



CONSORZIO di BONIFICA dell' EMILIA CENTRALE

Corso Garibaldi n. 42 42121 Reggio Emilia - www.emiliacentrale.it - protocollo@pec.emiliacentrale.it
Tel. 0522-443211 Fax. 0522-443254 C.F. 91149320359

M - PRG.
18.01

Rev. 3
del
01.04.2019

Titolo: Legge n°205/2017 art.1 comma 518. Primo Stralcio del Piano Nazionale degli interventi nel settore idrico – sezione "invasi"

REALIZZAZIONE DI UNA CASSA DI ESPANSIONE PER LAMINAZIONE DELLE PIENE E ACCUMULO IDRICO A SCOPO IRRIGUO CAVO BONDENO IN COMUNE DI NOVELLARA (RE) - CODICE 518/5

Importo: €. 10.000.000,00				Ente Finanziatore: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti	
Tipologia Progetto				Riferimento Legislativo	Comune
Fattibilità	Definitivo	Esecutivo	Contabilità	Legge n.205/2017 e Legge n. 145/2018	NOVELLARA (RE)
	X				

ALLEGATI:

Allegato n.	Titolo:
2	RELAZIONI SPECIALISTICHE
Tavola:	Oggetto:
.1	RELAZIONE GEOLOGICA
Scala:	

Il Progettista Generale:
Dott. Ing. Matteo Giovanardi

mgiovanardi@emiliacentrale.it

Collaboratori alla Progettazione:
Dott. Geol. Cesare Sandoni



Il Responsabile del Procedimento:
Dott. Ing. Pietro Torri


ptorri@emiliacentrale.it

Area Progettazione: SLPP	Codice Progetto: 105/18/00	Codice CUP: G33H18000060001	Codice CIG:
------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	-------------

Redatto:	Verificato:	Nome File:	Note:

Data Progetto Originale: 16-12-2019	Data Aggiornamento: 16-12-2019
--	---------------------------------------

UNI EN ISO 9001:2015

UNI EN ISO 14001:2015

OHSAS 18001:2007



RELAZIONE GEOLOGICA

INERENTE LA CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA E STRATIGRAFICA
DI SOTTOSUOLO, CASSA DI ESPANSIONE AL CAVO BONDENO E AFFLUENTI
STRADA DELLA VITTORIA, COMUNE DI NOVELLARA (RE)

Committente: **CONSORZIO DI BONIFICA DELL'EMILIA CENTRALE**

Località: Strada della Vittoria

Comune: Novellara (RE)

Data: Ottobre 2020

INDICE

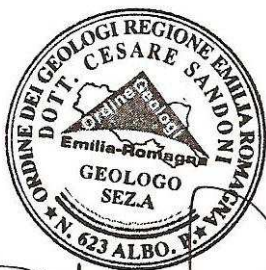
- 1- Premessa
- 2- Inquadramento Geografico
- 3- Descrizione dell'Opera di Progetto
- 4- Inquadramento Litomorfologico
- 5- Indagini Geognostiche
- 6- Indagini Sismiche a Rifrazione con Metodo MASW
- 7- Considerazioni Tecniche
- 8- Conclusioni

ALLEGATI

- * Inquadramento Geografico Scala 1:20.000
- * Foto Satellitare da Google Earth
- * Carta Geologica Regione Emilia-Romagna Scala 1:20.000 (Estratto)
- * Carta CTR Scala 1:10.000 – Ubicazione Indagini Geognostiche
- * Ubicazione Indagini Masw

IL TECNICO

LA COMMITTENZA



PRO-GE



STUDIO GEOLOGICO ASSOCIATO PRO-GEO

Viale L.A. Muratori n.100 - 41124 Modena

Tel. Fax. 059 239843 - P.I. 02148340363

progeostudio@alice.it - www.modenasitiweb.it-ospiti-



RELAZIONE GEOLOGICA
INERENTE LA CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA E STRATIGRAFICA
DI SOTTOSUOLO, CASSA DI ESPANSIONE AL CAVO BONDENO E AFFLUENTI
STRADA DELLA VITTORIA, COMUNE DI NOVELLARA (RE)

I. PREMESSA

Su incarico del *Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale*, si è provveduto a produrre la seguente relazione incentrata sulla caratterizzazione del modello geologico di sottosuolo di un'area posta lateralmente a Strada della Vittoria, nel territorio comunale di Novellara, dove si intende realizzare una cassa di espansione al Cavo Bondeno e affluenti.

Per l'elaborazione dei dati riguardanti la caratterizzazione geologica si è analizzata la campagna geognostica prodotta nell'anno 1991-1992 a cura del Dott.Professore Maurizio Pellegrini, allora docente della cattedra di Geologia Applicata all'Università degli studi di Modena e dell'Ing.Salvatore Vera.

