COMMITTENTE

RFI
RETE FERROVIARIA ITALIANA
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

PROGETTAZIONE:

ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

## DIREZIONE TECNICA

## S.O. GEOLOGIA TECNICA

# PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

**POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA**

**RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-CASTELPLANIO**

**Lotto 2**

# GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA

Report prova di pompaggio Pozzo La Cuna

SCALA: -

| COMMESSA | LOTTO | FASE | ENTE | TIPO DOC. | OPERA/DISCIPLINA | PROGR. | REV. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| IR0P | 02 | R | 69 | RH | GE0002 | 002 | A |

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | Emissione esecutiva | G. Bernagozzi | Ott. 2022 | F. M. Carli | Ott. 2022 | C. Urciuoli | Ott. 2022 | M. Comedini Ott. 2022 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

ITALFERR Dott. Geol. Massimo Comedini Ordine dei Geologi del Lazio n° 203

| File doc.: IR0P02R69RHGE0002002A | | n. Elab.: |
|---|---|---|

## INDICE

**1 PREMESSA ..... 3**

**2 DESCRIZIONE DELLA PROVA ..... 4**

**3 CURVA CARATTERISTICA ..... 8**

**4 INTERPRETAZIONE DEGLI ABBASSAMENTI NEL PIEZOMETRO ..... 14**

**5 CONCLUSIONI ..... 14**

**6 BIBLIOGRAFIA ..... 16**

## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1. DATI SINTETICI DELLA PROVA A GRADINI. 6

TABELLA 2. DATI RICAVATI DALLA PROVA A GRADINI. 9

TABELLA 3. RELAZIONE TRA COEFFICIENTE DI PERDITA DEL POZZO C E CONDIZIONI DEL POZZO. **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

TABELLA 4. FORMULA APPROSSIMATA PER IL CALCOLO DELLA TRASMISSIVITÀ T. 13

## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1. OPERA DI CAPTAZIONE DELL'ATTUALE POZZO LA CUNA. ..... 3

FIGURA 2. UBICAZIONE DELL'ATTUALE POZZO RISPETTO ALL'IMPRONTA DEL FUTURO RILEVATO FERROVIARIO (VERDE CHIARO) ..... 4

FIGURA 3. UBICAZIONE DEI PUNTI DI PROVA E CONTROLLO RISPETTO ALL'ATTUALE POZZO LA CUNA. ..... 5

FIGURA 4. SCHEMA DELLA DISPOSIZIONE PLANIMETRICA DEL PIEZOMETRO SOGGETTO A PROVA DI POMPAGGIO (LCB1) E DEL VICINO PIEZOMETRO DI CONTROLLO LCB. ..... 5

FIGURA 5. ABBASSAMENTI REGISTRATI NEL PIEZOMETRO TESTATO E NEL VICINO PIEZOMETRO LCB COMPARATI CON LE PORTATE ESTRATTE NEL CORSO DELLA PROVA. ..... 7

FIGURA 6. A SINISTRA: POMPA USATA NEL CORSO DELLA PROVA A GRADINI DI PORTATA. A DESTRA CONTALITRI E SARACINESCA DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA ..... 8

FIGURA 7. ABBASSAMENTI MISURATI AL TERMINE DI CIASCUN GRADINO DI PORTATA. ..... 9

FIGURA 8. RETTA PORTATE/ABBASSAMENTI SPECIFICI PER LA STIMA DEI PARAMETRI B E C DELLA CURVA CARATTERISTICA. 11

FIGURA 9 . GRAFICO PORTATE/ABBASSAMENTI. IN BLU: CURVA CARATTERISTICA TEORICA DEL PIEZOMETRO RICAVATA DALLA EQUAZIONE DI JACOB [1]; IN ROSSO: OSSERVAZIONI SPERIMENTALI. ..... 12

FIGURA 10. DETERMINAZIONE DELLA PORTATA CRITICA $Q_C$ MEDIANTE IL METODO DEL GRAFICO $Q^2/D_H$ VS. Q. ..... 13

FIGURA 11. CONFRONTO TRA GLI ABBASSAMENTI OSSERVATI (PUNTI) E QUELLI SIMULATI (LINEA CONTINUA) PER LA PROVA A GRADINI DI PORTATA SUI PIEZOMETRI LCB1 ED LCB MEDIANTE IL SOFTWARE MLU. ..... 14

# 1 PREMESSA

Il presente documento illustra le risultanze e le metodologie relative alla prova a gradini di portata eseguita nell'ambito del progetto di delocalizzazione del pozzo La Cuna (Figura 1), attualmente ubicato in un'area che ricadrà entro l'impronta del nuovo rilevato ferroviario (Figura 2). Il progetto di delocalizzazione della risorsa idrica prevede inoltre l'esecuzione, nell'area, di un secondo pozzo (le cui caratteristiche sono trattate in apposite relazioni idrogeologiche di marzo 2019 e 2020 commissionate da Vivservizi SpA) al fine di sfruttare in maniera più proficua la concessione di prelievo attualmente in vigore e pari a 15 l/s.

