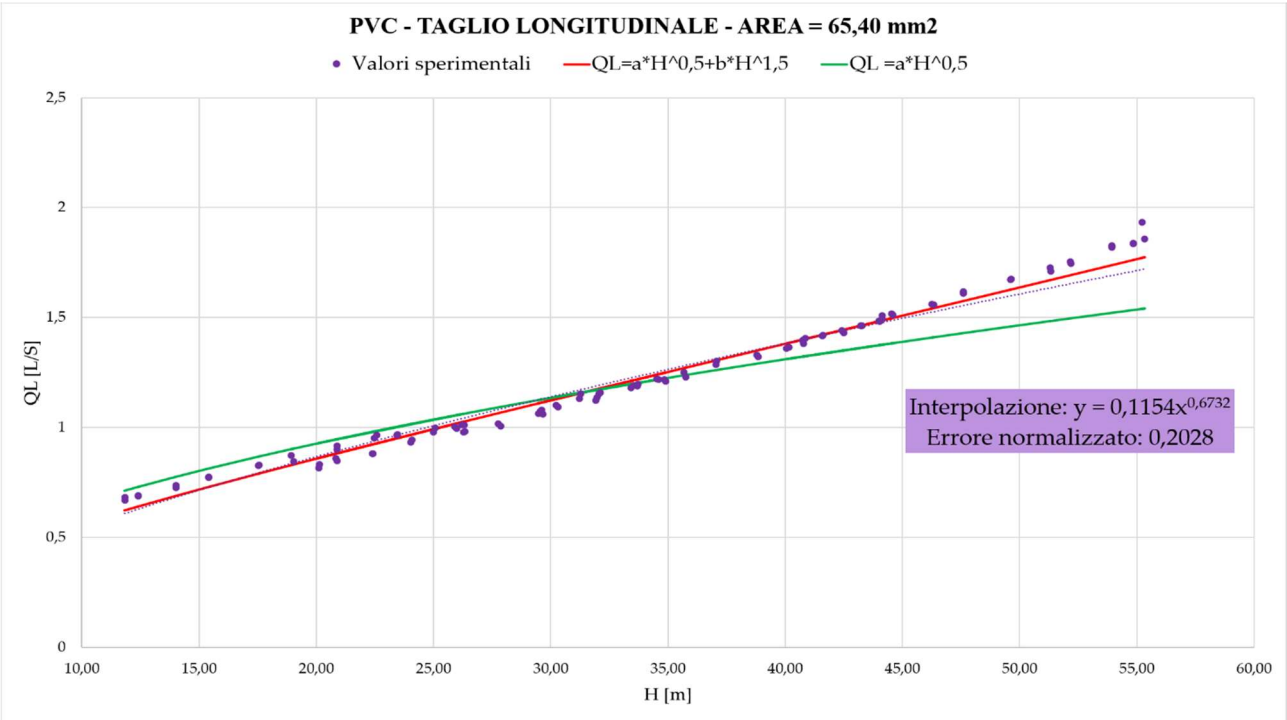
	PARAMETRI		STIMA		PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$				$Q_L = aH^b$			
	a		0,045403653		a		0,051472501
	b		0,000175374		b		0,5
Errore Normazlizzato			0,075	Errore Normazlizzato			0,2488



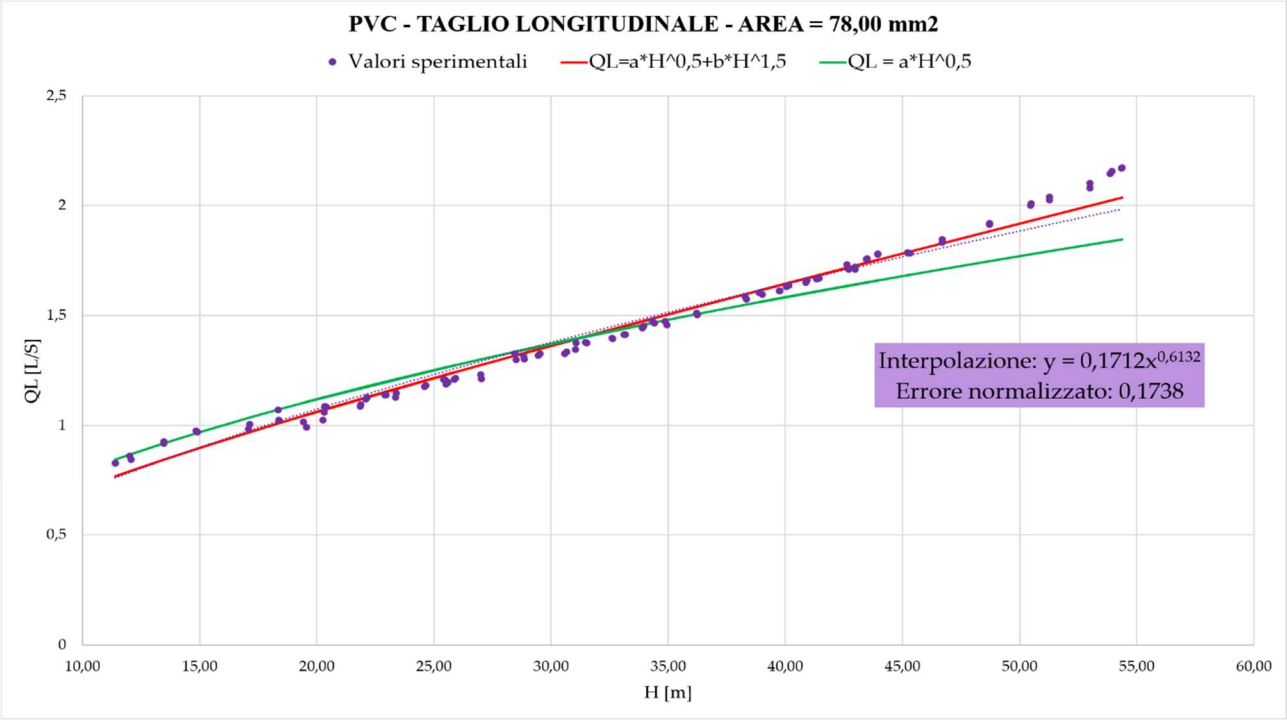
	PARAMETRI		STIMA		PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$				$Q_L = aH^b$			
	a		0,072766032		a		0,080280048
	b		0,000218444		b		0,5
Errore Normazlizzato			0,099	Errore Normazlizzato			0,2111



