

**CONSORZIO DI BONIFICA “VELIA” DEL
BACINO DELL’ALENTO
(SALERNO)**

**ANALISI DEL REGIME DEI LIVELLI PIEZOMETRICI E
DEI MOTI DI FILTRAZIONE
DELLA DIGA SAN GIOVANNI CORRENTE
(CERASO, SALERNO)
SULLA BASE DELLA NUOVA RETE DI
PIEZOMETRI CASAGRANDE**

CONSULENZA SCIENTIFICA

Prof. Geol. Pantaleone De Vita

Pantaleone De Vita
Consulente



Pantaleone
DE VITA
Elenco Spec. N°
163
Regione Campania

OTTOBRE 2021

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI COSTITUENTI IL CORPO DIGA	5
3. ANALISI DELLE NUOVE MISURE PIEZOMETRICHE	10
4. CONCLUSIONI.....	21

1. PREMESSA

Sulla base dell'analisi delle misure effettuate alla nuova rete di piezometri Casagrande, incrementata con ulteriori 12 piezometri installati in sostituzione di quelli a tubo aperto preesistenti, la presente relazione approfondisce l'analisi del regime dei livelli piezometrici e dei moti di filtrazione della Diga San Giovanni Corrente (Ceraso, Salerno), integrando la precedente redatta dallo scrivente.

Le nuove analisi si sono avvalse di misure piezometriche effettuate dal 3 giugno 2021 al 13 settembre 2021, con cadenza all'incirca settimanale (14 misurazioni), sui cinque piezometri Casagrande preesistenti (P2C, P2C1, P2C2, P4A e P5A) e sui dodici di nuova realizzazione (P1N, P2N, P3N, P4N, P5N, P6N, P7N, P8N, P9N, P10N, P11N e P12N), per un totale di 17 punti di misura. Le nuove installazioni sono state eseguite a seguito della controversa interpretazione dei livelli piezometrici registrati nei preesistenti piezometri a tubo aperto, ritenuti poco idonei alla misura del regime delle pressioni di poro nei terreni a bassa permeabilità che caratterizzano il corpo diga. Sulla base delle numerose interazioni occorse tra il Consorzio Velia e l'UTDNa, è stata stabilita la numerosità e l'ubicazione dei nuovi piezometri Casagrande, realizzati dall'impresa Geotecnica Consulting S.r.l., in sostituzione dei preesistenti piezometri a tubo aperto. In particolare, la disposizione dei nuovi piezometri ha tenuto conto di un'omogenea distribuzione spaziale dei punti di misura e dei differenti materiali considerati, variabili tra quelli che costituiscono il corpo diga e quelli della formazione di base; ciò per poter distinguere il regime delle pressioni neutre esistente in entrambi i sistemi fisici. La collocazione spaziale dei piezometri ha altresì tenuto conto delle specifiche indicazioni dell'UTDNa in base alle quali è stato richiesto un approfondimento in corrispondenza della spalla in destra idrografica, per la quale le precedenti analisi delle registrazioni piezometriche avevano evidenziato una potenziale alimentazione orientata verso il corpo diga.

I sondaggi a carotaggio continuo effettuati per la realizzazione dei piezometri Casagrande hanno altresì permesso di ricostruire con maggiore dettaglio il modello geologico della diga, quindi di perfezionare le sezioni geologiche trasversali all'asse vallivo, passanti per il coronamento, la 1° banca di valle e la 2° banca di valle, e pertanto di ottimizzare la collocazione plano-altimetrica delle nuove celle di Casagrande. Infine, mediante il prelievo di campioni indisturbati e le analisi di laboratorio è stata avanzata la caratterizzazione geotecnica dei materiali costituenti il corpo diga ed in particolare la loro classificazione.

Nella seguente tabella (Tab. 1) sono riassunte le caratteristiche geometriche e geologiche dei sondaggi e dei piezometri Casagrande preesistenti e di nuova realizzazione.

ID Piezometro	Impresa	Data	Ubicazione	UTM WGS84 E (m)	UTM WGS84 N (m)	Quota assoluta (m s.l.m.)	Profondità perforazione (m)	Quota fondo perforazione (m s.l.m.)	Quota min cella di Casagrande (m s.l.m.)	Quota max cella di Casagrande (m s.l.m.)	Materiale interessato dalla cella di Casagrande
P2C1	Campania Sonda	22/10/2012	1° banca	519,889	4,448,982	215.40	14.24	201.16	202.16	203.26	Formazione di base
P2C2	Campania Sonda	22/10/2012	2° banca	519,874	4,448,976	211.00	9.36	201.64	202.64	203.74	Formazione di base
P4A	Campania Sonda	22/10/2012	2° banca	519,877	4,448,964	211.00	9.56	201.44	202.44	203.54	Formazione di base
P5A	Campania Sonda	22/10/2012	2° banca	519,883	4,448,942	211.00	11.1	199.9	200.9	202	Formazione di base
P1N	Geotecnica Consulting	25/05/2021	Coronamento	519,900	4,449,019	224.14	12.05	212.09	211.72	212.72	Corpo diga
P2N	Geotecnica Consulting	08/06/2021	Coronamento	519,900	4,449,017	224.10	7.25	216.85	216.35	217.35	Corpo diga
P3N	Geotecnica Consulting	26/05/2021	Coronamento	519,899	4,449,021	224.17	20.05	204.12	203.77	204.77	Formazione di base
P4N	Geotecnica Consulting	24/05/2021	Coronamento	519,905	4,449,000	224.01	18.05	205.96	205.45	206.45	Corpo diga
P5N	Geotecnica Consulting	20/05/2021	Coronamento	519,911	4,448,976	224.04	17.40	206.64	206.43	207.43	Corpo diga
P6N	Geotecnica Consulting	20/05/2021	Coronamento	519,923	4,448,934	224.03	20.55	203.48	202.83	203.83	Formazione di base
P7N	Geotecnica Consulting	19/05/2021	Coronamento	519,923	4,448,932	224.02	11.05	212.97	212.66	213.66	Corpo diga
P8N	Geotecnica Consulting	09/06/2021	1° banca	519,880	4,449,009	215.71	9.45	206.26	206.01	207.01	Formazione di base
P9N	Geotecnica Consulting	09/06/2021	1° banca	519,881	4,449,006	215.73	12.25	203.48	203.05	204.05	Formazione di base
P10N	Geotecnica Consulting	27/05/2021	1° banca	519,890	4,448,970	215.52	9.25	206.27	205.97	206.97	Corpo diga
P11N	Geotecnica Consulting	07/06/2021	2° banca	519,870	4,448,983	211.01	6.25	204.76	204.41	205.41	Corpo diga
P12N	Geotecnica Consulting	27/05/2021	2° banca	519,875	4,448,966	210.99	5.35	205.64	205.19	206.19	Corpo diga

Tab. 1: caratteristiche geometriche e geologiche dei cinque piezometri Casagrande preesistenti (P2C, P2C1, P2C2, P4A e P5A) e dei dodici di nuova realizzazione (P1N, P2N, P3N, P4N, P5N, P6N, P7N, P8N, P9N, P10N, P11N e P12N).

2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI COSTITUENTI IL CORPO DIGA

La controversa interpretazione dei livelli piezometrici registrati nei piezometri a tubo aperto preesistenti è connessa soprattutto alla rispettiva quota di livellamento, nettamente superiore a quella di invaso, soprattutto nel settore del corpo diga in prossimità della spalla in destra idrografica dove queste installazioni sono maggiormente presenti. Tale constatazione ha indotto a considerare, tra le possibili interpretazioni, l'esistenza di un'alimentazione proveniente dalla sponda in destra idrografica che creerebbe condizioni di elevate pressioni di poro all'interno del corpo diga. Tale interpretazione si basa soprattutto sull'ipotesi dell'esistenza di lenti ghiaioso-sabbiose, nell'ambito del prevalente materiale limoso-argilloso costituente il corpo diga, reciprocamente interconnesse e attraverso le quali sarebbe possibile un'alimentazione idraulica proveniente dalla sponda in destra idrografica. Tale ipotesi appare giustificabile in base alla descrizione litologica dei materiali del corpo diga, nota dalle precedenti campagne geognostiche, la cui interpretazione ne ammetterebbe l'esistenza, e dalle non numerose analisi granulometriche di laboratorio condotte su campioni indisturbati del materiale del corpo diga.

Stante tale incertezza, è stata considerata di fondamentale importanza la caratterizzazione litologica e stratigrafica dei materiali costituenti il corpo diga effettuata mediante i nuovi sondaggi a carotaggio continuo eseguiti dalla Geotecnica Consulting S.r.l. per l'installazione dei nuovi piezometri ed a supporto della caratterizzazione sismica dell'opera, commissionata dal Consorzio Velia alla Ground Engineering. Sono state altresì considerate fondamentali la caratterizzazione delle proprietà indice dei materiali, tra cui la granulometria, mediante il prelievo e l'analisi di campioni indisturbati, e l'esecuzione di due prove CPTE (CPTE 1 e CPTE 2) che hanno attraversato completamente il corpo diga (rispettivamente spinte fino alle profondità di 18.65 m e 13.03 m).