**Figura 1. Opera di captazione dell'attuale Pozzo La Cuna.**

**Figura 2. Ubicazione dell'attuale pozzo rispetto all'impronta del futuro rilevato ferroviario (verde chiaro)**

## 2 DESCRIZIONE DELLA PROVA

Il giorno 28/07/2022 è stata eseguita una prova a gradini di portata nel piezometro di prova LCB1, situato nel prato a fianco del parcheggio scambiatore per l'accesso alle grotte di Frasassi.

La prova è iniziata alle ore 10:58 e si è conclusa alle ore 16:00.

Durante la prova sono state monitorate le portate estratte e gli abbassamenti registrati nel piezometro in pompaggio e nel vicino piezometro con sigla LCB (Figura 3).

La distanza fra il piezometro in pompaggio e il piezometro LCB, misurata in campagna con un metro a nastro, è risultata di 3.00 metri (Figura 4).

**Figura 3. Ubicazione dei punti di prova e controllo rispetto all'attuale Pozzo La Cuna.**

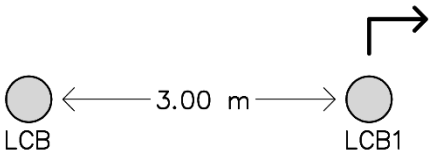


**Figura 4. Schema della disposizione planimetrica del piezometro soggetto a prova di pompaggio (LCB1) e del vicino piezometro di controllo LCB.**

La prova di emungimento ha previsto 5 gradini a portata crescente, con monitoraggio finale della risalita. La Tabella 1-1 riassume i dati di emungimento e di abbassamento nel corso della prova.

**Tabella 1. Dati sintetici della prova a gradini.**

| Gradino | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Inizio** | 10:58:00 | 11:33:00 | 12:09:00 | 13:26:00 | 14:32:00 |
| **Fine** | 11:33:00 | 12:09:00 | 13:26:00 | 14:32:00 | 15:43:30 |
| **Durata** | 00:35:00 | 00:36:00 | 01:17:00 | 01:06:00 | 01:11:30 |
| **Portata Q (L/s)** | 1 | 1.94 | 3.03 | 4 | 4.88 |
| **Abbassamento Dh (m)** | 0.016 | 0.02 | 0.06 | 0.1 | 0.13 |

La prova è stata realizzata con 5 gradini a portata crescente. Le portate sono variate da un minimo di 1 L/s ad un massimo di 4.88 L/s con un abbassamento massimo misurato di 0.13 m.

I gradini sono stati mantenuti per un tempo variabile da 35 a 77 minuti, fino alla stabilizzazione. Al termine della prova è stata monitorata la risalita.

Nel corso della prova sono stati monitorati anche i livelli nel vicino piezometro LCB. Nel piezometro gli abbassamenti massimi registrati sono stati di 0.045 m

La Figura 5 mostra in colore nero gli abbassamenti registrati nel piezometro testato (LCB1) e in colore arancione gli abbassamenti registrati nel piezometro LCB.

Le portate estratte sono indicate in azzurro. Con una linea è indicata la portata media del gradino di prova e con rombi azzurri sono indicate le misure puntuali di verifica eseguite nel corso del gradino. Si può osservare che durante i gradini di prova le portate si sono mantenute perfettamente costanti.

Il piezometro LCB nelle prime due ore di prova si è alzato di livello di circa 2 cm, poi nella quarta ora ha mostrato una diminuzione abbastanza rapida, di circa 2 cm (da 0.02 a 0.04 in 30 min circa).

Questo evidenzia che la falda, nel corso dell'esecuzione della prova, è stata soggetta ad oscillazioni naturali per cause indipendenti dall'esecuzione della prova a gradini.

Questo, peraltro, è un fatto assolutamente normale.