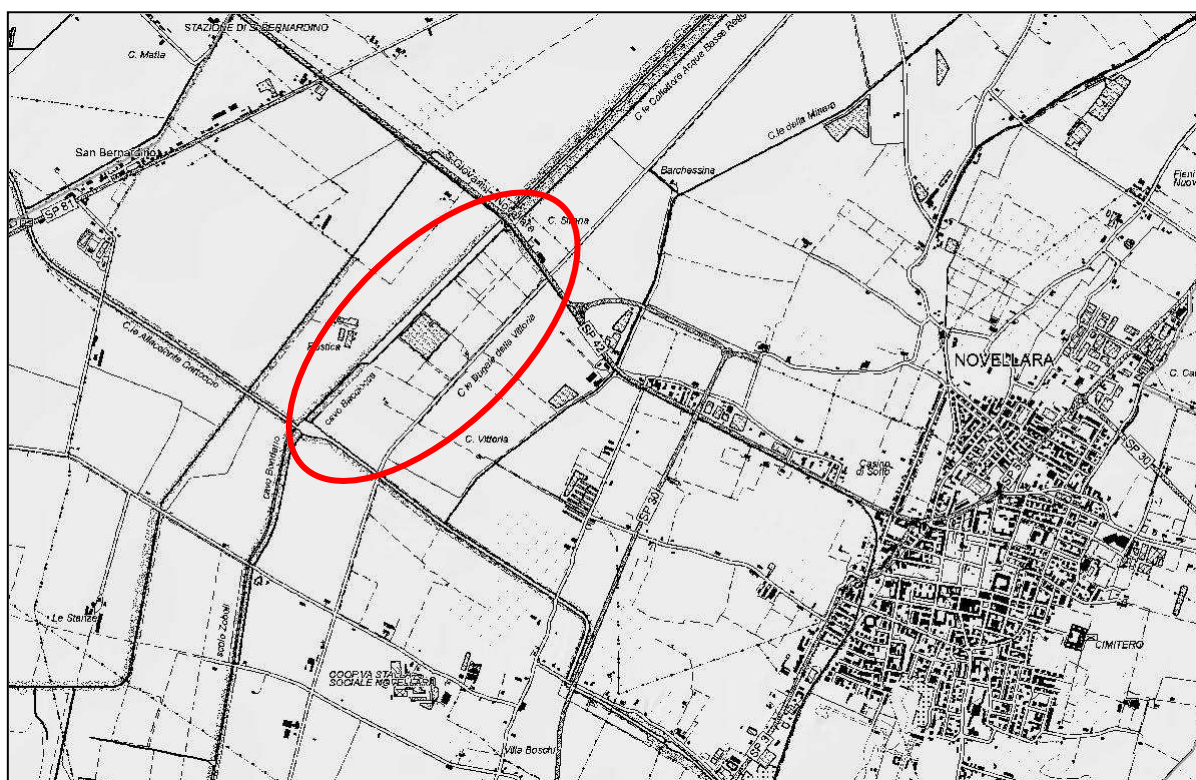
Per l'elaborazione dei dati riguardanti la caratterizzazione sismica con riguardo alla definizione della categoria di sottosuolo sismico secondo NTC 2018, nel maggio 2018 furono prodotti n.4 stendimenti sismici MASW, spazati sulla superficie, con ubicazione concordata con la Committenza; dei risultati ottenuti si espone in riepilogo nella presente relazione.

x_emiro.Giunta - Prot. 18/01/2022.0041094.E Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da GIOVANARDI MATTEO, SANDONI CESARE


La superficie, molto estesa, è approssimabile ad un'area rettangolare, indirizzata ad agricolo con campi coltivati nella porzione SW e per lo più confinata con zone umide e acquitrinose nella restante parte NE.

Sulla base della normativa relativa al problema sismico, il comune di Novellara compare nell'elenco delle località di zona 3, come richiamato dall'OPCM n.3274 in data 20/03/2003.

Cartograficamente la superficie in esame è ubicata nella tavola C.T.R. 183 SO “Novellara” a scala 1:25.000, nella sezione C.T.R. 183090 “San Bernardino” a scala 1:10.000 e nell’elemento C.T.R. 183093 “San Bernardino” a scala 1:5.000.



INQUADRAMENTO GEOGRAFICO SCALA 1:20.000

 Area in esame

3. DESCRIZIONE DELL'OPERA DI PROGETTO

Il Cavo Bondeno inizia il suo percorso a nord di Reggio Emilia, si muove con andamento sinuoso in direzione nord-est, verso le Valli di Novellara, per circa 11 Km fino a giungere alla Parmigiana-Moglià.

Il progetto prevede la realizzazione di una Cassa di Espansione delimitata da arginature di contenimento, realizzate in terra battuta prelevata in loco.

Lo schema progettuale prevede la realizzazione di un cassonetto di appoggio del rilevato della profondità di circa mt.1,00; su tale piano di scavo, che consentirà di eliminare la fascia agraria e quella areata, verranno eretti i corpi arginali aventi una larghezza in testa di mt.5,00 e sponde con pendenze medie date dal rapporto di 1/2,5.

La quota finale della testa dell'argine è prevista a mt.21,50 s.l.m., per una superficie di potenziale invaso che ad ora risulta quotata a circa m.17,50-18,00 s.l.m.

Il corpo arginale verrà prodotto utilizzando i terreni in loco che saranno ricostituiti in rilevato secondo idonee tecniche di compattazione per strati, tenendo in considerazione la massima densità ottenibile in funzione del grado di umidità optimum (vedi successive prove di costipazione Proctor).