In base all'esame delle stratigrafie ricostruite, verificate direttamente dallo scrivente anche durante l'esecuzione dei lavori, è stato possibile evincere una sostanziale omogeneità granulometrica dei materiali, prevalentemente costituiti da una matrice limoso-argillosa nettamente prevalente sulla componente grossolana sabbioso-ghiaiosa, **quindi la non esistenza di lenti in cui tali granulometrie sono prevalenti.**

Tale dato osservazionale è confermato dalle analisi di laboratorio dei quattordici campioni indisturbati, effettuate dalla Geotecnica Consulting S.r.l. (Tab. 2), dalle quali si desumono principalmente caratteristiche granulometriche di terre a grana fine (passante al setaccio N. 200

ASTM \geq del 50%), classificabili secondo il sistema USCS come variabili da argille di bassa plasticità (CL), caso prevalente, ad argille di alta plasticità (CH), riscontrato solo per pochi campioni. Solo per tre campioni prelevati a profondità inferiore a 6 m, è stato riscontrato un valore del passante al setaccio N. 200 ASTM inferiore al 50%, quindi i campioni sono stati classificati come sabbia con limo (SM). Tuttavia, anche questi campioni si caratterizzano per un elevato contenuto in granulometrie fini, tanto da poter considerare anche questi come terre a comportamento coesivo e quindi a bassa conducibilità idraulica.

Mediante la determinazione dei limiti di Atterberg è stato determinato l'Indice di consistenza (I_c) delle terre coesive, quindi il loro grado di consolidazione. Nella maggior parte dei casi, il valore dell'Indice di consistenza, inferiore al 100% e maggiore dell'80%, ha evidenziato la prevalente consistenza solido-plastica del materiale argilloso che, solo in pochi casi, è stata osservata allo stato semisolido ($I_c > 100\%$). Tale consistenza, definibile nei casi estremi "tenera", è stata chiaramente osservata durante le fasi di carotaggio, in cui il materiale ha mostrato la tendenza a rifluire plasticamente all'interno del carotiere ed a raggiungere valori bassi della percentuale di carotaggio. Questo comportamento è stato generalmente osservato, in maniera discontinua, quindi in orizzonti, nell'intervallo di profondità maggiore di 6 m.

Le prove CPTE 1 e CPTE 2 eseguite dall'impresa Geotecnica Consulting S.r.l. hanno sostanzialmente confermato quanto emerso dalla caratterizzazione stratigrafica effettuata mediante i sondaggi a carotaggio continuo, indicando la presenza di terre a granulometria fine ricadenti in prevalenza nel campo delle argille, con consistenza prevalentemente da media a compatta, ma variabile fino a valori bassi, tanto da risultare classificabile in alcuni casi come terre organiche (torbe) (cfr. relazione della Geotecnica Consulting S.r.l. e Figg. 1, 2, 3 e 4). Ovviamente tale condizione non è riconducibile all'esistenza effettiva di dette terre organiche, quanto al basso grado di consolidazione delle terre argillose in alcuni intervalli stratigrafici.

Sondaggio	(ID)	ID3	ID4	ID5	ID7	ID10	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S2	ID9
Campione	(ID)	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C1	C1
Profondità min	(m)	12.5	9.00	9.00	4.50	4.00	3.00	6.00	12.00	14.50	16.00	18.00	21.00	6.00	9.00
Profondità max	(m)	13.00	9.50	9.50	5.00	4.50	3.50	6.50	12.50	15.00	16.50	18.50	21.50	6.50	9.50
Massa volumica dei granuli solidi	(Mg/m ³)	2.66	2.69	2.65	2.68	2.69	2.65	2.68	2.63	2.64	2.69	2.68	2.62	2.61	2.69
Massa volumica dei terreni a grana fine	(Mg/m ³)	2.10	2.02	2.05	2.14	2.25	2.19	2.08	2.07	2.04	2.1	2.14	2.11	2.09	2.12
Contenuto d'acqua – w	(%)	18.9%	21.4%	21.9%	17.5%	12.3%	15.1%	16.6%	19.7%	19.9%	17.1%	17.6%	17.8%	19.7%	11.1%
Limiti di consistenza o Atterberg															
Limite liquido - w _L	(%)	36.0%	39.0%	39.0%	36.0%	34.0%	30.0%	34.0%	40.0%	45.0%	43.0%	40.0%	44.0%	34.0%	28.0%
Limite plastico - w _P	(%)	18.0%	19.0%	18.0%	18.0%	18.0%	14.0%	15.0%	17.0%	17.0%	19.0%	18.0%	19.0%	15.0%	17.0%
Indice di plasticità – IP	(%)	18.0%	20.0%	21.0%	18.0%	16.0%	16.0%	19.0%	23.0%	28.0%	24.0%	22.0%	25.0%	19.0%	11.0%
Indice di consistenza - IC	(ad.)	95.0%	88.0%	81.4%	102.8%	135.6%	93.1%	91.6%	88.3%	89.6%	107.9%	101.8%	104.8%	75.3%	153.6%
Analisi granulometrica															
Ghiaia	(%)	12.0%	12.0%	17.0%	17.0%	28.0%	29.0%	23.0%	15.0%	8.0%	11.0%	18.0%	22.0%	16.0%	8.0%
Sabbia	(%)	26.0%	23.0%	24.0%	33.0%	33.0%	30.0%	27.0%	21.0%	20.0%	25.0%	28.0%	27.0%	44.0%	41.0%
Limo	(%)	37.0%	28.0%	27.0%	26.0%	22.0%	27.0%	24.0%	32.0%	36.0%	33.0%	29.0%	27.0%	20.0%	31.0%
Argilla	(%)	25.0%	37.0%	32.0%	24.0%	17.0%	14.0%	26.0%	32.0%	36.0%	31.0%	25.0%	24.0%	20.0%	20.0%
Passante N. 200 ASTM	(%)	65.1%	65.1%	61.4%	51.6%	40.2%	41.5%	52.5%	65.4%	73.1%	66.3%	56.9%	54.0%	41.0%	53.2%
Classifica USCS	(ID)	CL	CL	CL	CL	SM	SM	CL	CH	CH	CH	CH	CH	SM	CL
Classifica AGI	(ID)	Limo con sabbia e argilla ghiaioso	Argilla con limo sabbiosa ghiaiosa	Argilla con limo sabbiosa ghiaiosa	Sabbia con limo argillosa ghiaiosa	Sabbia con ghiaia limoso argillosa	Sabbia con ghiaia limoso argillosa	Sabbia con limo argillosa ghiaiosa	Argilla con limo sabbiosa ghiaiosa	Argilla con limo sabbiosa debolmente ghiaiosa	Limo con argilla e con sabbia ghiaioso	Limo con sabbia e con argilla ghiaioso	Limo con sabbia argilloso ghiaioso	Sabbia limosa argillosa ghiaiosa	Sabbia con limo argilloso o debolmente ghiaioso

Tab. 2: sintesi dei risultati delle prove di laboratorio effettuate dalla Geotecnica Consulting S.r.l. per la caratterizzazione delle proprietà indice e classificazione dei campioni indisturbati.