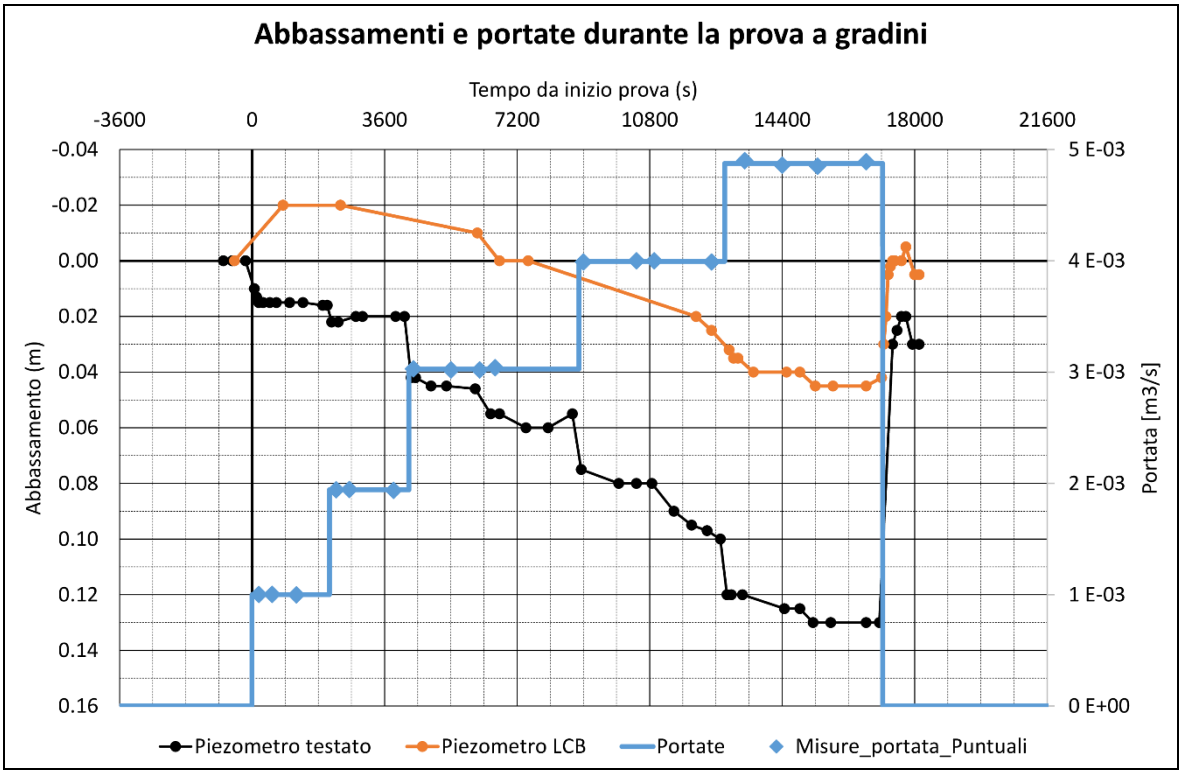


**Figura 5. Abbassamenti registrati nel piezometro testato e nel vicino piezometro LCB comparati con le portate estratte nel corso della prova.**

A livello generale, le caratteristiche del piezometro oggetto della prova sono le seguenti:

- Profondità foro 20,0 m;
- Caratteristiche piezometro: 0,0÷2,0 m cieco. 2,0÷12,0 m fessurato. 12,0÷20,0 m cieco;
- Diametro tubazione 5”;
- Installazione nell’intercapedine tubo camicia di dreno granulare costituito da ghiaia fine;

Per eseguite la prova è stata usata una pompa sommersa con portata massima di 5 L/s (Figura 6).

**Figura 6. A sinistra: Pompa usata nel corso della prova a gradini di portata. A destra contalitri e saracinesca di regolazione della portata**

## 3 CURVA CARATTERISTICA

La Figura 7 riporta gli abbassamenti stabilizzati al termine dei gradini di pompaggio. I primi due gradini di prova mostrano una flessione anomala della curva. Questo effetto è determinato dal fatto che nel corso della prova, in particolare dei primi gradini di prova, gli abbassamenti sono risultati molto modesti, di 1.6 cm nel primo gradino e di 2.0 cm nel secondo gradino.

Variazioni piezometriche di questa entità sono paragonabili alle variazioni piezometriche naturali della falda e quindi l'errore associato a queste prime misure risulta inevitabilmente maggiore.

Le oscillazioni della falda sono effettivamente state osservate anche nel vicino piezometro LCB che, nel corso del primo e secondo gradino di pompaggio, si è addirittura alzato di 2 cm di livello.

I gradini successivi 2, 3, 4 e 5 mostrano un buon allineamento, senza particolari flessioni o anomalie.