FOTO SATELLITARE DA GOOGLE EARTH



Superficie da invasare

4. INQUADRAMENTO LITOMORFOLOGICO

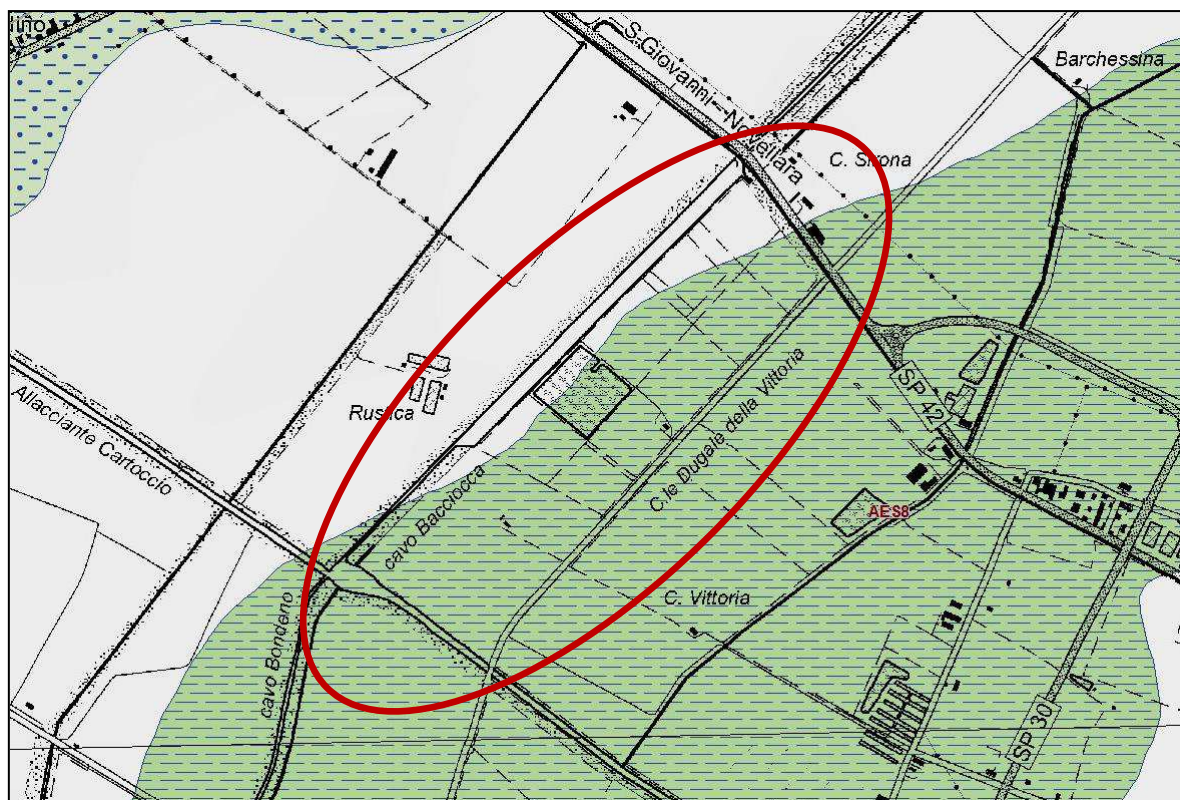
L'area di studio si inquadra geograficamente in ambito di media pianura alluvionale, su di una superficie connessa con le divagazioni di deposito del Tresinaro e del T.Crostolo e posta a margine del Cavo Bondeno passante con vettore idraulico prevalente da SW verso NE.

La consultazione della Cartografia Geologica e dei Suoli sul portale telematico della Regione Emilia-Romagna riporta la presenza di sedimenti fini dovuti a esondazioni fluviali, riconducibili a terreni che vengono attribuiti al Subsistema di Ravenna (AES8), formato da limi, sabbie ed argille di piana alluvionale a spessore massimo di circa mt.25,0 (Pleistocene-Olocene).

I terreni di tale contesto risultano a prevalente natura argillosa (Argille di Piana Alluvionale); il dato è confermato in base alla consultazione della *Carta Geologica Tecnica* del Comune di Novellara che riporta sul sito "Argille inorganiche di alta plasticità, argille grasse".

La situazione idrogeologica si evidenzia invece con un senso di scorrimento in direzione nord delle acque superficiali, riconducibili nel contesto esaminato a diversi canali di bonifica fra cui il principale è Il Cavo di Bondeno che borda il lato ovest della superficie in esame, oltre ad altri canali ad esso associato fra cui il Canale Dugale della Vittoria, il Canale della Minara, il Canale Allacciante Cartoccio, il Canale di Casaletto e altri canali minori.

I sedimenti alluvionali hanno un'orientazione deposizionale verso N-NE per effetto delle cicliche esondazioni dei corsi d'acqua.



CARTA GEOLOGICA REGIONE EMILIA-ROMAGNA SCALA 1:20.000 (Estratto)

AES8 – Subsistema di Ravenna

— Argille di Piana Alluvionale

○ Area in esame

Il settore di media pianura rappresenta l'unità idrogeologica con la minore disponibilità idrica se raffrontata al settore di alta e bassa pianura, dove le alluvioni sono prevalentemente caratterizzate da litologie medio fini, con presenza di locali lenti sabbiose per lo più discontinue.

Il modello idrogeologico del luogo è caratterizzato dalla presenza di alluvioni fini in superficie che ricoprono alluvioni incoerenti in prevalenza sabbiose quotate a diversi metri dal piano campagna; nella fascia di copertura fine non si esclude la presenza di lenti minori limo sabbiose arealmente discontinue dove si possono insediare acquiferi freatici o sospesi.