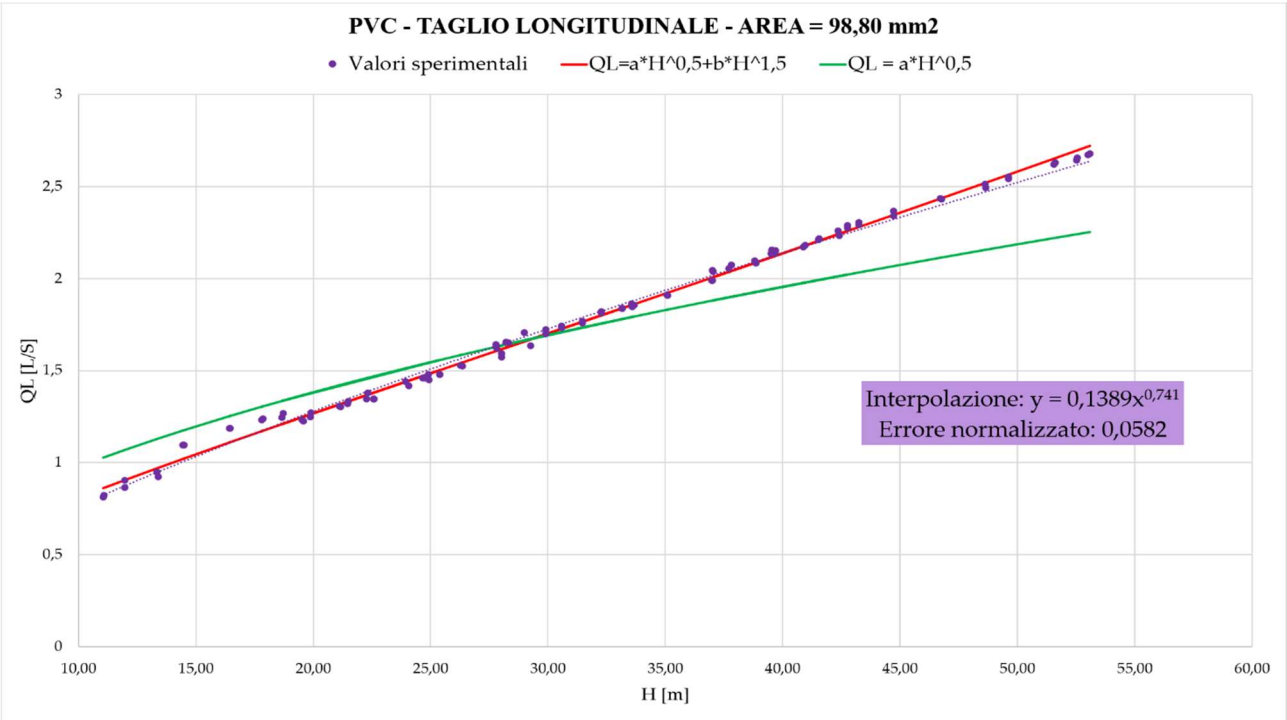
PARAMETRI			PARAMETRI		
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,151453516	$Q_L = aH^b$	a	0,166832744
	b	0,000464860		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,0692	Errore Normazlizzato		0,1845



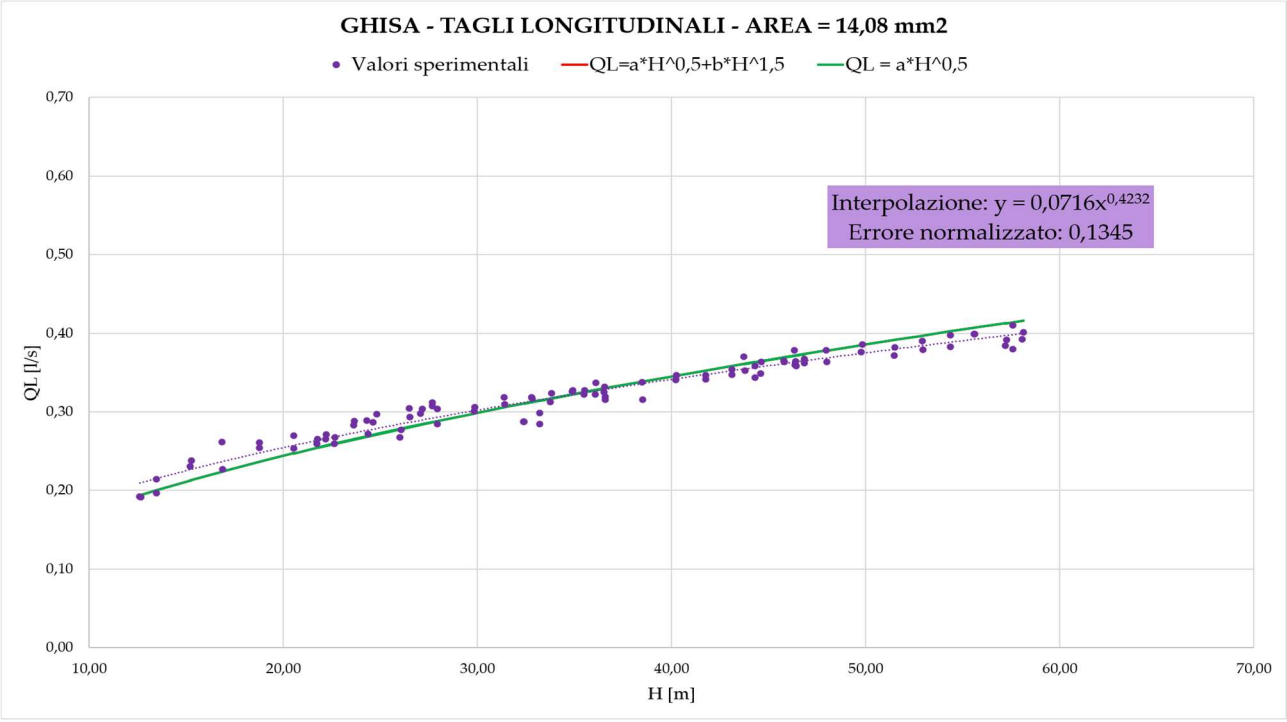
PARAMETRI			PARAMETRI		
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,165422879	$Q_L = aH^b$	a	0,207200667
	b	0,001319499		b	0,5
Errore Normazlizzato		0,1175	Errore Normazlizzato		0,6204



	PARAMETRI	STIMA		PARAMETRI	STIMA
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,215098362	$Q_L=aH^b$	a	0,250494695
	b	0,001124216		b	0,5
	Errore Normazlizzato	0,1123		Errore Normazlizzato	0,3579