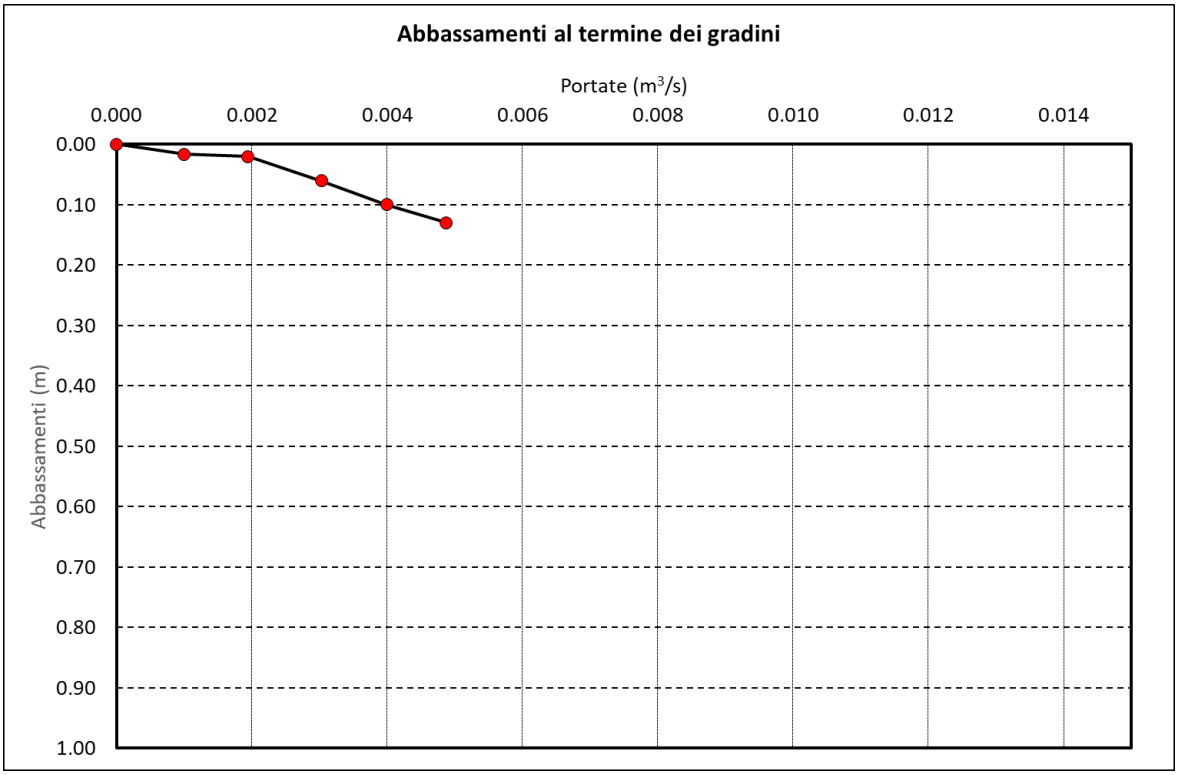


**Figura 7. Abbassamenti misurati al termine di ciascun gradino di portata.**

Con le coppie di valori $Q_n$ – $Dh_n$, per ogni gradino di portata, si è ottenuta:

$$Qs_n = \frac{Q_n}{Dh_n} \qquad [\frac{m^2}{s}]$$

dove $Qs_n$ è la **portata specifica**, cioè la portata emunta riferita all'abbassamento misurato nel pozzo per il gradino n° 1, 2, ecc.; il suo inverso è l'**abbassamento specifico**. I valori ottenuti sono riportati in Tabella 2.

**Tabella 2. Dati ricavati dalla prova a gradini.**

| Gradino | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Portata Q (L/s)** | 1 | 1.94 | 3.03 | 4 | 4.88 |
| **Portata Q ($m^3$/s)** | 0.0010013 | 0.0019423 | 0.0030275 | 0.003995 | 0.004875 |
| **Abbassamento Dh (m)** | 0.016 | 0.02 | 0.06 | 0.1 | 0.13 |
| **Portata specifica Qs ($m^2$/s)** | 0.0625833 | 0.0971167 | 0.0504583 | 0.03995 | 0.0375 |
| **Abbassamento specifico (s/$m^2$)** | 15.978695 | 10.296894 | 19.818332 | 25.031289 | 26.66667 |

Con i dati a disposizione si è ricostruito un diagramma, avente in ascissa le portate emunte ed in ordinata gli abbassamenti piezometrici. Tale diagramma permette di ottenere la **curva caratteristica** del pozzo (Figura 9), che può essere espressa anche analiticamente attraverso la relazione di C.E. Jacob [1]:

$$Dh = BQ + CQ^2$$

**[Eq. 1]**

che si può riscrivere come

$$\frac{Dh}{Q} = B + CQ$$

dove:

Dh (m) = depressione piezometrica al termine del gradino di portata Q;

Q ($m^3/s$) = valore del gradino di portata;

Dh/Q= abbassamento specifico;

B = coefficiente che tiene conto delle perdite di carico lineari dovute, sia al deflusso laminare esistente nell'acquifero, sia al condizionamento del pozzo;

C = coefficiente che tiene conto delle perdite di carico quadratiche, che generalmente sono funzione del condizionamento del pozzo.