La consultazione della *Carta delle isopieze della falda* del Comune di Novellara caratterizza la superficie esterna più prossima al sito con una quota idrica di falda a circa mt.19 s.l.m. e segnala la presenza di una fascia di drenaggio idrico sotterraneo principale; la *Carta della soggiacenza della falda* del Comune di Novellara riporta sulla superficie una soggiacenza di mt.1,00-1,50 da p.c.

5. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Sulla scorta delle indagini eseguite nel corso dell'anno 1991-1992, come riportato in premessa, si riepilogano a seguire i risultati ottenuti e la conseguente definizione del modello litostratigrafico e geomeccanico di riferimento.

Sull'area in esame e per gli scopi di progetto fu prodotta la seguente campagna geognostica riportata su base topografica nella Cartografia CTR allegata:

- N.20 prove CPT spinte a mt.20 da p.c.
- N.4 prove CPTU spinte a mt.30 da p.c. (in ciascuna prova e/o a profondità significative sono state eseguite prove di dissipazione).
- N.1 sondaggio a carotaggio continuo spinto sino a mt.20 da p.c. con l'esecuzione di N.2 prove di permeabilità e il prelievo di N.2 campioni litologici indisturbati.
- N.12 trincee di scavo profonde mediamente mt.1,50 per consentire il campionamento del terreno di appoggio delle arginature, con il prelievo di N.12 campioni litologici rimaneggiati e di n.6 campioni litologici indisturbati.
- Prove fisico-meccanico su campioni di terreno ed in particolare N.12 Limiti di Atterberg e Peso di Volume, n.4 prove Proctor, N.4 prove edometriche, N.4 prove triassiali CIU (prova consolidata e non drenata) e N.3 prove triassiali UU (prova non consolidata e non drenata).

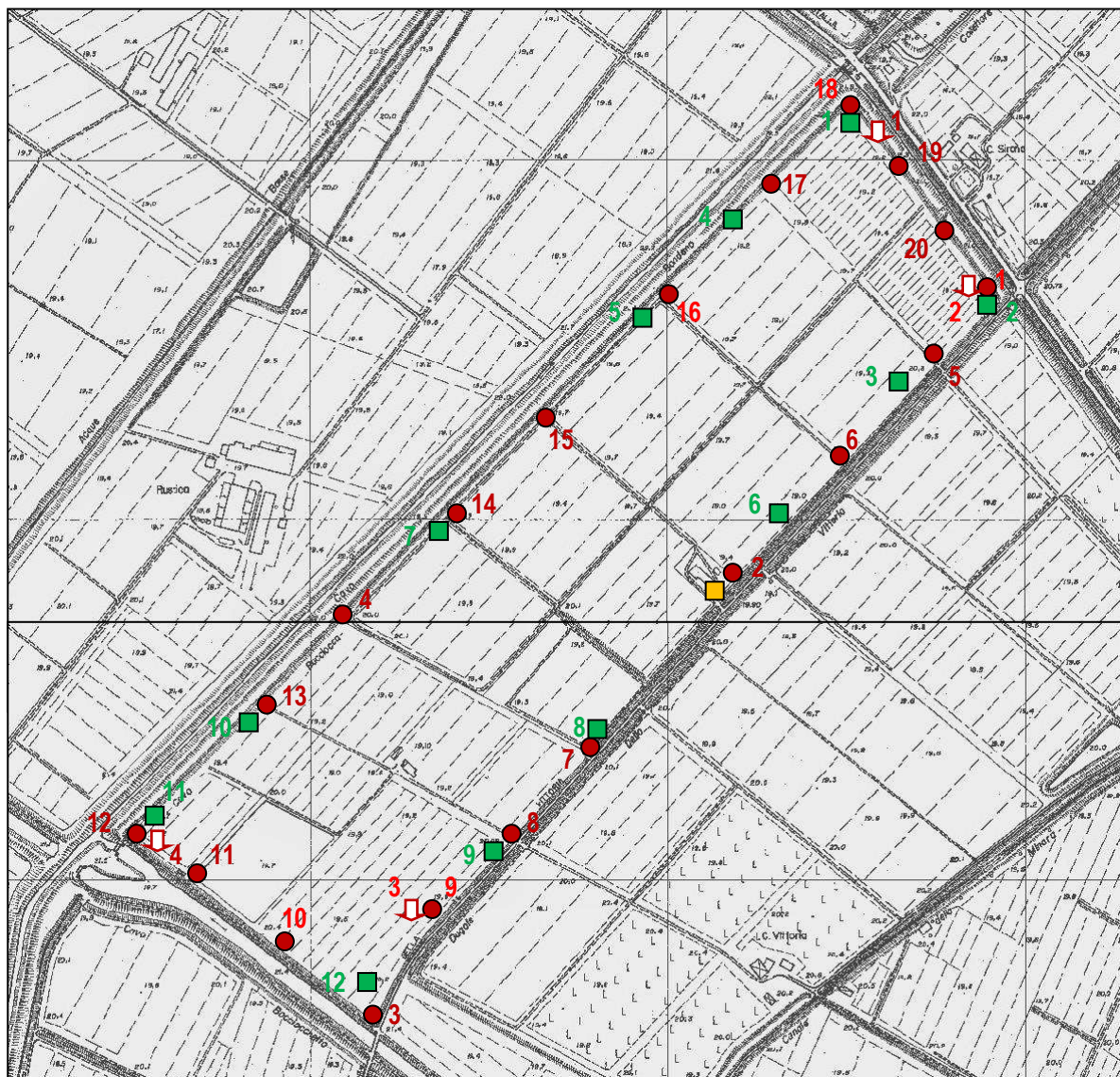
Per la consultazione dei diagrammi e certificati delle prove geognostiche eseguite nella campagna di indagini del 1991-1992, si rimanda alla Relazione Geologica e Geotecnica a cura di del Dott.Professore Maurizio Pellegrini e dell'Ing.Salvatore Vera.