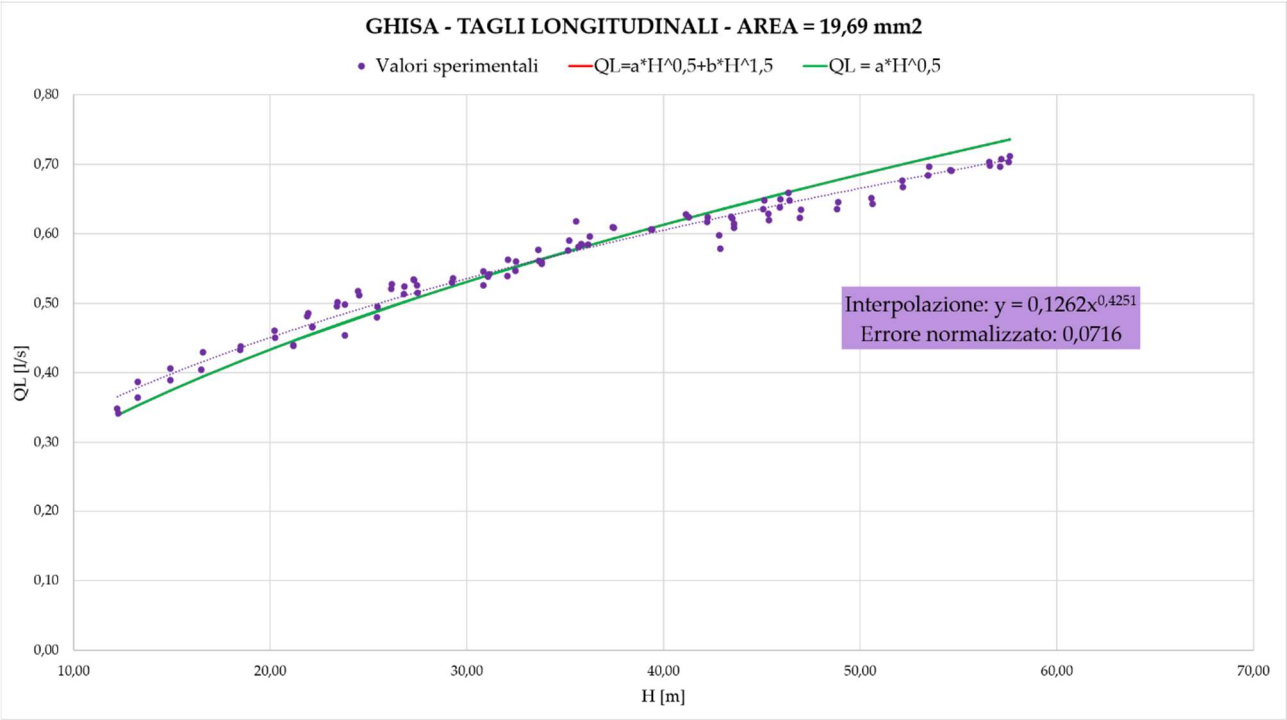


	PARAMETRI	STIMA		PARAMETRI	STIMA
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,229332546	$Q_L=aH^b$	a	0,309051286
	b	0,002710675		b	0,5
	Errore Normazlizzato	0,0486		Errore Normazlizzato	0,9635



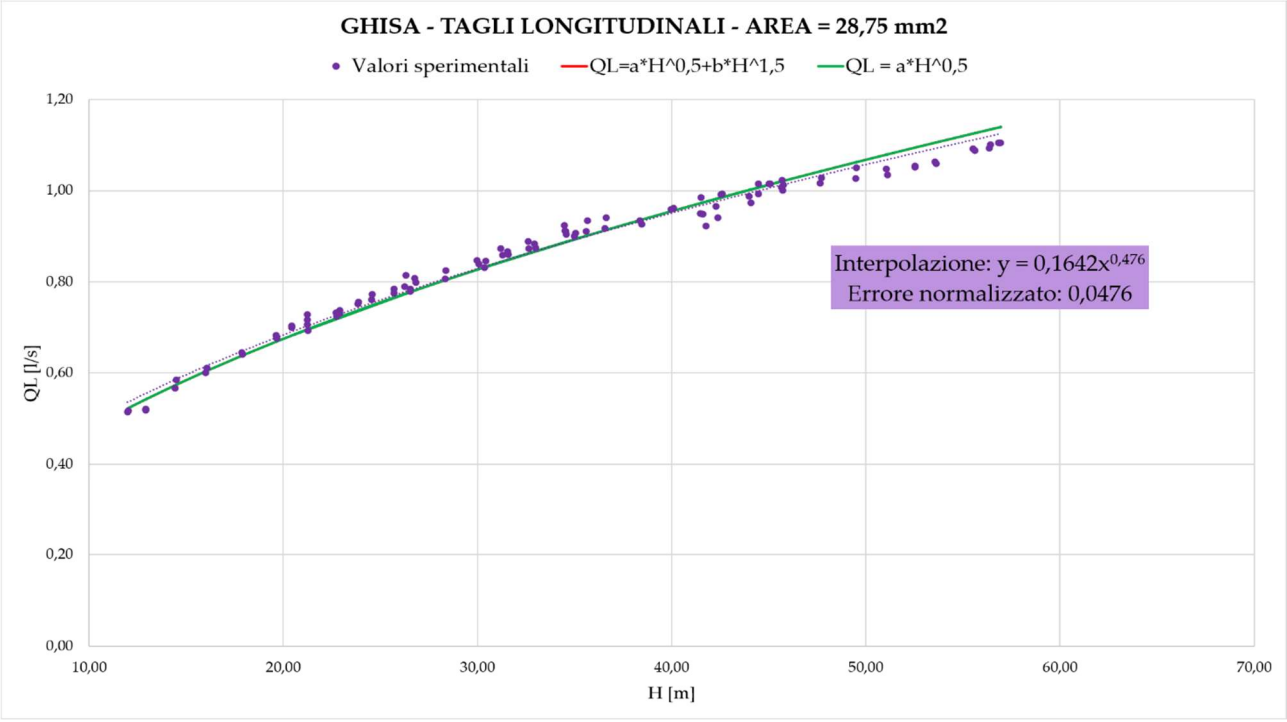
PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,054559783
	b	0,000000000
Errore Normalizzato		0,2139

PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^b$	a	0,054559783
	b	0,5
Errore Normazlizzato		0,2139