I parametri B e C si ricavano dalla retta "portate/abbassamenti specifici" (Figura 8), ed in particolare: il coefficiente B è ottenuto dall'intersezione della retta rappresentativa con l'asse degli abbassamenti specifici (intercetta), mentre il coefficiente C è uguale alla pendenza della retta rappresentativa (coefficiente angolare). La retta in tratteggio blu approssima al meglio l'insieme dei punti.

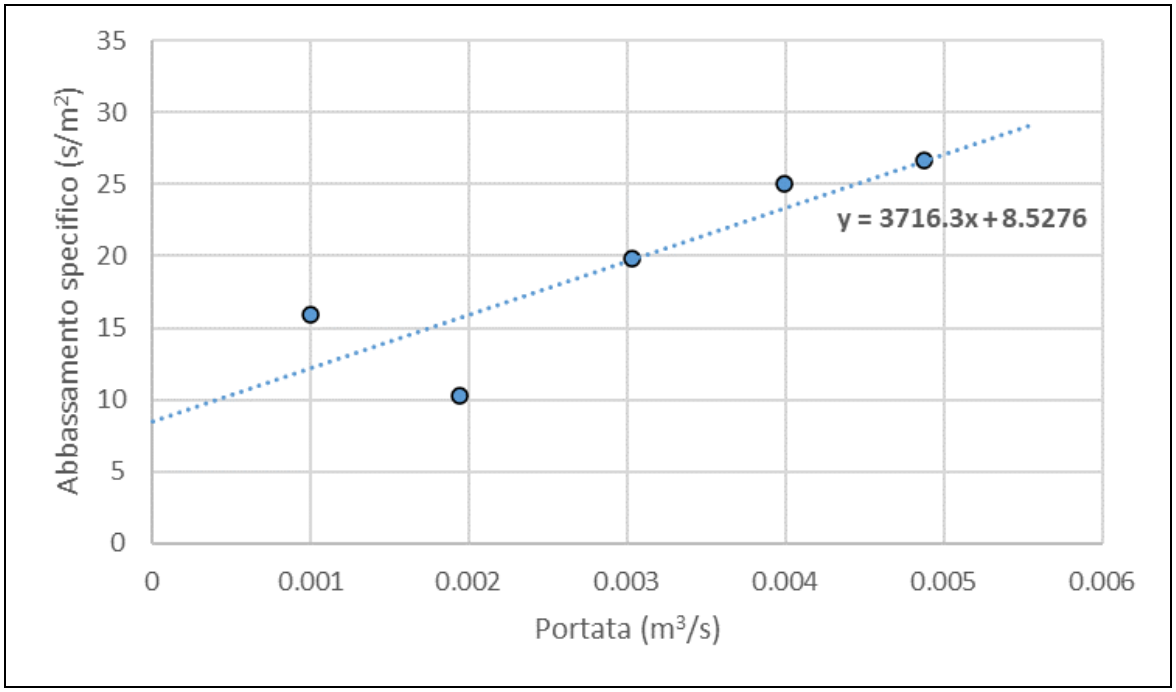


**Figura 8. Retta portate/abbassamenti specifici per la stima dei parametri B e C della curva caratteristica.**

Dall'esame del grafico in Figura 8, i parametri B e C ricavati risultano essere:

B = 8.5276 $s/m^2$

C = 3716.3 $s^2/m^5$

Una volta ottenuti i coefficienti B e C dalla Figura 8, è possibile costruire il grafico "portate/abbassamenti" (Figura 9). La curva blu rappresenta la curva caratteristica teorica del piezometro: rappresenta, infatti, l'equazione descritta in [Eq. 1] con i parametri B e C ricavati in Figura 8.