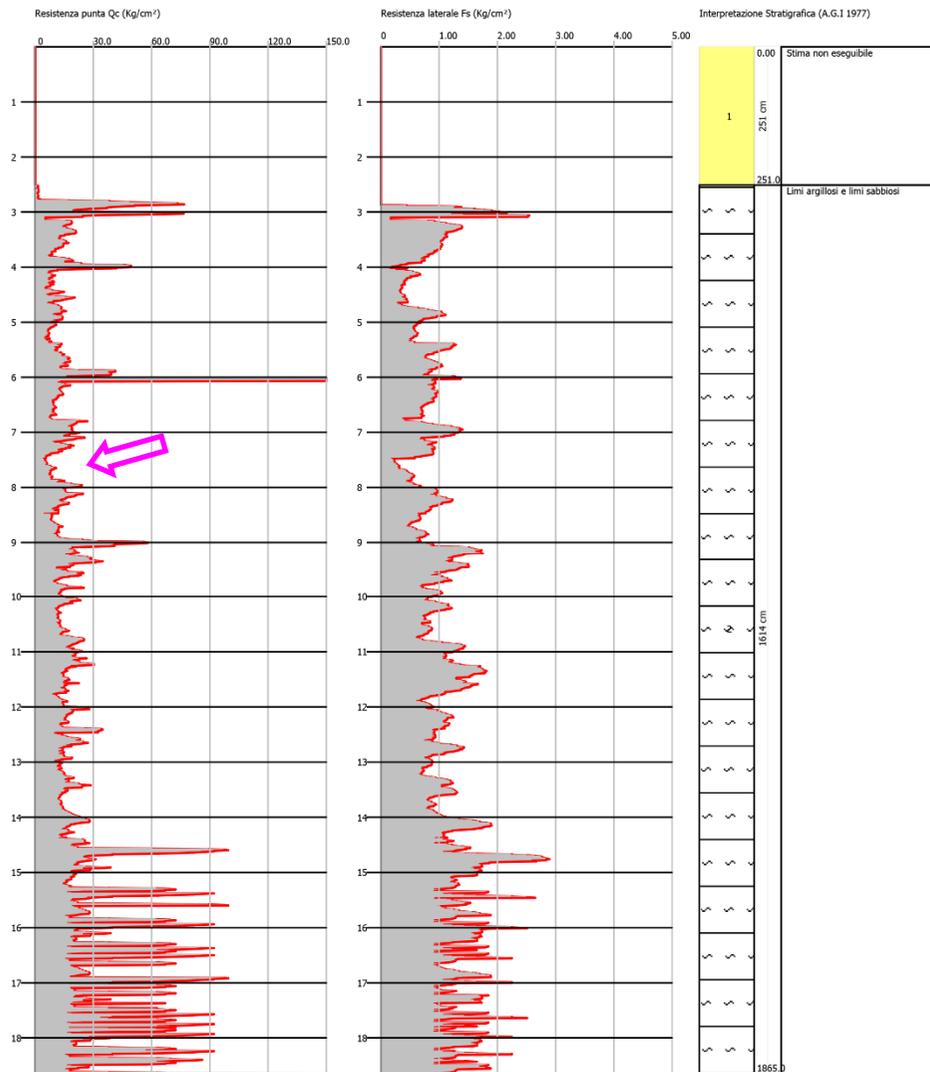


Fig. 1: grafico della resistenza di punta (q_c) e della resistenza laterale (f_s) della prova CPT 1. La prova è iniziata a circa 2.5 m di profondità, dopo un primo tratto di avvio (cfr. relazione redatta dalla Geotecnica Consulting S.r.l.). La freccia di color fucsia indica un intervallo stratigrafico con basso valore di resistenza di punta (q_c), rappresentativo di una condizione locale di minore consolidazione dell'argilla.

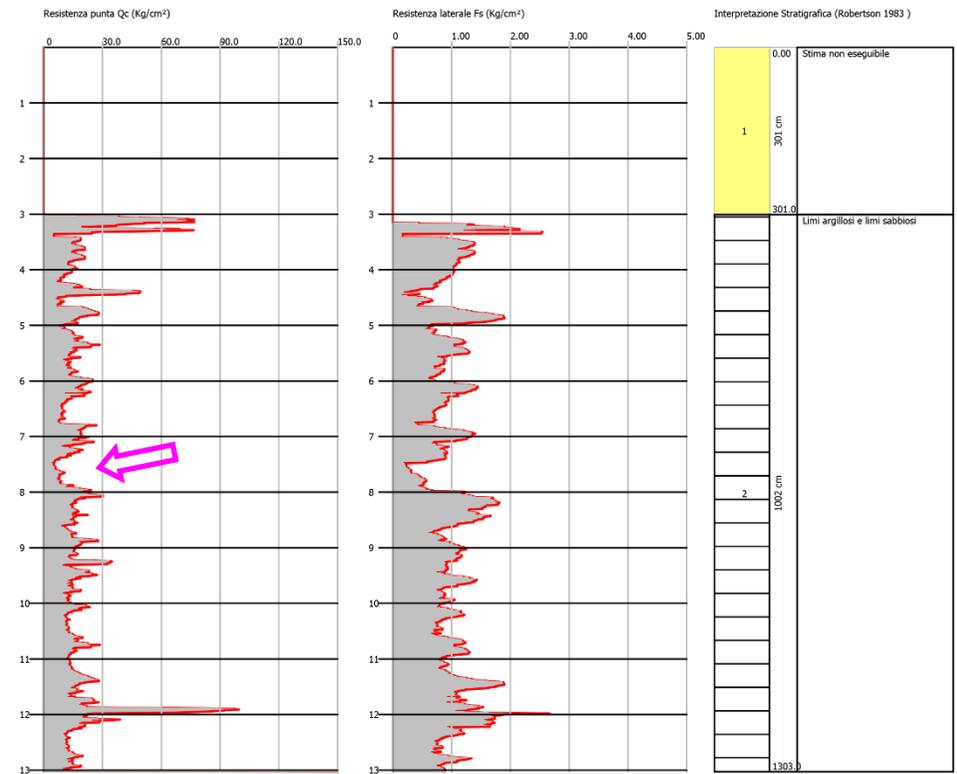


Fig. 2: grafico della resistenza di punta (q_c) e della resistenza laterale (f_s) della prova CPT 2. La prova è iniziata a circa 2.5 m di profondità, dopo un primo tratto di avvio (cfr. relazione redatta dalla Geotecnica Consulting S.r.l.). La freccia di color fucsia indica un intervallo stratigrafico con basso valore di resistenza di punta (q_c), rappresentativo di una condizione locale di minore consolidazione dell'argilla.

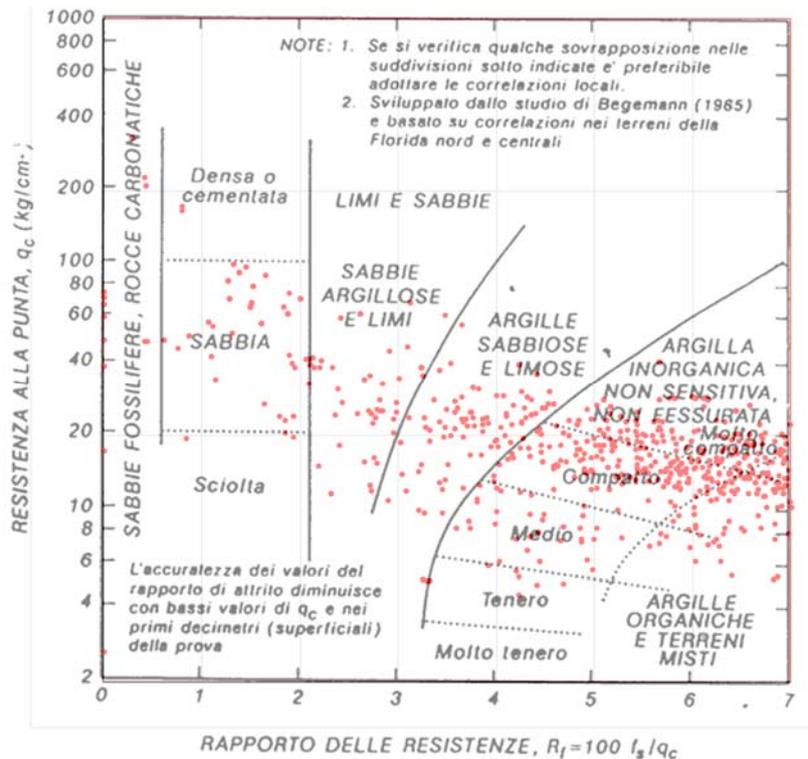


Fig. 3: classificazione delle terre attraversate dalla prova CPT 1 in base ai valori di resistenza alla punta (q_c) ed il rapporto percentuale delle resistenze ($100 \times f_s / q_c$) mediante il nomogramma di Schmertmann (1969). È possibile notare come la maggior parte delle determinazioni (una ogni cm di profondità) ricada nel campo delle argille ed un'aliquota significativa nel campo delle argille organiche. Ciò è indicativo di basso grado di consolidazione.

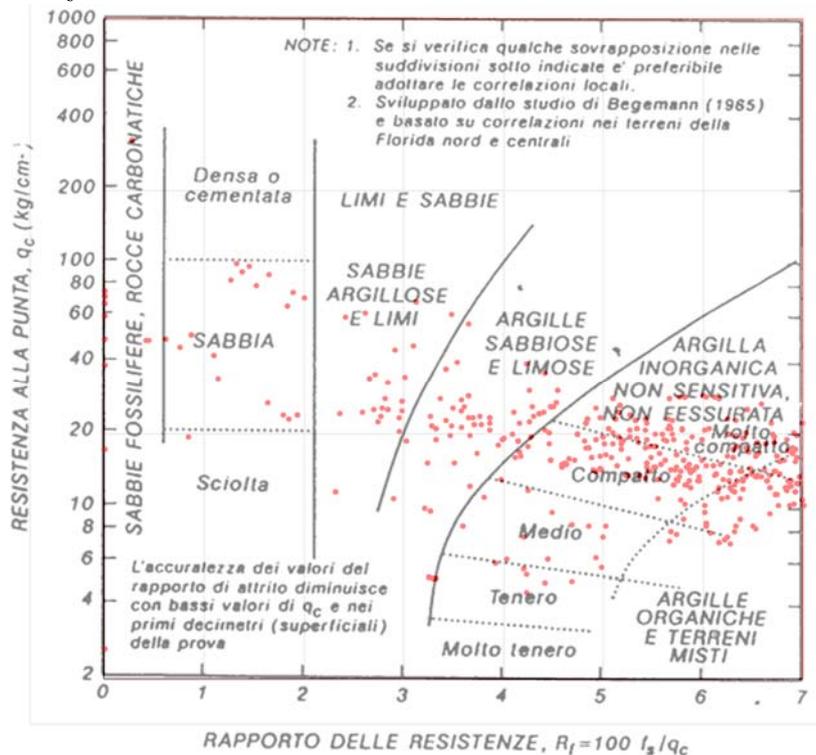


Fig. 4: classificazione delle terre attraversate dalla prova CPT 2 in base ai valori di resistenza alla punta (q_c) ed il rapporto percentuale delle resistenze ($100 \times f_s / q_c$) mediante il nomogramma di Schmertmann (1969). È possibile notare come la maggior parte delle determinazioni (una ogni cm di profondità) ricada nel campo delle argille ed un'aliquota significativa nel campo delle argille organiche. Ciò è indicativo di basso grado di consolidazione.