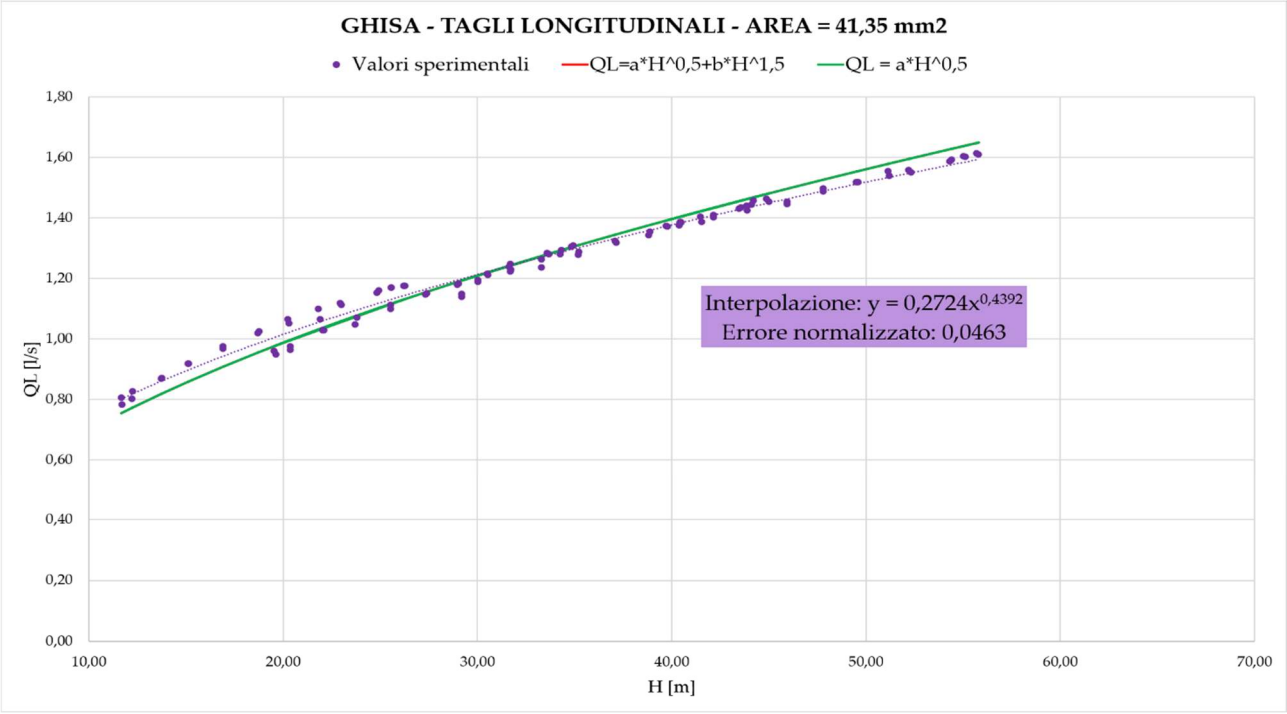


PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	a	0,096923853
	b	0,000000000
Errore Normalizzato		0,1535

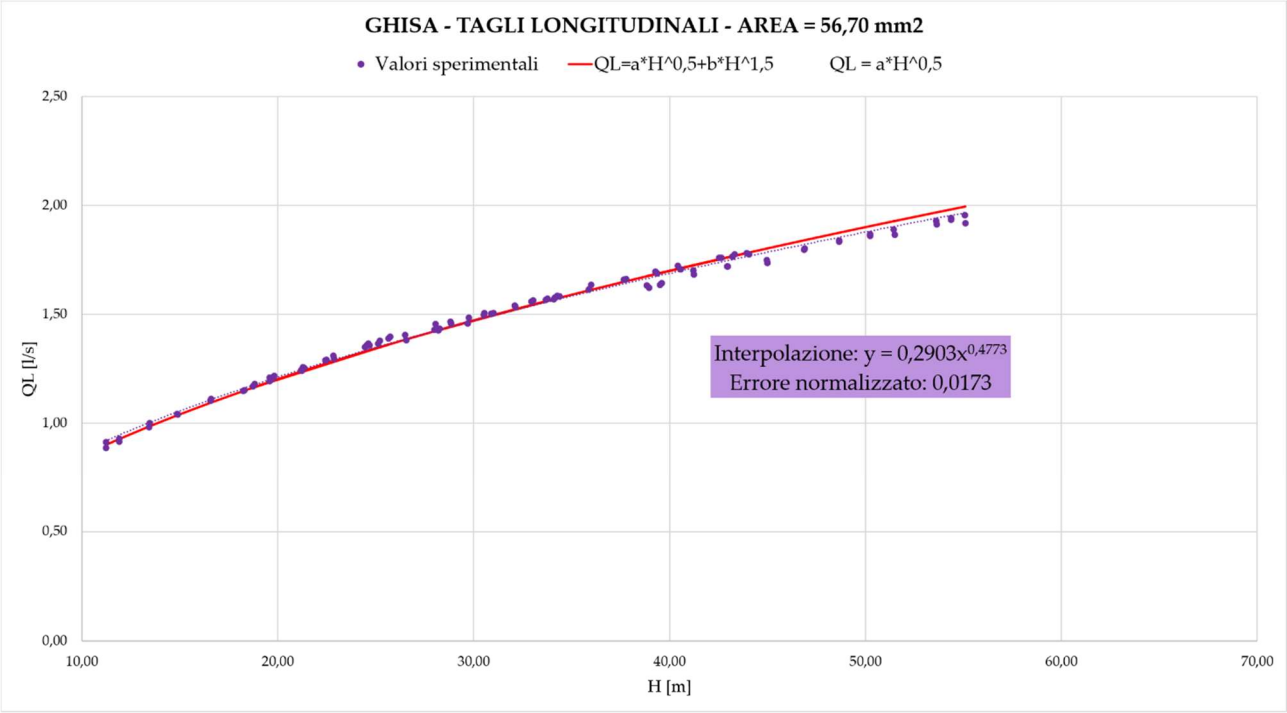
PARAMETRI		STIMA
$Q_L = aH^b$	a	0,096923853
	b	0,5
Errore Normazlizzato		0,1535



PARAMETRI			PARAMETRI		
STIMA			STIMA		
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$			$Q_L=aH^b$		
a	0,151033863		a	0,151033863	
b	0,000000000		b	0,5	
Errore Normalizzato			Errore Normazlizzato		
0,0562			0,0562		



PARAMETRI			PARAMETRI		
STIMA			STIMA		
$Q_L=aH^{0,5}+bH^{1,5}$			$Q_L=aH^b$		
a	0,22085256		a	0,22085256	
b	0,000000000		b	0,5	
Errore Normalizzato			Errore Normazlizzato		
0,1003			0,1003		