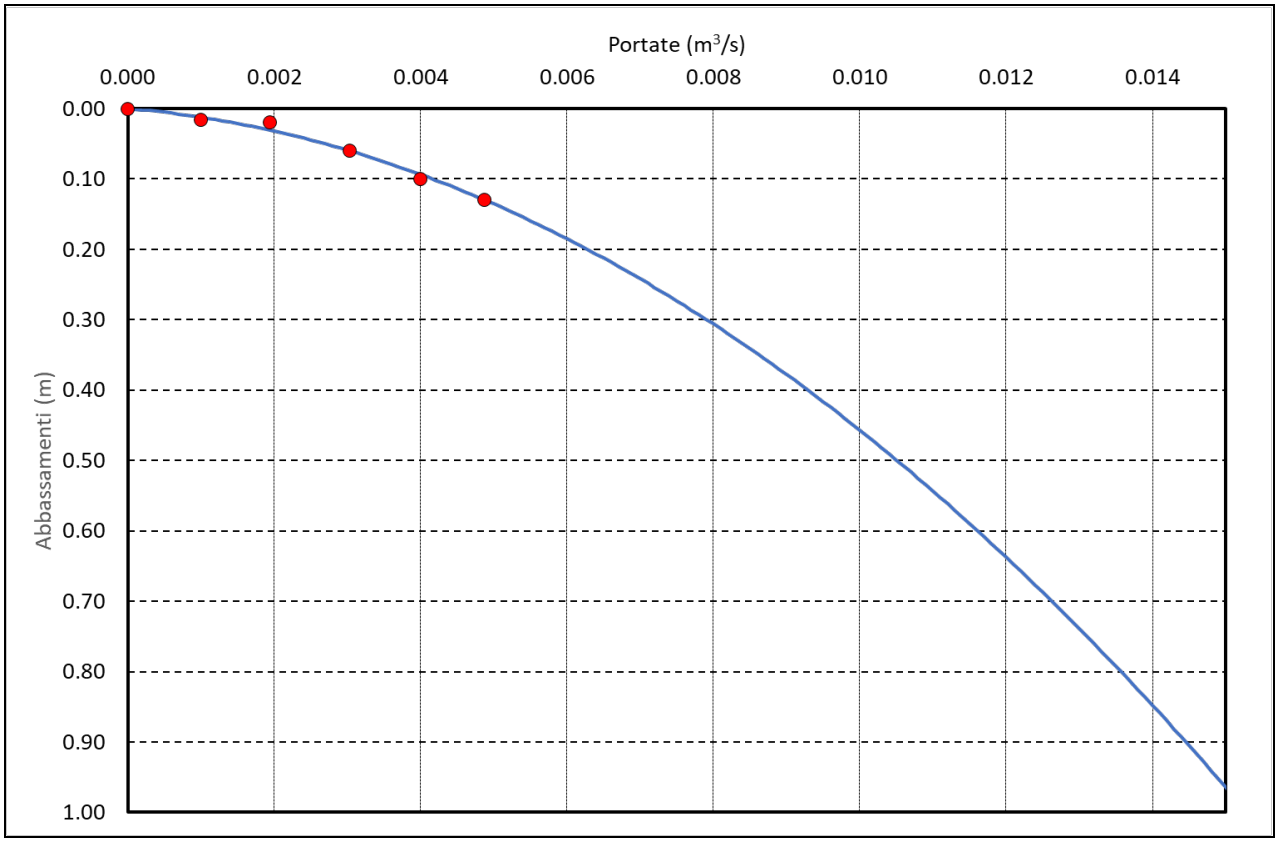


**Figura 9 . Grafico portate/abbassamenti. In blu: curva caratteristica teorica del piezometro ricavata dalla equazione di Jacob [1]; in rosso: osservazioni sperimentali.**

La curva caratteristica consente di individuare la portata critica $Q_c$ e la portata di emungimento ottimale di esercizio $Q_e$ di un pozzo.

Tuttavia, per poter ricavare la portata critica $Q_c$ del piezometro dalla Figura 9, occorre identificare l'aumento della pendenza della curva caratteristica stessa. Dall'analisi dei dati, si può constatare che il piezometro, nel corso della prova, non raggiunge la portata critica: quest'ultima, infatti, è certamente superiore ai 5 L/s, ossia superiore alla massima portata dell'ultimo gradino della prova. Per il raggiungimento della portata critica $Q_c$ occorre infatti arrivare ad una condizione nella quale le perdite di carico per moto turbolento iniziano ad assumere una certa rilevanza e pertanto occorre imporre al pozzo un abbassamento piezometrico significativo, mentre il massimo abbassamento raggiunto nel corso della prova è stato di 13 cm, cioè molto limitato.

Un metodo che consente di determinare graficamente la portata critica $Q_c$ consiste nel costruire il grafico "$Q^2$/Dh vs. Q": in esso si delinea una curva convessa verso l'alto il cui punto massimo corrisponde proprio al valore di $Q_c$. In Figura 10 si può notare che il grafico, ricostruito secondo i dati della prova di pompaggio a gradini, non presenta un picco massimo (il dato corrispondente a circa 0.002 $m^3/s$ è un errore dovuto alle prime misure), bensì

un insieme di valori con andamento crescente, i quali rappresentano verosimilmente ancora il tratto crescente della curva stessa. La portata critica $Q_c$ è dunque da ricercare in valori superiori ai 5 L/s, come esposto in precedenza.