Dal punto di vista della caratterizzazione della conducibilità idraulica (K) mediante cinque prove in foro a carico variabile del tipo Le Franc, eseguite dall'Impresa Geotecnica Consulting S.r.l., è da evidenziare che i risultati ottenuti variano concordemente nell'intervallo di 1×10^{-5} cm/s. Tali valori sono inferiori a quelli ottenuti dagli *slug test*, effettuati sui piezometri a tubo aperto, che indicano valori della conducibilità idraulica variabili tra 1×10^{-6} e 1×10^{-9} cm/s (cfr. precedente relazione). Sebbene superiori di un ordine di grandezza rispetto ai precedenti, i risultati delle prove Le Franc sono congruenti con le generali caratteristiche di bassa conducibilità idraulica dei terreni costituenti il corpo diga, a matrice limoso-argillosa, e compatibili con la tenuta idraulica del corpo diga.

3. ANALISI DELLE NUOVE MISURE PIEZOMETRICHE

Le misure piezometriche effettuate nella nuova rete di piezometri Casagrande, comprendente quelli preesistenti e quelli di nuova installazione, sono state eseguite a partire dal 3 giugno 2021 e protratte sino al 13 settembre 2021, con cadenza all'incirca settimanale (14 misurazioni). Pertanto, le misurazioni sono state effettuate nel periodo estivo, non influenzato dalle precipitazioni, e con un livello di invaso molto basso, di poco variabile attorno ai 212.50 m s.l.m. Da ciò consegue che i livelli piezometrici osservati, non essendo stati influenzati dalle precipitazioni, hanno evidenziato una progressiva stabilizzazione delle pressioni di poro indotte dalla circolazione idrica connessa alle operazioni di perforazione.

Al fine di comprendere il significato dei dati della nuova campagna di misure, i dati piezometrici sono stati graficizzati nel tempo e mediante analisi statistica descrittiva, anche considerando il confronto con i valori registrati del livello di invaso.

L'analisi complessiva della variazione dei livelli piezometrici nel tempo (Fig. 5) ha evidenziato una tendenza alla stabilizzazione, connessa al riequilibrio delle pressioni di poro dopo il termine delle operazioni di perforazione, e la non influenza di fenomeni pluviometrici. Dal punto di vista delle quote di livellamento, in confronto a quelle di invaso, si assiste ad un comportamento differenziato con piezometri per i quali si registrano valori del livello idrico inferiori e superiori a quelli d'invaso, per la cui interpretazione è necessario considerare anche l'ubicazione del piezometro (coronamento, 1° banca e 2° banca), ovvero la quota d'imposta e la posizione rispetto alla direzione di flusso, nominalmente orientata da monte verso valle.

La comprensione della variabilità dei livelli piezometrici in confronto con quelli d'invaso è bene illustrata mediante un'analisi statistica descrittiva effettuata con grafici box-plot (Fig. 6), che evidenzia l'esistenza di piezometri con livelli inferiori e superiori a quelli d'invaso per la cui interpretazione è necessario considerare anche l'ubicazione degli stessi (coronamento, 1° banca e 2° banca). Detta analisi è stata effettuata raggruppando i piezometri in base all'ubicazione, che include la differente quota d'imposta e la differente posizione rispetto alla direzione di flusso, diretta da monte a valle. Inoltre, i piezometri sono stati raggruppati in base al materiale in cui è impostata la cella di Casagrande (corpo diga e formazione di base). Di seguito si descrivono i risultati della suddetta analisi.

I piezometri installati sul coronamento (Fig. 7), virtualmente equidistanti rispetto al flusso proveniente dall'invaso e diretto verso valle, indicano una collocazione delle quote piezometriche, registrate nei piezometri impostati nel corpo diga, a livelli superiori a quelli d'invaso (P1N, P2N, P4N, P5N e P7N). Anche i piezometri con cella di Casagrande impostata nella formazione di base indicano livelli piezometrici superiori a quelli d'invaso (P3N e P6N), tranne per quello installato in corrispondenza dell'asse della valle (P2C).

I piezometri installati sulla 1° banca (Fig. 8), anch'essi virtualmente equidistanti rispetto al flusso proveniente dall'invaso e diretto verso valle, indicano una collocazione delle quote piezometriche registrate nei piezometri impostati nel corpo diga e nella formazione di base, a livelli inferiori a quelli d'invaso. In particolare, i piezometri P8N e P9N, installati in corrispondenza della sponda destra e nella formazione di base, indicano livelli idrici superiori a quelli registrati nel piezometro P2C, impostato in asse con la valle.

I piezometri installati sulla 2° banca (Fig. 9), teoricamente equidistanti rispetto al flusso proveniente dall'invaso e diretto verso valle, indicano una collocazione delle quote piezometriche registrate nei piezometri impostati nel corpo diga e nella formazione di base, a livelli sempre inferiori a quelli d'invaso.

L'esame della distribuzione spaziale dei livelli piezometrici, distinti in base al materiale interessato dalla cella di Casagrande (corpo diga e formazione di base), ricavata mediante interpolazione lineare (triangolazione) dei valori dei livelli piezometrici, indica una distribuzione dei carichi idraulici ed uno schema di flusso differenziato per il corpo diga e la formazione di base (Figg. 10 e 11).

Considerando i livelli piezometrici registrati nel corpo diga (Fig. 10), si osserva un alto piezometrico in corrispondenza del coronamento con livelli superiori a quelli d'invaso, variabili tra 217.0 e 218.0 m s.l.m., con trascurabile gradiente lungo il coronamento ma con gradiente molto elevato verso valle che, già in corrispondenza della 1° banca, induce un forte abbattimento del profilo piezometrico fino a valori inferiori a quelli d'invaso. **Tale osservazione spaziale induce a considerare che la parte del corpo diga caratterizzata da livelli piezometrici superiori a quelli d'invaso sia limitata ad un nucleo centrale, sviluppantesi in asse al coronamento.**

L'osservazione della distribuzione spaziale dei livelli piezometrici registrati nell'ambito della formazione di base (Fig. 11) evidenzia uno schema di flusso orientato dalle sponde verso l'asse vallivo con livelli piezometrici, superiori alle quote d'invaso, solo nei piezometri installati in prossimità delle sponde. Tale schema di circolazione è compatibile con quello tipico dei terreni a bassa permeabilità, come quelli che caratterizzano il substrato d'imposta della diga San Giovanni Corrente, tipicamente caratterizzato da una circolazione più attiva limitata alla fascia più superficiale di alterazione, parallela al pendio.

Infine, la ricostruzione delle tre sezioni geologiche trasversali alla valle, passanti per il coronamento, la 1° banca e la 2° banca, aggiornate in base ai nuovi dati stratigrafici rilevati dai nuovi sondaggi, consente una migliore visualizzazione d'insieme dei livelli piezometri registrati, indicando la compatibilità dei valori registrati nella formazione di base con un tipico schema di circolazione nei terreni a bassa permeabilità con recapito dalle sponde verso l'asse vallivo (Fig. 12).