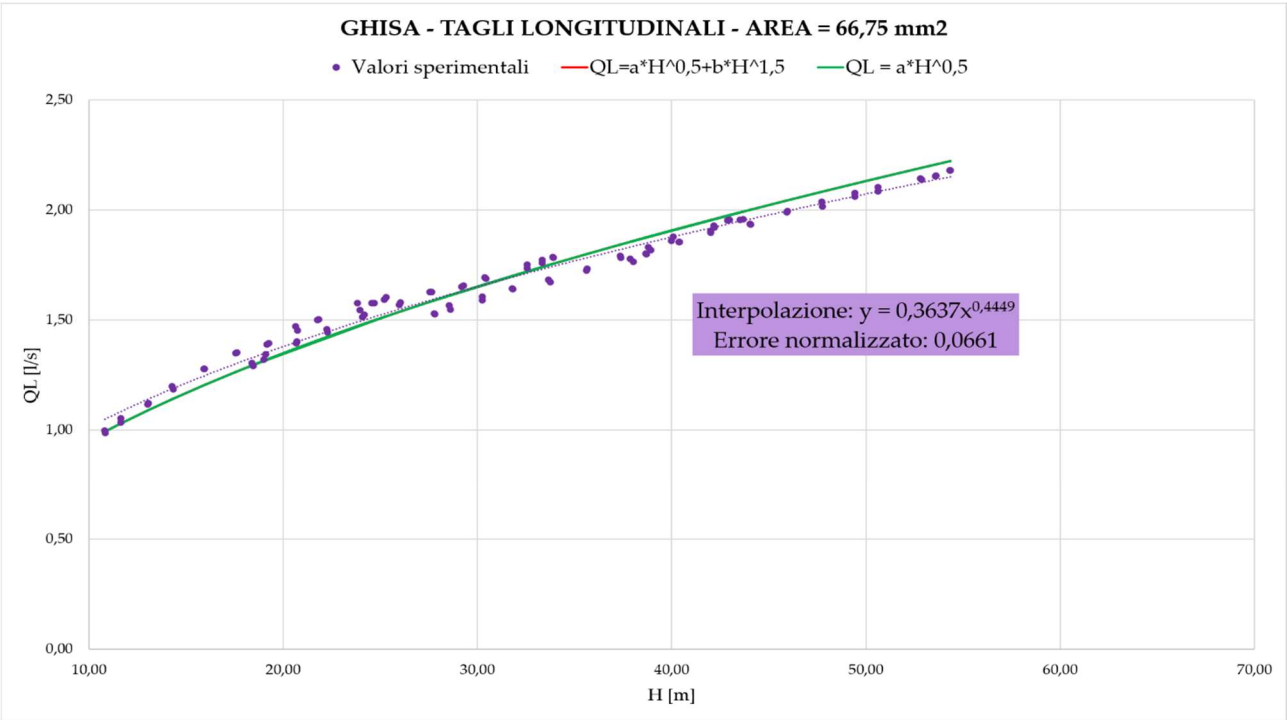


$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$

PARAMETRI	STIMA
a	0,268620059
b	0,000000000
Errore Normalizzato	0,0257

$Q_L = aH^b$

PARAMETRI	STIMA
a	0,268620059
b	0,5
Errore Normazlizzato	0,0257

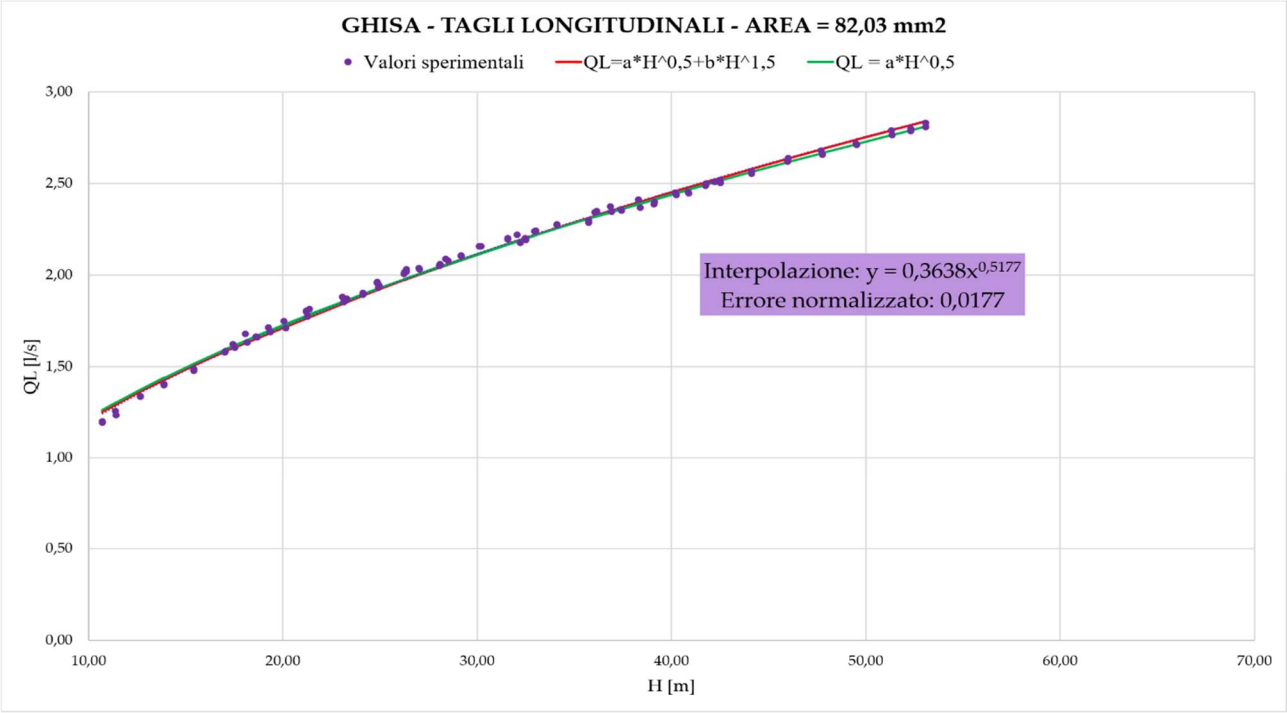


$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$

PARAMETRI	STIMA
a	0,301334879
b	0,000000000
Errore Normalizzato	0,1138

$Q_L = aH^b$

PARAMETRI	STIMA
a	0,301334879
b	0,5
Errore Normazlizzato	0,0661

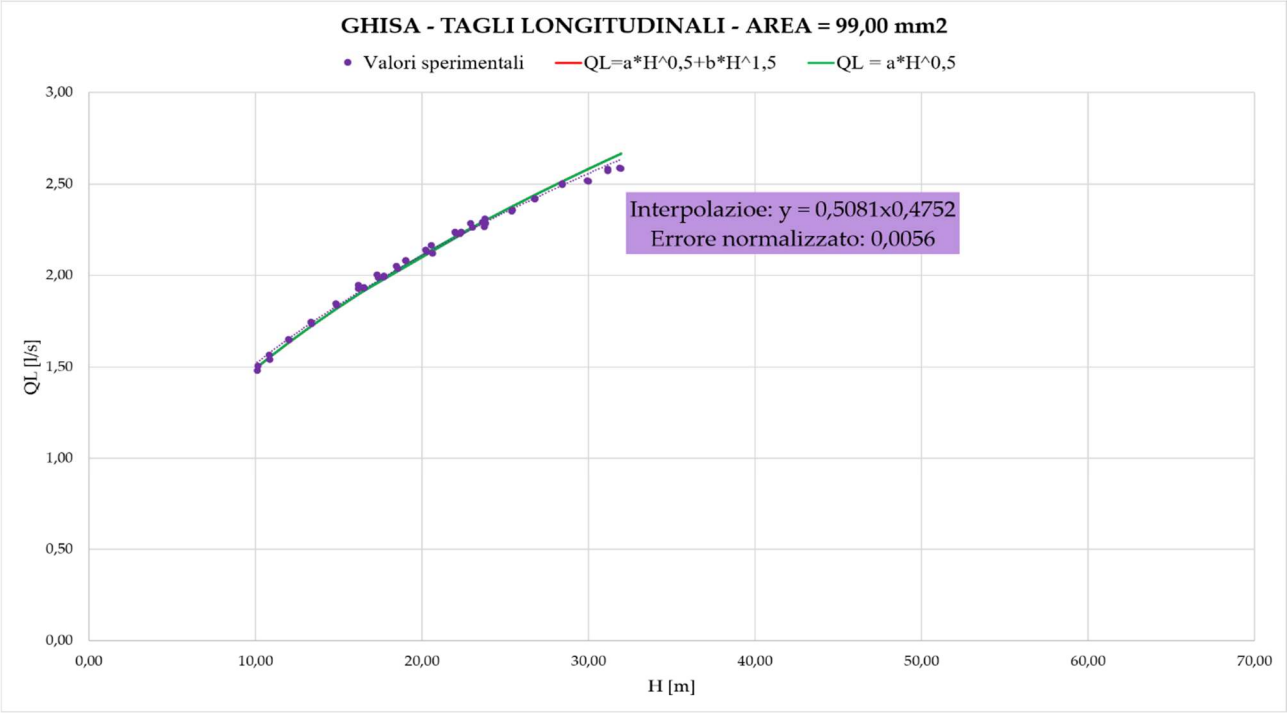