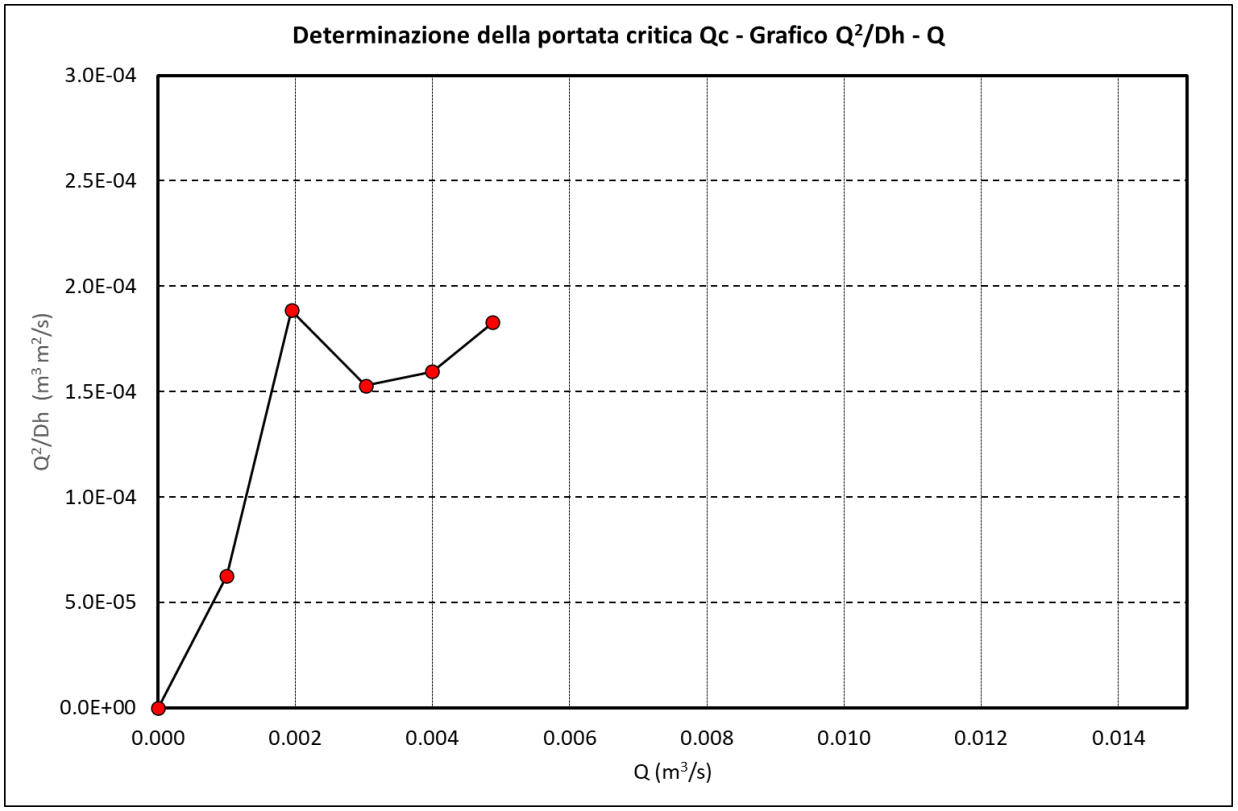


**Figura 10. Determinazione della portata critica $Q_c$ mediante il metodo del grafico $Q^2/Dh$ vs. Q.**

Esistono numerose formule empiriche che permettono di valutare la trasmissività dalla portata specifica **Qs** per varie tipologie di acquifero. Qui di seguito, in Tabella 4, viene riportata la formulazione di Batu (1999), valida per acquifero freatico:

**Tabella 3. Formula approssimata per il calcolo della trasmissività T.**

| **Autore** | **Formula** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Batu (1999)** per acquifero freatico | **T = 1.385 (Q/Dh)** | | | | |
| Gradino | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| T (mq/giorno) | 5634.3024 | 8743.297 | 4542.7032 | 3596.6506 | 3376.08 |
| T ($m^2$/s) | 0.0652118 | 0.1011956 | 0.0525776 | 0.0416279 | 0.039075 |
| **Trasmissività media ($m^2$/s)** | **5.99E-02** | | | | |

La trasmissività dell'acquifero, calcolata come media dei valori risultanti dai 5 gradini, risulta essere di circa **5.99E-02 $m^2$/s**.

## 4 INTERPRETAZIONE DEGLI ABBASSAMENTI NEL PIEZOMETRO

Il software di elaborazione MLU (Multi-Layer Unsteady state) ha consentito di ottenere i parametri di trasmissività T ($m^2/s$) dell'acquifero utilizzando i dati degli abbassamenti dei due piezometri LCB e LCB1.