Prove Penetrometriche

Caratteristiche stratigrafiche

Le prove penetrometriche riscontrarono un primo potente pacco alluvionale caratterizzato in prevalenza da sedimenti a tessitura fine argillosa con locali e radi orizzonti limo sabbiosi variamente distribuiti; a partire dalle quote di mt.18-20 da p.c. di intercettò un potente bancone di sabbie seguito sino a traguardo nelle ricognizioni CPTU N.1 e N.2, per circa mt.4,0 nella CPTU n.3, mentre nella n.4 non se ne rilevò traccia.

Prendendo in considerazione la parte terminale delle CPT, appare evidente che la presenza di questo bancone si localizza per lo più verso la metà NE della superficie e tende a ridursi in spessore nella restante parte dell'area indagata.

**CARTA CTR Scala 1:10.000 – UBICAZIONE INDAGINI GEOGNOSTICHE**

● Prova CPT ↘ Prova CPTU □ Sondaggio a carotaggio continuo ■ Trincee di scavo

Caratteristiche meccaniche

Prendendo in considerazione i valori di q_c (resistenza penetrometrica statica) dai diagrammi delle prove CPT e CPTU, il pacco alluvionale in prevalenza argilloso è suddivisibile in 4 differenti livelli:

- primo strato dello spessore circa mt.2-4 con valori di q_c compresi da 10-30 Kg/cm²;
- secondo strato con spessore di circa mt.7 con valori di q_c compresi da 10-16 Kg/cm²;
- terzo strato con spessore di circa mt.3-5 con valori di q_c compresi da 18-30 Kg/cm²;
- quarto strato con spessore di circa mt.6 con valori di q_c compresi da 10-18 Kg/cm².

Livello di falda

Le prove riscontrarono la presenza di un livello idrico di falda quotato a circa mt.3,0 da p.c. nei punti di ricognizione penetrometrica in cui è stato possibile rilevarlo ed in particolare in CPT1, CPT2, CPT3 e CPT4.

Sondaggio a carotaggio continuo

Nel febbraio 1992 venne realizzato un sondaggio a carotaggio continuo spinto sino a mt.20 da p.c. e ubicato come da planimetria allegata.

L'esito stratigrafico rinvenne sino alla quota di mt.17,40 da p.c. una sequenza di livelli in prevalenza argillosi; le misurazioni di pocket penetrometer indicarono valori rappresentati nel range di 0,6-2,0 Kg/cm², ad esclusione di un livello a maggiore consolidazione, poco oltre mt.10 da p.c. con valori compresi fra 2,4-3,0 Kg/cm².

A partire da mt.17,40 da p.c. e sino al termine di sondaggio si riscontrò un livello di limi sabbiosi e sabbie limose a colorazione grigiastrea, in accordo con quanto rilevato nelle ricognizioni penetrometriche.

Il sondaggio a carotaggio consentì il prelievo di N.2 campioni litologici indisturbati alle quote di mt.3,0-3,7 (C1) e di mt.11,0-11,7 (C2); il livello idrico segnalato nella colonna di sondaggio fu posto alla quota di poco inferiore a mt.6,0 rispetto al p.c.

Trincee di scavo

Per caratterizzare i primi terreni furono aperte n.12 trincee di scavo sino alla profondità di circa mt.1,50 e sulla base degli scavi furono prelevati altrettanti campioni (T).

Ogni campione fu quartato e miscelato con altri due campioni secondo il seguente schema, definendo ulteriori n.4 campioni rappresentativi:

Campione Ta ottenuto da T1+T2+T3

Campione Tb ottenuto da T4+T5+T6

Campione Tc ottenuto da T7+T8+T9

Campione Td ottenuto da T10+T11+T12

Su alcuni dei singoli campioni non miscelati e sui n.4 campioni miscelati furono eseguite prove fisiche per la determinazione del contenuto d'acqua naturale, limiti di Atterberg e preso di volume; i risultati ottenuti sono sintetizzati in tabella seguente:

Campioni	Wn%	WL%	WP%	IP	IC	G (KN/mc)
T1	34	62	27	35	0,80	18,26
T2	29	66	22	44	0,84	18,90
T5	32	71	26	45	0,87	18,42
T8	28	64	22	42	0,86	18,57
T11	36	63	28	35	0,77	17,74
T12	28	64	28	36	1,00	18,73
Ta		71	25	46		
Tb	25	77	26	51	1,02	
Tc		62	23	39		
Td		71	28	43		

Wn=Contenuto d'acqua WL=Limite Liquido WP=Limite Plastico IP=Indice di plasticità IC=Indice di Consistenza G=Peso di Volume

In base ai valori dell'indice di plasticità si riscontrano termini da "plastici" (valori tra 15-40) e "molto plastici" (valori superiori a 40), tipi dei materiali argillosi.