$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$

PARAMETRI	STIMA
a	0,380322498
b	0,000179189
Errore Normalizzato	0,0205

$Q_L = aH^b$

PARAMETRI	STIMA
a	0,385795805
b	0,5
Errore Normazlizzato	0,0233



$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$

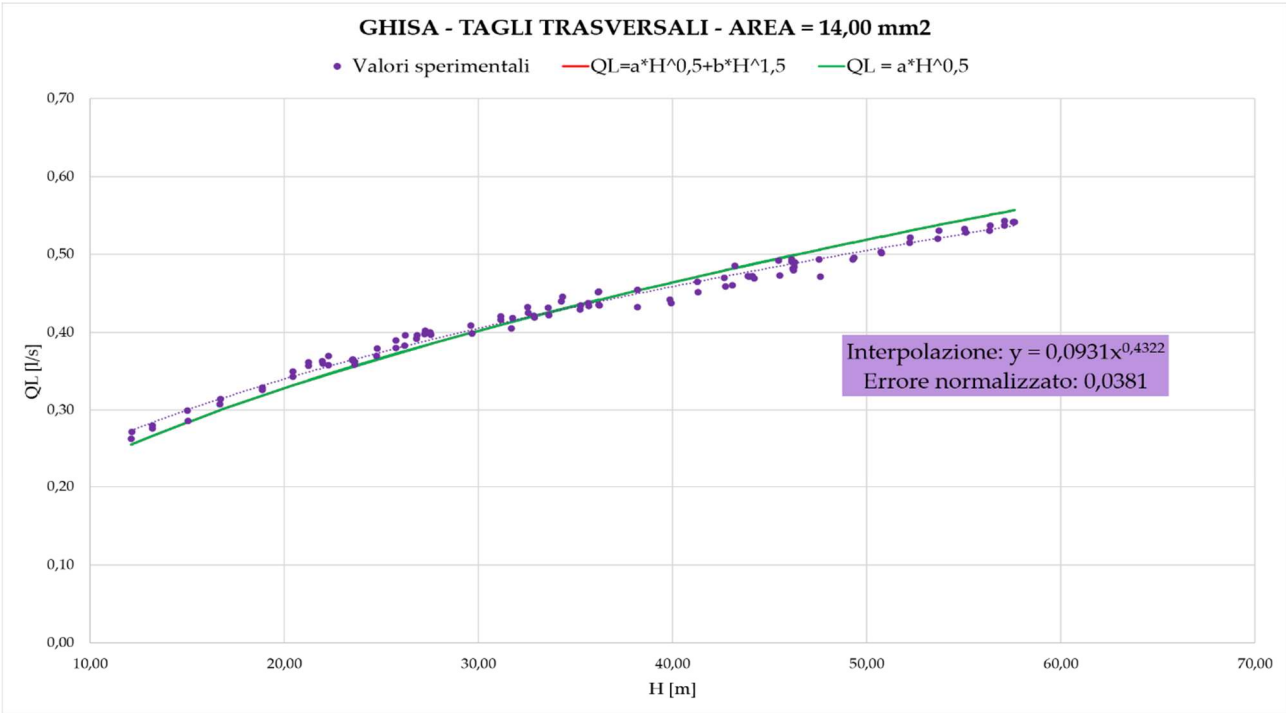
PARAMETRI	STIMA
a	0,471790933
b	0,000000000
Errore Normalizzato	0,0086

$Q_L = aH^b$

PARAMETRI	STIMA
a	0,471790933
b	0,5
Errore Normazlizzato	0,0086

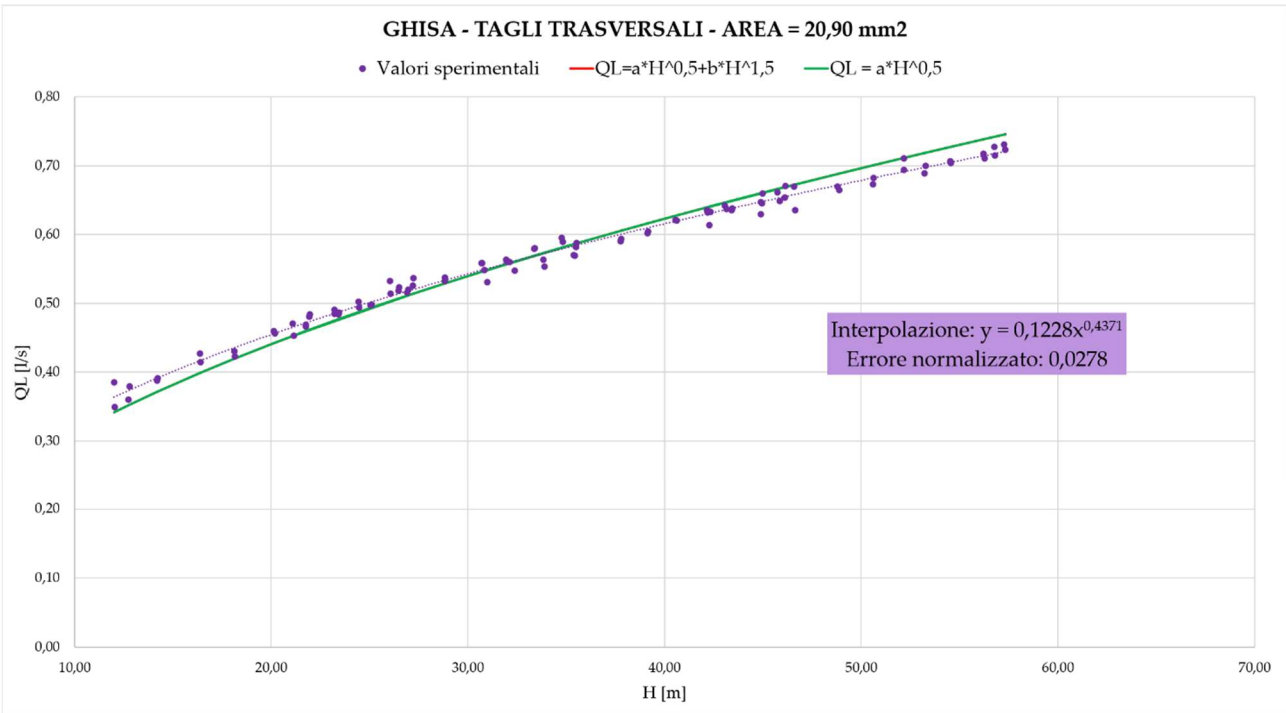
Quest'ultima non è conclusa in quanto il volume perso superava la capienza del recipiente