A partire dai dati di abbassamento misurati durante la prova sia nel piezometro LCB1 sia nel piezometro LCB, distanti 3 metri, è stato possibile ricavare il diagramma di confronto tra gli abbassamenti osservati e quelli simulati dal software (Figura 11).

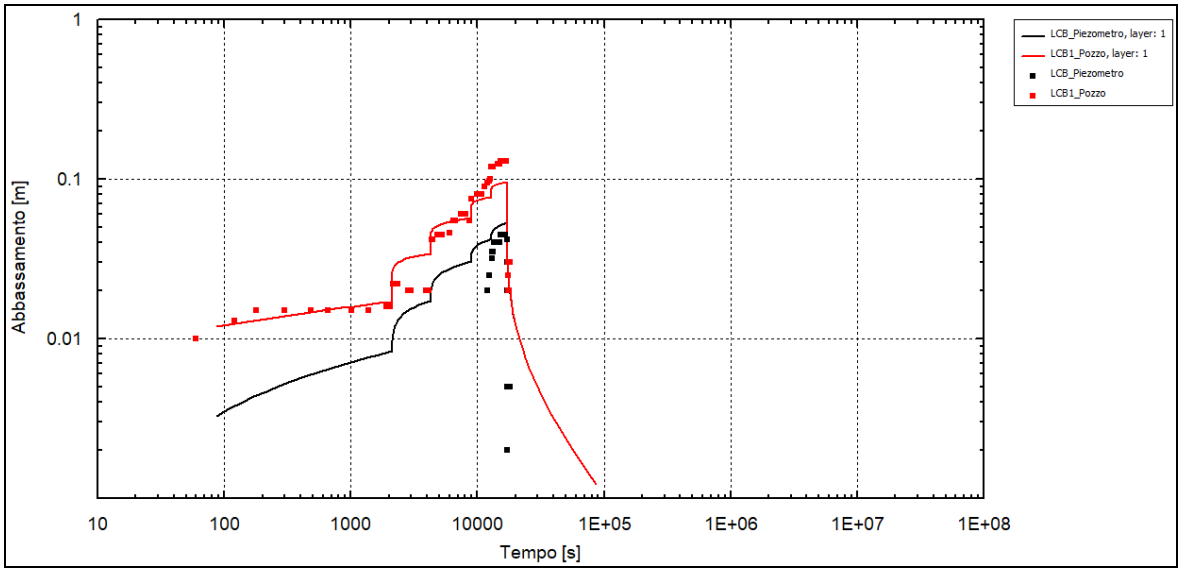


**Figura 11. Confronto tra gli abbassamenti osservati (punti) e quelli simulati (linea continua) per la prova a gradini di portata sui piezometri LCB1 ed LCB mediante il software MLU.**

Sulla base di tale interpretazione, il valore di trasmissività dell'acquifero risulta simile a quello precedentemente calcolato mediante formulazione empirica (Batu, 1999) e vale **4.92E-02 $m^2/s$**.

## 5 CONCLUSIONI

La prova di pompaggio eseguita nel piezometro LCB1 è stata effettuata con una pompa con portata massima di 5 L/s (ultimo gradino eseguito a portata pari a 4.88 L/s. Con questa portata l'abbassamento massimo registrato al piezometro è risultato molto limitato e pari a 13 cm. Dall'esame dei gradini di portata è emerso che la portata critica del piezometro è certamente oltre i 5 L/s.

Il motivo degli abbassamenti molto ridotti è da ricercarsi nella buona trasmissività dell'acquifero e nella buona realizzazione del piezometro.

La trasmissività ricostruita con la formula empirica di Batu è risultata di circa 6E-2 $m^2/s$.

A fine di verifica è stata fatta una simulazione con MLU osservando gli abbassamenti registrati nel piezometro in pompaggio LCB1 e nel vicino piezometro di controllo LCB. La verifica ha fornito una trasmissività di 5E-2 $m^2/s$, confermando i dati ricavati dalla formula empirica di Batu.

In sintesi, il punto di cui è stato perforato il piezometro LCB1 si presta per la realizzazione di un pozzo. Infatti, dai dati ricavabili dal piezometro LCB1, si può ragionevolmente supporre che il pozzo potrà fornire una portata superiore ai 5 L/s. In ogni caso, la portata ottimale di sfruttamento del pozzo si potrà ricavare solamente dopo che l'opera sarà realizzata e in essa verrà realizzata una prova a gradini.

# 6 BIBLIOGRAFIA

[1] C. E. Jacob, “Flow of ground water,” in *Engineering Hydraulics*, H. Rouse and J. Wiley, Eds. 1950, pp. 321–386.