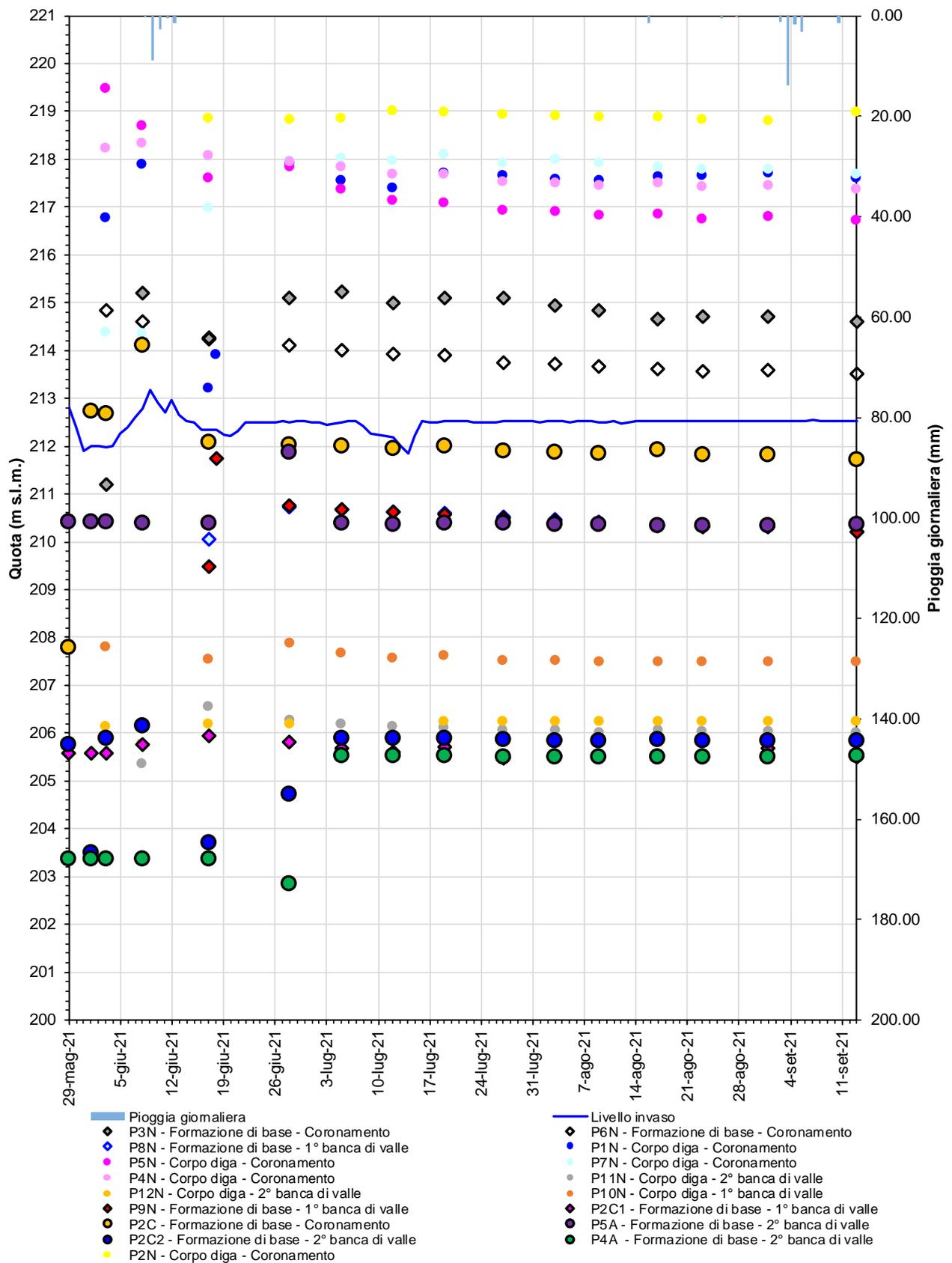


Fig. 5: variazione nel tempo dei livelli piezometri registrati nella nuova rete di piezometri Casagrande in confronto ai livelli d'invaso. I simboli di maggiori dimensioni corrispondono ai piezometri installati nella formazione di base, mentre gli altri a quelli installati nel corpo diga. In legenda è riportata anche l'ubicazione del piezometro (coronamento, 1° banca e 2° banca).

Piezometri Casagrande preesistenti e nuovi (tutti) Misure dal 3 giugno 2021 al 13 settembre 2021

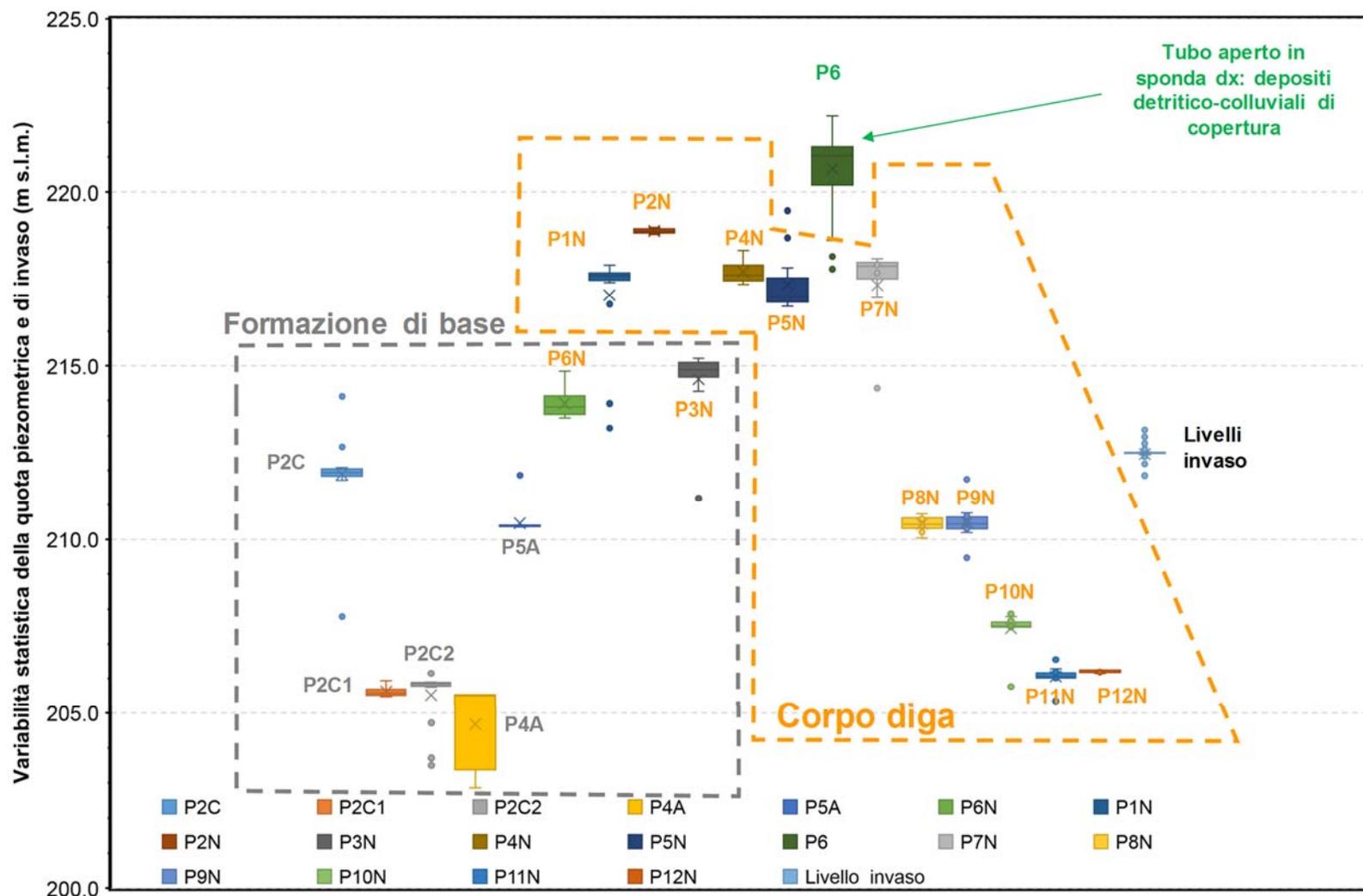


Fig. 6: variabilità statistica dei livelli piezometrici in confronto con quelli d'invaso. I box-plot sono stati raggruppati in base ai materiali interessati dalla cella di Casagrande (corpo diga e formazione di base). È possibile osservare l'esistenza di piezometri con livelli inferiori e superiori a quelli d'invaso per la cui interpretazione è necessario considerare anche l'ubicazione (coronamento, 1° banca e 2° banca), ovvero la quota d'imposta.