c. Legame perdita-pressione di tubi in PVC e ghisa per tagli trasversali



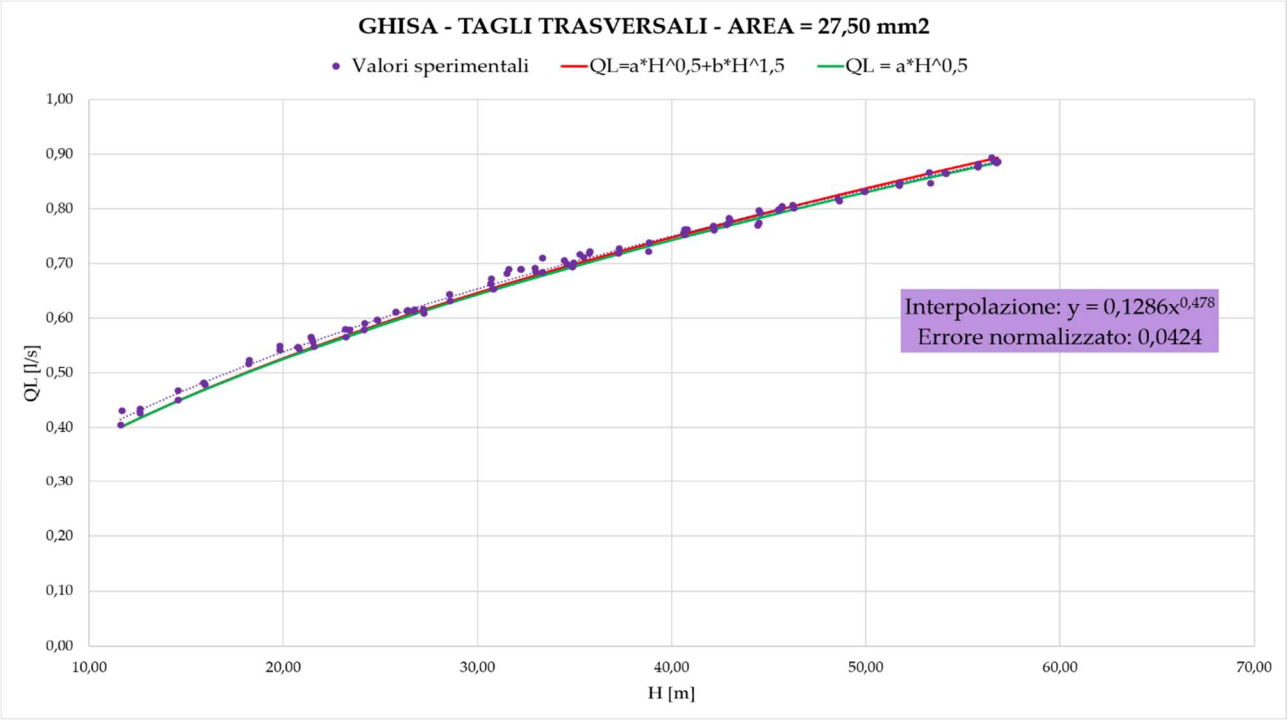
$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	PARAMETRI		STIMA
	a		0,073368542
	b		0,000000000
Errore Normalizzato			0,1065

$Q_L = aH^b$	PARAMETRI		STIMA
	a		0,073368542
	b		0,5
Errore Normazlizzato			0,1065

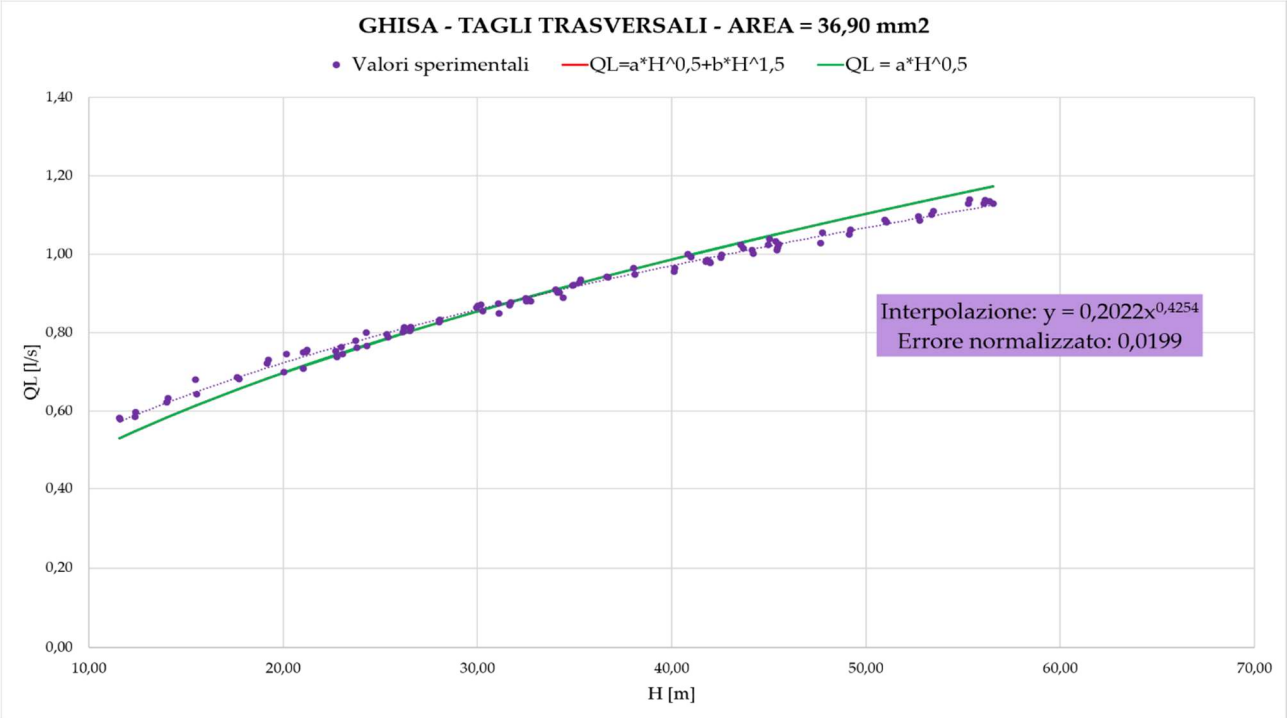


$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	PARAMETRI		STIMA
	a		0,098525405
	b		0,000000000
Errore Normalizzato			0,0864