In base all'indice di consistenza nel range di 0,77-1,02 i terreni sono inquadrabili nel stato di consistenza tra il solido plastico e il semisolido.

In base ai passanti al setaccio 200 e ai valori indici sopra esposti, i terreni sono classificabili come A-7-6 in base al sistema ASSHTO (CNR UNI 10006) e descritti come "terre argillose".

Sui campioni miscelati furono eseguite anche prove di costipamento (Prova Proctor) per determinare la condizione ottimale di costipamento in funzione del contenuto d'acqua, i cui risultati sono riassunti in tabella seguente:

Campione	Umidità ottima %	Densità secca max (KN/mc)	G (KN/mc)
Ta	15,9	16,78	19,44
Tb	17,5	16,93	19,89
Tc	17,8	16,91	19,91
Td	14,8	16,88	19,37
Valori mediati	16,5	16,87	19,65

La verifica del raggiungimento di valori prossimi alla massima densità di costipazione dovrà essere verificata nel corso delle operazioni di cantiere.

Prove di Permeabilità

Le caratteristiche di permeabilità del terreno su cui insisteranno i corpi arginali furono determinate, in riferimento agli strati più prossimi al p.c., attraverso tre tipi di prove:

- in sito, nel corso del sondaggio meccanico, mediante N.2 prove del tipo Lafranc;
- in sito, nel corso delle prove CPT, mediante N.4 prove di dissipazione;
- in laboratorio attraverso prove edometriche.

Nello schema seguente si riepilogano i risultati ottenuti attraverso le diverse metodologie di indagine; i valori sono espressi in cm/sec.

Profondità metri da p.c.	Punto di indagine	Dissipazione CPTU	Prova Lafranc	Prova edometrica
mt.1,50	Trincea 5			$1,32 \times 10^{-8}$
mt.1,50	Trincea 12			$2,26 \times 10^{-8}$
mt.3,0-3,7	Sondaggio			$1,12 \times 10^{-8}$
mt.3,0-4,0	Sondaggio		$1,87 \times 10^{-8}$	
mt.5,40	CPTU N.2	$1,64 \times 10^{-7}$		
mt.6,05	CPTU N.1	$1,26 \times 10^{-8}$		
mt.6,70	CPTU N.4	$6,50 \times 10^{-8}$		
mt.6,80	CPTU N.3	$9,80 \times 10^{-8}$		
mt.7,0-8,0	Sondaggio		$1,25 \times 10^{-9}$	
mt.11,0-11,7	Sondaggio			$2,92 \times 10^{-9}$

Attraverso diversi metodi di indagine si sono ottenuti risultati fra loro abbastanza omogenei che descrivono una permeabilità variabile da $1,67 \times 10^{-7}$ a $1,25 \times 10^{-9}$ cm/sec e pertanto valori molto bassi tipici dei materiali argillosi.

Prove meccaniche di laboratorio

La ricca raccolta di campioni litologici consentì di produrre delle mirate analisi di laboratorio geotecnico per la determinazione dei parametri meccanici utili all'impostazione delle verifiche di progetto.

In particolare si realizzarono:

- N.4 prove edometriche;
- N.4 prove triassiali CIU;
- N.3 prove triassiali UU.

Nella tabella a seguire si riportano gli esiti dei risultati delle prove meccaniche:

Provenienza campione	Campione	Profondità (mt)	Prova	C (KPa)	Φ (gradi)	C' (KPa)	Φ' (gradi)	Cu (KPa)	M (MPa)
Sondaggio	C1	3,00-3,70	CIU	20	14	19	18		
Sondaggio	C2	11,00-11,70	CIU	49	14	37	18		
Trincea	TB		CIU	43	17	36	18		
Trincea	TD		CIU	32	18	24	19		
Sondaggio	C1	3,00-3,70	UU					54	
Trincea	T5	1,50	UU					54	
Trincea	T12	1,50	UU					104	
Trincea	T5	1,50	Edometrica						4,6
Trincea	T12	1,50	Edometrica						
Sondaggio	C1	3,00-3,70	Edometrica						8,3
Sondaggio	C2	11,00-11,70	Edometrica						8,1