Piezometri Casagrande preesistenti e nuovi (coronamento) Misure dal 3 giugno 2021 al 13 settembre 2021

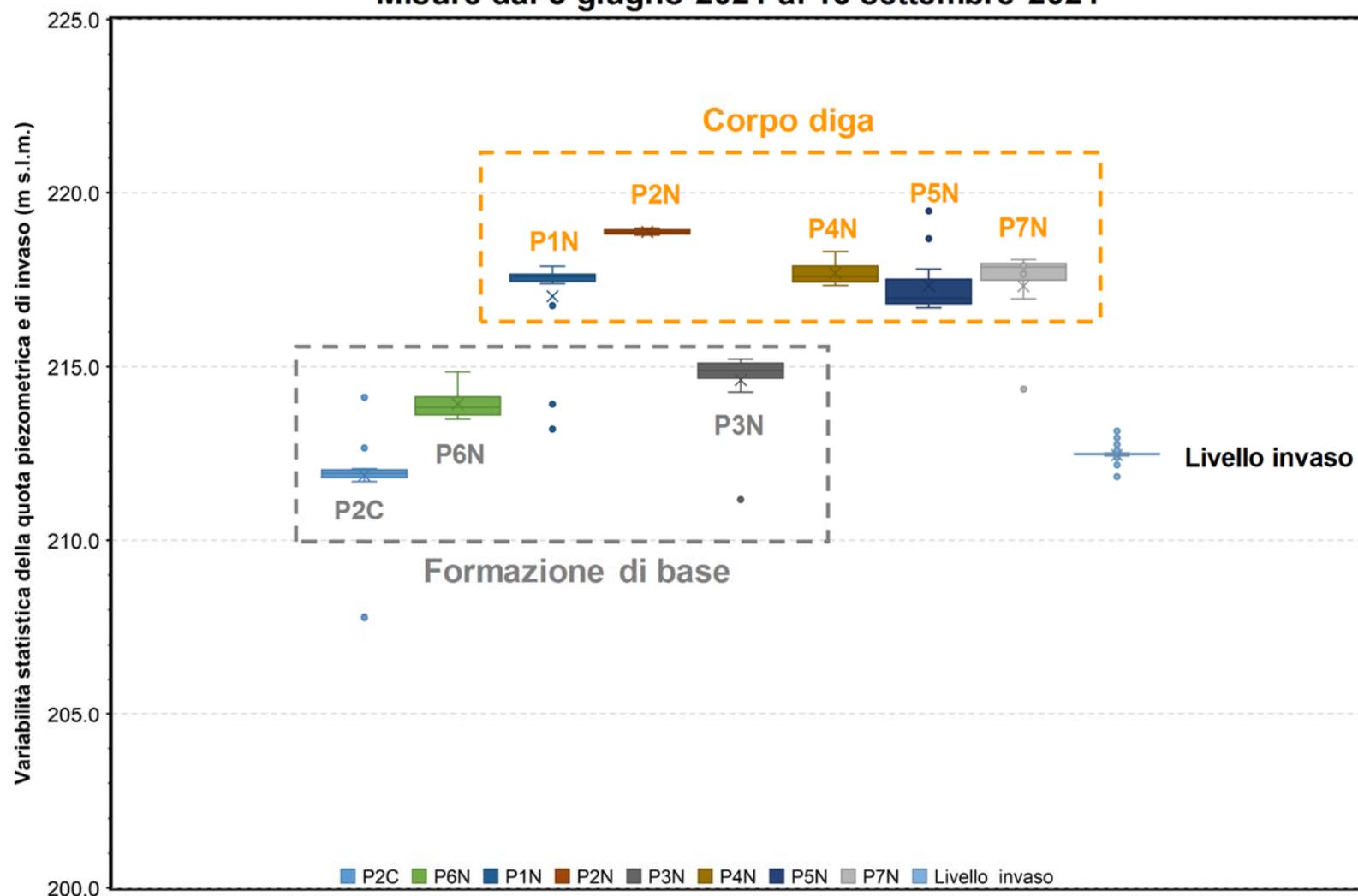


Fig. 7: variabilità statistica dei livelli piezometrici registrati nei piezometri installati sul coronamento, in confronto con quelli d'invaso. I box-plot sono stati raggruppati in base ai materiali interessati dalla cella di Casagrande (corpo diga e formazione di base). È possibile osservare che i piezometri installati nell'ambito del corpo diga indicano livelli superiori a quelli d'invaso. Quelli impostati nella formazione di base indicano livelli di poco superiori a quelli d'invaso, tranne che per il P2C che è in asse con la valle.

Piezometri Casagrande preesistenti e nuovi (1° banca) Misure dal 3 giugno 2021 al 13 settembre 2021

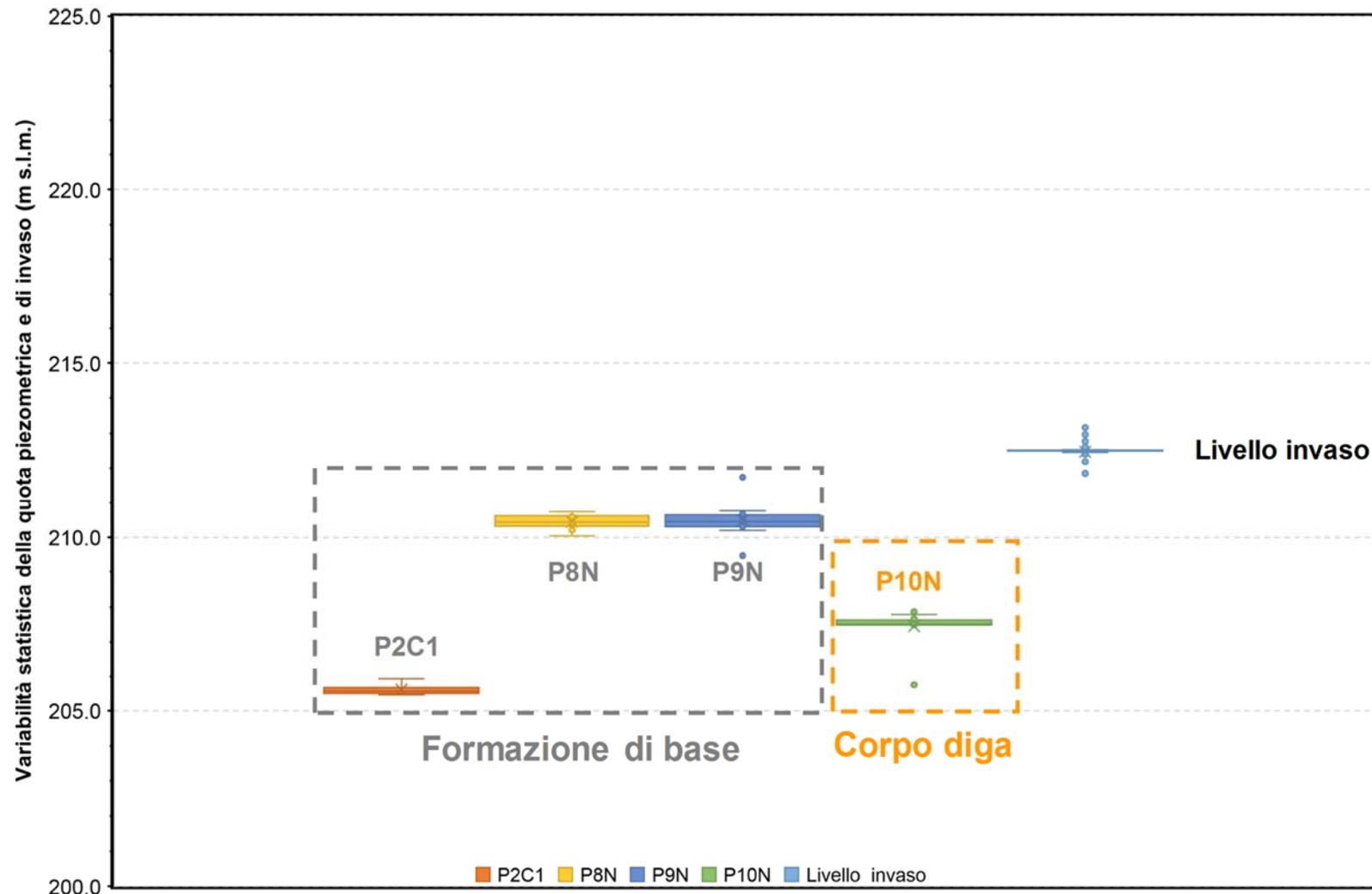


Fig. 8: variabilità statistica dei livelli piezometrici registrati nei piezometri installati sulla 1° banca, in confronto con quelli d'invaso. I box-plot sono stati raggruppati in base ai materiali interessati dalla cella di Casagrande (corpo diga e formazione di base). È possibile osservare che sia i piezometri installati nell'ambito del corpo diga che quelli installati nella formazione di base indicano livelli inferiori a quelli d'invaso.