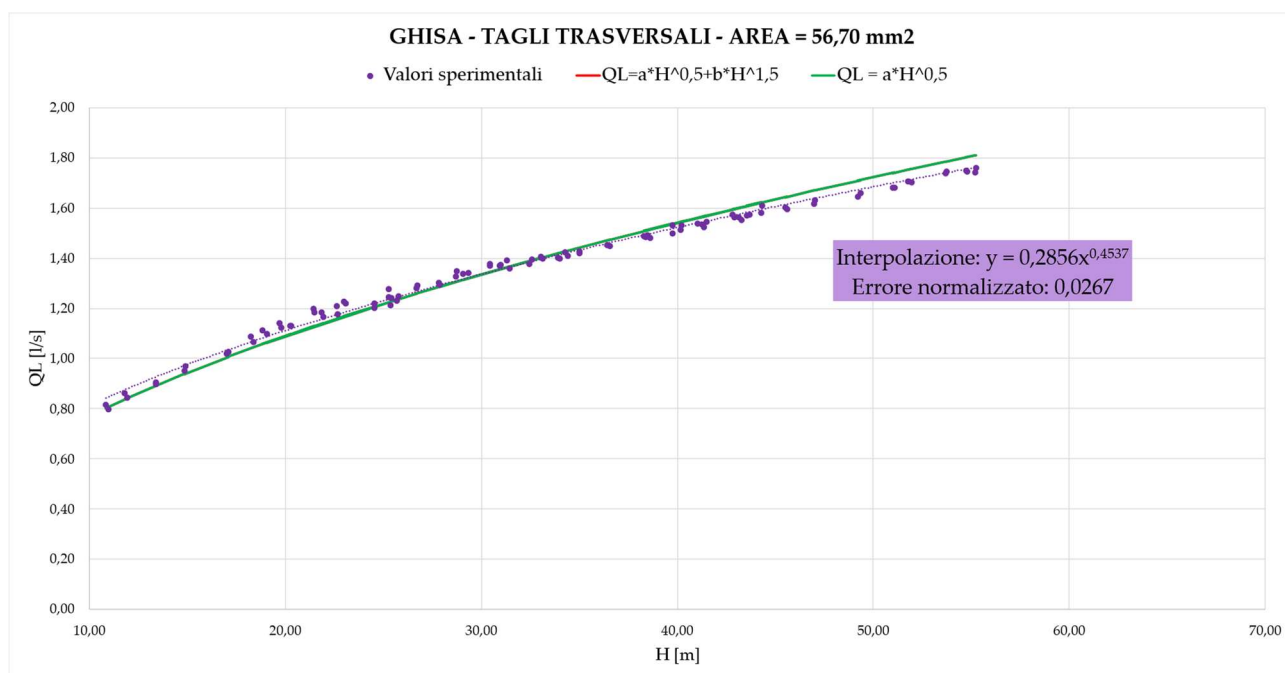
$Q_L = aH^b$	PARAMETRI		STIMA
	a		0,098525405
	b		0,5
Errore Normazlizzato			0,0864



PARAMETRI			PARAMETRI		
$QL=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,117429288	$QL=aH^b$	a	0,117429589
	b	0,000019429		b	0,5
Errore Normalizzato		0,0321	Errore Normazlizzato		0,0409



PARAMETRI			PARAMETRI		
$QL=aH^{0,5}+bH^{1,5}$	a	0,156035244	$QL=aH^b$	a	0,156035244
	b	0,000000000		b	0,5
Errore Normalizzato		0,1035	Errore Normazlizzato		0,1035



$Q_L = aH^{0,5} + bH^{1,5}$	PARAMETRI		STIMA	$Q_L = aH^b$	PARAMETRI		STIMA
	a	b	0,243688895		a	b	0,243688895
			0,000000000				0,5
Errore Normalizzato			0,0607	Errore Normazlizzato			0,0607

Le prove sulla ghisa con tagli trasversali terminano qui. Non è stato possibile concludere le prove dato che in condizioni di impianto chiuso la linea secondaria si riempiva di aria alterando i dati raccolti e rendendoli inutilizzabili

11. Bibliografia e sitografia

- Balocchi, A. (2023, Febbraio 2). *Perdite idriche: Italia ed Europa fanno acqua da tutte le parti*. Tratto da Wisesociety.it: <https://wisesociety.it/ambiente-e-scienza/perdite-idriche-in-italia-e-europa-dati/>
- AM Cassa, J. V. (2013, Luglio 31). MODELING ELASTICALLY DEFORMING LEAKS IN WATER. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Degl'Innocenti, A. (11 Ottobre 2024). *Perdite idriche: in Italia gli acquedotti disperdono il 40% dell'acqua che trasportano*. Milano: Laboratorio REF ricerche. Tratto da <https://laboratorioref.it/perdite-idriche-in-italia-gli-acquedotti-disperdono-il-40-dellacqua-che-trasportano/>
- EurEau. (2020). *The governance of water services in Europe*. Brussels, Belgium: The European Federation of National Associations of Water.
- Iren. (2025, Marzo 4). *P come Perdite idriche: che cosa sono, come contrastarle e l'esempio virtuoso di Iren*. Tratto da Gruppo Iren: <https://www.gruppoiren.it/it/everyday/abcircular/2025/p-come-perdite-idriche-cosa-sono-come-contrastarle-e-l-esempio-virtuoso-di-iren.html#:~:text=Le%20cause%20delle%20perdite%20idriche%20e%20il,terreno%20possono%20influire%20sull'integrit%C3%A0%20delle%2>
- ISTAT. (2025, marzo 21). *LE STATISTICHE SULL'ACQUA | ANNI 2020-2024*. Tratto da ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica): [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/03/Report-Statistiche-sullacqua_Anni-2020-2024.pdf](https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/03/Report-Statistiche-sullacqua_Anni-2020-2024.pdf)
- Barbara Milici, Mauro. De Marchis (2019, Gennaio 2). *Effect of the Shape and Size Cracks*. Tratto da Springer Nature: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2173-4>

Ringraziamenti

Desidero ringraziare in primo luogo la mia relatrice, la Chiar.ma prof.ssa Giovanna Darvini, per avermi concesso l'opportunità di sviluppare questo progetto di ricerca sperimentale guidandomi e offrendomi spunti di riflessione determinanti;

Ringrazio sentitamente il mio correlatore Prof. Ing. Luciano per avermi supportato con grande competenza nella fase di elaborazione dei dati e un ringraziamento altrettanto sentito alla mia relatrice Ing. Martina Gambadori per la costante presenza durante i test sperimentali, per la disponibilità e per l'aiuto pratico fondamentale nel superare i problemi riscontrati permettendomi di portare a termine con successo lo studio sperimentale;

Un ringraziamento al personale di laboratorio, in particolare all' Ing. Giacomo Trozi, per il supporto pratico e per l'aiuto nella calibrazione degli strumenti;

Un ringraziamento profondo va a mia mamma Tiziana e a mio papà Stefano che mi hanno sostenuto in ogni scelta rendendo possibile questo traguardo, a mio fratello Luca per avermi avvertito e messo in guardia sin dall'inizio sul percorso intrapreso e sulle sue difficoltà;

Un grazie dal profondo del cuore ai miei nonni, in particolare a Bruno e Silvana, che mi sono stati a fianco in ogni momento sostenendomi e incoraggiandomi in ogni modo;

Grazie ai miei amici, al gruppo Rocce, con cui ho condiviso successi e sconfitte, i quali sono stati sempre capaci di offrirmi momenti di svago e risate (ci sarebbe da scrivere una pagina per ciascuno);

Grazie ai miei compagni di corso con cui è stato possibile condividere le difficoltà e affrontarle insieme, sdrammatizzare i momenti più tesi e passare insieme qualche serata;

Un grazie alla Muay Thai che in questi tre anni è stato molto più di uno sport, di un semplice svago, ma un vero e proprio percorso parallelo di crescita personale e di forza mentale. Oss...

Infine, tengo molto a ringraziare, me stesso, in quanto nonostante tutte le difficoltà incontrate sono riuscito con interesse e determinazione a concludere questo percorso, aprendomi molteplici possibilità per il futuro.