CIU – Prova Triassiale consolidata non drenata

UU – Prova Triassiale non consolidata e non drenata

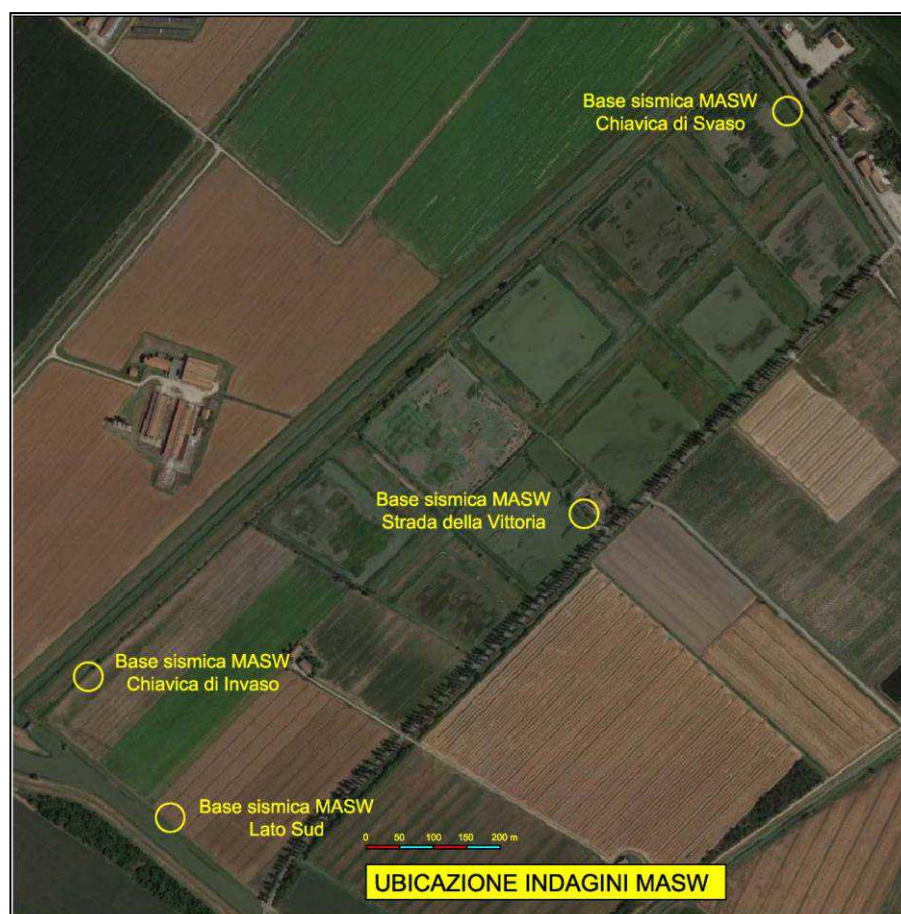
C=Coesione in termini di pressioni totali Φ =Angolo di attrito in termini di pressioni totali C'=Coesione in termini di pressioni efficaci

Φ' =Angolo di attrito in termini di pressioni efficaci Cu=Coesione non drenata M=(Modulo edometrico)

Nota: I campioni rimaneggiati TB e TD sono stati ricompattati e riconsolidati in laboratorio

6. INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE CON METODO MASW

Nel maggio del 2018 sull'area di riferimento furono prodotti n.4 stendimenti sismici a rifrazione, con determinazione sperimentale, mediante inversione (Metodo MASW), del valore di V_{s30} ; tale procedura ha quindi consentito di definire il profilo sismico verticale in onde S ai fini della determinazione della caratterizzazione sismica del terreno di fondazione ai sensi del testo unitario NTC 2018.



In riepilogo a seguire se ne riportano i risultati.

Gli stendimenti sismici furono denominati come segue:

- Stendimento 1 Chiavica di svaso
- Stendimento 2 Strada della Vittoria
- Stendimento 3 Stendimento lato sud
- Stendimento 4 Chiavica di invaso

Si riporta di seguito l'elaborazione dei dati e le caratteristiche degli stendimenti sismici effettuati.

Elaborazione Base Sismica Chiavica di Svaso

TABELLA DELLA VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO E CARATTERISTICHE DEGLI STRATI IN PROFONDITA'

G0: Modulo di deformazione al taglio (*);

Ed: Modulo edometrico (*);

M0: Modulo di compressibilità volumetrica (*);

Ey: Modulo di Young (*);

*) Valori validi per piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiori alla soglia elastica).

N.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	densità [Kg/cm³]	Coefficiente di Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	1.97	1.97	117.54	287.92	1800.00	0.40	24.87	149.22	116.06	69.64	23.00	52.62
2	7.97	6.00	130.87	320.57	1860.00	0.40	31.86	191.15	148.67	89.20	7.00	90.28
3	12.58	4.61	180.14	441.24	1870.00	0.40	60.68	364.07	283.17	169.90	20.00	449.56
4	18.11	5.53	187.91	460.27	1880.00	0.40	66.38	398.28	309.78	185.87	16.00	555.86
5	30.08	11.97	255.46	625.74	1890.00	0.40	123.34	740.03	575.58	345.35	58.00	2601.32
6	45.40	15.33	255.85	626.71	1900.00	0.40	124.38	746.26	580.42	348.25	36.00	2621.70
7	oo	oo	311.78	763.71	1910.00	0.40	185.67	1114.00	866.44	519.87	0.00	N/A

L'analisi dei risultati ottenuti dall'indagine MASW ha portato alla determinazione degli strati e delle velocità delle onde sismiche trasversali (V_s) fino a una profondità di **mt.45,40** dal piano campagna, profondità alla quale non si sono riscontrati valori di velocità superiori a 800 m/s, pertanto di seguito è stato calcolato il valore di $V_{s,30}$ a cui fare riferimento per la determinazione della categoria di sottosuolo.