Piezometri Casagrande preesistenti e nuovi (2° banca) Misure dal 3 giugno 2021 al 13 settembre 2021

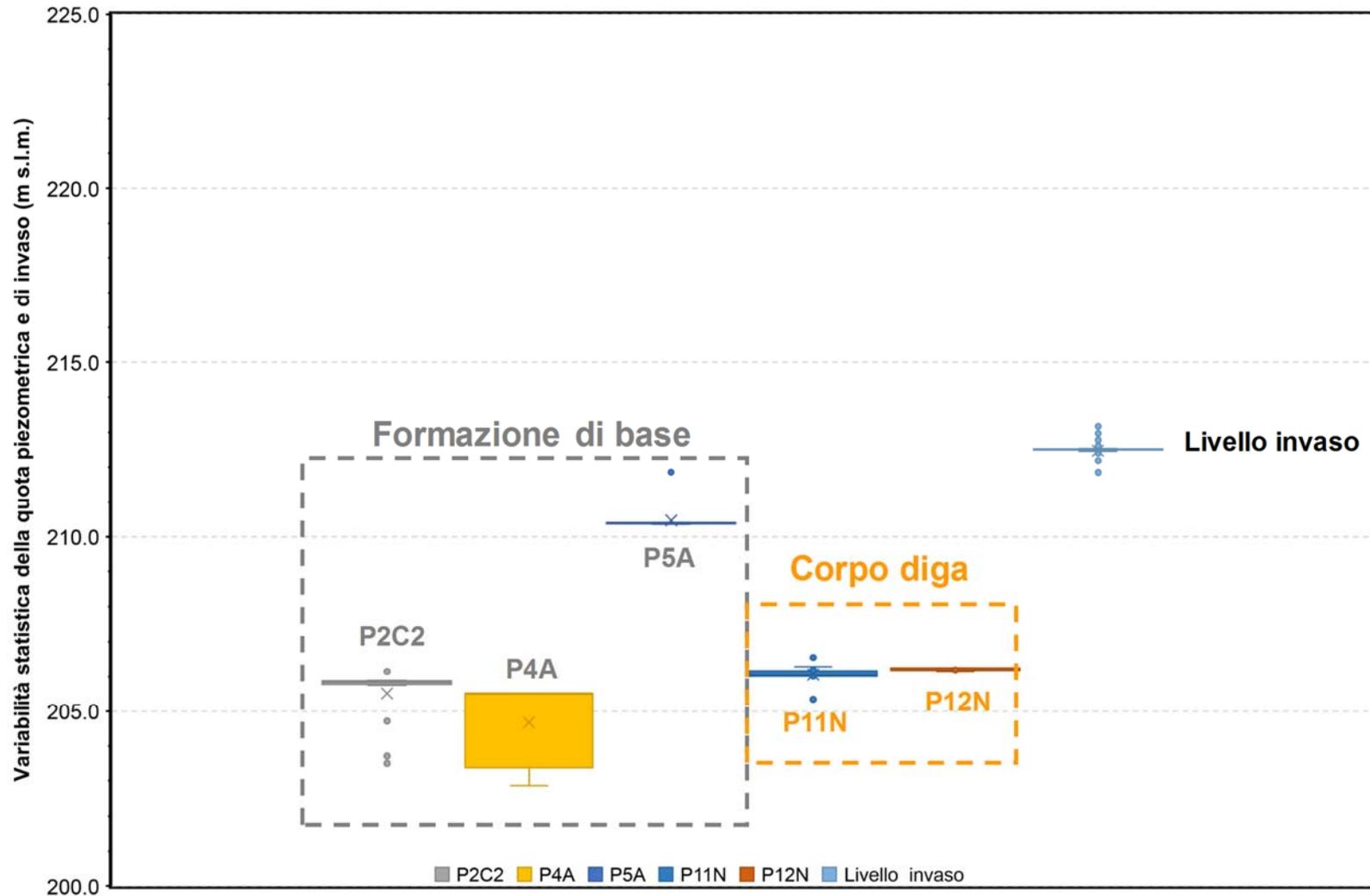


Fig. 9: variabilità statistica dei livelli piezometrici registrati nei piezometri installati sulla 2° banca, in confronto con quelli d'invaso. I box-plot sono stati raggruppati in base ai materiali interessati dalla cella di Casagrande (corpo diga e formazione di base). È possibile osservare che sia i piezometri installati nell'ambito del corpo diga che quelli installati nella formazione di base indicano livelli inferiori a quelli d'invaso.

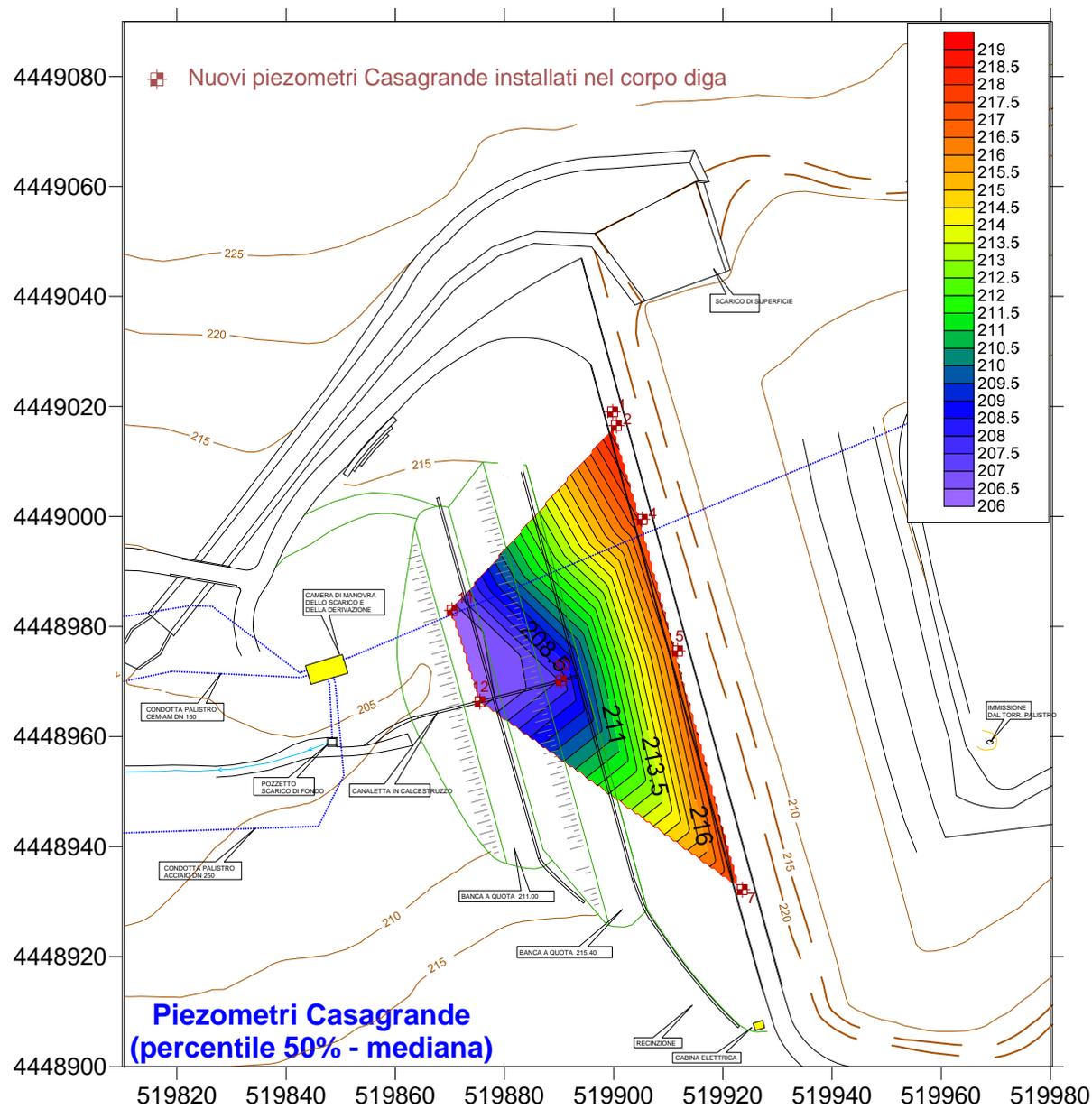


Fig. 10: distribuzione spaziale dei livelli piezometrici registrati nell'ambito del corpo diga (valori mediani della serie di misure effettuate).

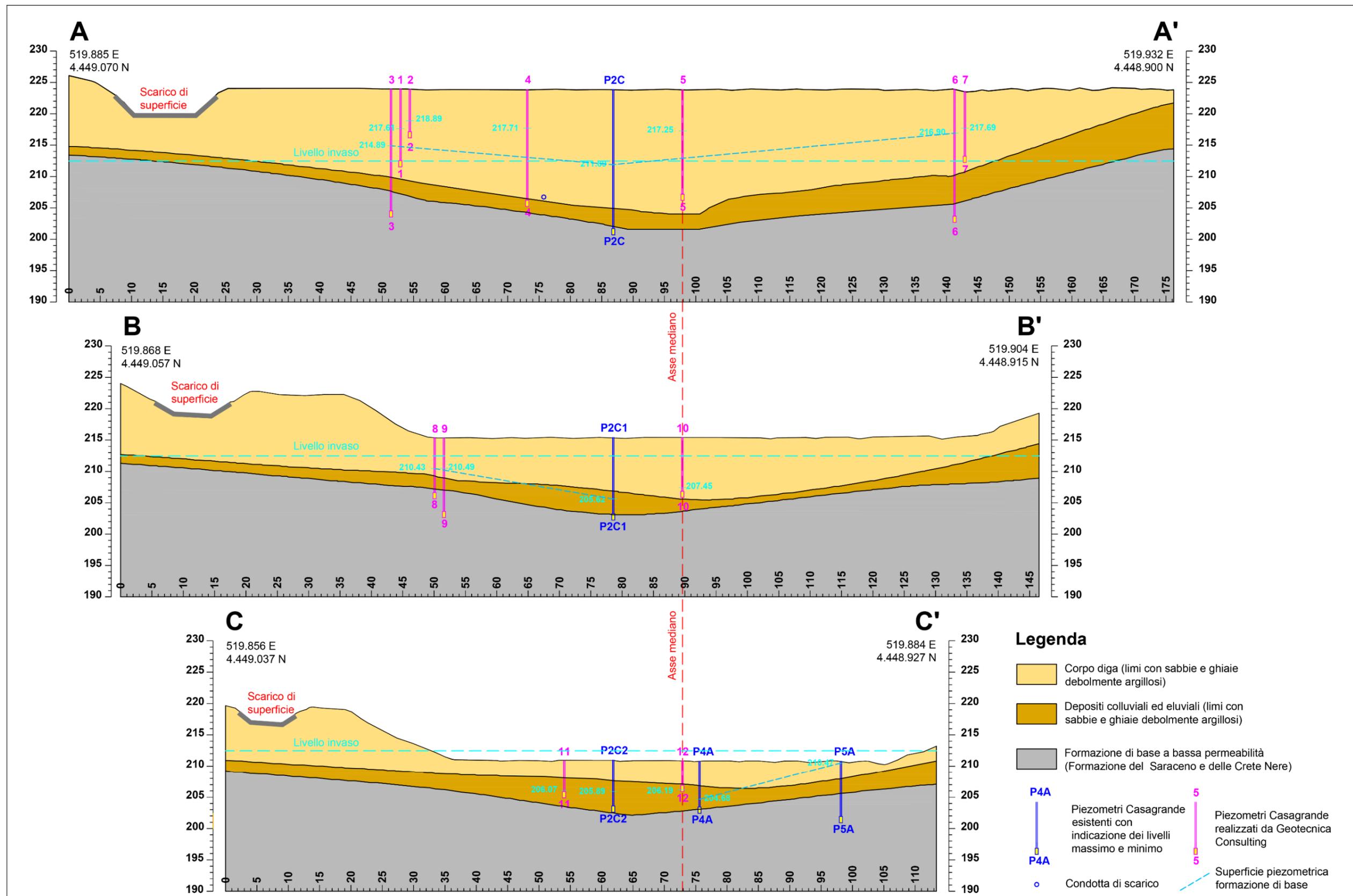


Fig. 12: ricostruzione delle sezioni geologiche attraversanti longitudinalmente il corpo diga (A-A', coronamento; B-B', 1° banca; C-C', 2° banca) con ubicazione dei piezometri Casagrande esistenti e di quelli installati, nel corpo diga e nella formazione di base. I segmenti orizzontali ed i numeri in colore azzurro indicano i valori medi dei livelli piezometrici registrati. Sono anche riportati, laddove ricostruibili, i profili piezometrici riferiti ai piezometri installati nella formazione di base.

4. CONCLUSIONI

Dalle indagini stratigrafiche, effettuate per la realizzazione dei nuovi piezometri Casagrande, e dalle prove di caratterizzazione e classificazione geotecnica di campioni indisturbati sono stati definiti i punti salienti di seguito descritti.

- 1) Il corpo diga appare omogeneamente caratterizzato da terre a comportamento coesivo, a prevalente matrice limoso-argillosa e subordinata frazione elastica sabbioso-ghiaiosa. Nella maggior parte dei casi, le terre sono classificabili come a grana fine (passante al N. 200 ASTM $\geq 50\%$), variabili dalle argille di bassa plasticità (CL) alle argille di alta plasticità (CH) e, nei pochi casi in cui sono classificabili come terre a grana grossa (passante al N. 200 ASTM $< 50\%$), essi sono associabili a sabbie con limo e argilla di bassa plasticità (SM). Anche in questi ultimi casi, la matrice limosa è presente in maniera molto significativa tanto da limitare fortemente la conducibilità idraulica.
- 2) La caratterizzazione del contenuto d'acqua naturale (w) e dei limiti di Atterberg (w_L e w_P) ha consentito di stimare l'indice di consistenza che, in numerosi casi è inferiore al 100%, indicando uno stato solido-plastico.
- 3) L'esecuzione delle prove penetrometriche statiche (CPTE 1 e CPTE 2) ha evidenziato la presenza di terre coesive variabili prevalentemente nel campo delle argille e dei limi, con livelli contraddistinti da consistenza variabile da compatta fino a bassa. In particolare, il valore molto basso di resistenza alla punta (q_c) riscontrato in alcuni intervalli stratigrafici ha indotto a classificare le terre, sulla base dei correnti schemi interpretativi delle prove CPTE, come organiche (torbe). Ciò ovviamente appare incompatibile con la natura dei terreni e pertanto induce a considerare che tali livelli siano caratterizzati da bassa consistenza, così come è stato possibile dedurre al rifluimento plastico del materiale nel carotiere, osservato durante le operazioni di carotaggio di alcuni orizzonti.
- 4) Tutte le osservazioni e determinazioni descritte nei punti precedenti portano ad escludere la presenza di orizzonti ghiaioso-sabbiosi a maggiore permeabilità.
- 5) L'esecuzione delle cinque prove di infiltrazione in foro, a carico variabile discendente di tipo Le Franc, ha evidenziato valori di conducibilità idraulica (1×10^{-5} cm/s) più elevati di quelli ricavati in precedenza dalle prove di *slug test*, effettuate sui piezometri a tubo aperto (1×10^{-6} cm/s ÷ 1×10^{-9} cm/s). Tale maggiore permeabilità sembrerebbe essere correlata ai livelli a minore grado di consolidazione in cui potrebbero permanere vuoti interconnessi (macropori). Tuttavia, tale condizione di permeabilità relativamente più elevata appare essere limitata al nucleo della diga, essendo provata la tenuta idraulica della stessa dai

numerosi anni di esercizio.

L'esame delle misure piezometriche, effettuate sulla nuova rete di piezometri Casagrande, comprendente i cinque preesistenti ed i dodici di nuova installazione, ha consentito di acquisire informazioni evidenziate nei punti di seguito descritti.

- 1) I livelli piezometrici osservati nelle celle installate nell'ambito del corpo diga ed in asse con il coronamento si attestano a quote superiori a quelle d'invaso.
- 2) I livelli piezometrici osservati nelle celle installate nell'ambito del corpo diga ed in asse con la 1° e 2° banca si attestano a quote inferiori a quelle d'invaso.
- 3) L'interpolazione spaziale dei livelli piezometrici misurati nel corpo diga indica un alto piezometrico in corrispondenza del coronamento, con gradiente trasversale trascurabile lungo la direzione dello stesso ed un rapido declino delle quote piezometriche verso valle, fino a valori inferiori a quelli d'invaso. Da tali osservazioni è possibile dedurre che:
 - la condizione anomala di livelli piezometrici superiori a quelli d'invaso è riscontrabile solo in corrispondenza del nucleo centrale della diga, in asse con il coronamento;
 - non si evidenzia un gradiente idraulico lungo il coronamento che possa giustificare un'alimentazione preferenziale proveniente dalla sponda in destra idrografica o da quella sinistra, che sarebbe in ogni caso fortemente limitata dalla bassa conducibilità idraulica dei materiali costituenti il corpo diga.
- 4) I livelli piezometrici osservati nell'ambito della formazione di base indicano valori compatibili con il tipico schema di circolazione dei terreni a bassa permeabilità, caratterizzato da un deflusso orientato dai versanti verso il fondovalle. Quindi, in tale contesto i livelli piezometrici registrati in prossimità delle sponde sono più elevati di quelli misurati in asse con la valle. Solo i livelli registrati nei piezometri P3N e P6N, realizzati sul coronamento e maggiormente prossimi alle sponde, si attestano a quote superiori a quelle d'invaso.
- 5) Le quote piezometriche riscontrate nell'ambito dei materiali del corpo diga sono costantemente più elevate di quelle riscontrate nella formazione di base, se confrontate sulla stessa sezione trasversale (coronamento, 1° banca e 2° banca). Ciò porta ad escludere la presenza di una falda in pressione nell'ambito dei terreni di substrato che rappresenterebbe una condizione potenzialmente pericolosa per la stabilità dell'opera.
- 6) Le misure finora effettuate sui piezometri Casagrande, ed in particolare in quelli con celle installate nei materiali del corpo diga, si riferiscono ad un periodo non influenzato da

precipitazioni (giugno-settembre 2021). Pertanto, al momento non è possibile stabilire il regime delle pressioni di poro nell'ambito del corpo diga ed il grado di connessione dello stesso con quello delle precipitazioni. Questo aspetto è fondamentale per la comprensione della natura ed origine della circolazione idrica nell'ambito del corpo diga che, in base ai dati finora acquisiti, appare attribuibile alla presenza di sacche di acqua gravifica confinate nell'ambito dei materiali a bassa permeabilità del corpo diga e pertanto caratterizzata da estrema lentezza.

Prof. Geol. Pantaleone De Vita

Pantaleone De Vita



Dr. Geol.
Pantaleone
DE VITA
Elettico Spec. N°
163
Regione Campania