Velocità onde Vs da elaborazione MASW				
Strato	Base strato [m]	h_i [m]	$V_{s,i}$ [m/s]	$h_i / V_{s,i}$ [s]
1	1.97	1.97	117.54	0.016760
2	7.97	6.00	130.87	0.045847
3	12.58	4.61	180.14	0.025591
4	18.11	5.53	187.91	0.029429
5	30.08	11.89	255.46	0.046543
6	45.40	0.00	255.85	0.000000

Calcolo del valore di $V_{s,30}$		
$V_{s,30}$ calcolato	182.74	[m/s]
Errore strumentale	0.054	[%]
$V_{s,30}$ - Max	182.84	[m/s]
$V_{s,30}$ - Min	182.64	[m/s]

Elaborazione Base Sismica Strada della Vittoria**TABELLA DELLA VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO E CARATTERISTICHE DEGLI STRATI IN PROFONDITA'**

G0: Modulo di deformazione al taglio (*);

Ed: Modulo edometrico (*);

M0: Modulo di compressibilità volumetrica (*);

Ey: Modulo di Young (*);

(*) Valori validi per piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiori alla soglia elastica).

N.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	densità [Kg/cm ³]	Coefficiente di Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	1.00	1.00	74.35	182.11	1800.00	0.40	9.95	59.70	46.43	27.86	3.00	5.27
2	6.74	5.74	137.27	336.24	1860.00	0.40	35.05	210.28	163.55	98.13	12.00	114.73
3	10.25	3.50	136.57	334.52	1870.00	0.40	34.88	209.26	162.76	97.65	5.00	111.81
4	12.75	2.50	177.38	434.50	1880.00	0.40	59.15	354.93	276.05	165.63	16.00	416.10
5	28.35	15.61	218.35	534.85	1890.00	0.40	90.11	540.66	420.52	252.31	28.00	1182.16
6	33.08	4.73	271.65	665.41	1900.00	0.40	140.21	841.26	654.31	392.59	63.00	3542.73
7	oo	oo	292.64	716.82	1910.00	0.40	163.57	981.41	763.32	457.99	0.00	N/A

L'analisi dei risultati ottenuti dall'indagine MASW ha portato alla determinazione degli strati e delle velocità delle onde sismiche trasversali (V_s) fino a una profondità di **mt.33,08** dal piano campagna, profondità alla quale non si sono riscontrati valori di velocità superiori a 800 m/s, pertanto di seguito è stato calcolato il valore di $V_{s,30}$ a cui fare riferimento per la determinazione della categoria di sottosuolo.

Velocità onde Vs da elaborazione MASW				
Strato	Base strato [m]	h_i [m]	$V_{s,i}$ [m/s]	$h_i / V_{s,i}$ [s]
1	1.00	1.00	74.35	0.013450
2	6.74	5.74	137.27	0.041815
3	10.25	3.51	136.57	0.025701
4	12.75	2.50	177.38	0.014094
5	28.35	15.60	218.35	0.071445
6	33.08	1.65	271.65	0.006074

Calcolo del valore di $V_{s,30}$		
$V_{s,30}$ calcolato	173.83	[m/s]
Errore strumentale	0.174	[%]
$V_{s,30}$ - Max	174.14	[m/s]
$V_{s,30}$ - Min	173.53	[m/s]

Elaborazione Base Sismica Lato Sud**TABELLA DELLA VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO E CARATTERISTICHE DEGLI STRATI IN PROFONDITA'**

G0: Modulo di deformazione al taglio (*);

Ed: Modulo edometrico (*);

M0: Modulo di compressibilità volumetrica (*);

Ey: Modulo di Young (*);

*) Valori validi per piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiori alla soglia elastica).

N.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	densità [Kg/cm ³]	Coefficiente di Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	1.29	1.29	83.94	205.62	1800.00	0.40	12.68	76.10	59.19	35.51	5.00	9.69
2	7.18	5.89	153.98	377.18	1860.00	0.40	44.10	264.61	205.81	123.48	22.00	204.38
3	13.60	6.42	154.25	377.84	1870.00	0.40	44.49	266.96	207.64	124.58	8.00	206.18
4	23.53	9.93	213.58	523.16	1880.00	0.40	85.76	514.55	400.21	240.12	28.00	1057.91
5	30.12	6.59	300.03	734.93	1890.00	0.40	170.14	1020.83	793.98	476.39	N/A	N/A
6	43.49	13.37	303.20	742.69	1900.00	0.40	174.67	1048.01	815.12	489.07	98.00	N/A
7	oo	oo	325.83	798.11	1910.00	0.40	202.77	1216.64	946.28	567.77	0.00	N/A

L'analisi dei risultati ottenuti dall'indagine MASW ha portato alla determinazione degli strati e delle velocità delle onde sismiche trasversali (V_s) fino a una profondità di **mt.43,49** dal piano campagna, profondità alla quale non si sono riscontrati valori di velocità superiori a 800 m/s, pertanto di seguito è stato calcolato il valore di $V_{s,30}$ a cui fare riferimento per la determinazione della categoria di sottosuolo.

Velocità onde Vs da elaborazione MASW				
Strato	Base strato [m]	h_i [m]	$V_{s,i}$ [m/s]	$h_i / V_{s,i}$ [s]
1	1.29	1.29	83.94	0.015368
2	7.18	5.89	153.98	0.038252
3	13.60	6.42	154.25	0.041621
4	23.53	9.93	213.58	0.046493
5	30.12	6.47	300.03	0.021565
6	43.49	0.00	303.20	0.000000

Calcolo del valore di $V_{s,30}$		
$V_{s,30}$ calcolato	183.71	[m/s]
Errore strumentale	0.078	[%]
$V_{s,30}$ - Max	183.86	[m/s]
$V_{s,30}$ - Min	183.57	[m/s]

Elaborazione Base Sismica Chiavica di Invaso**TABELLA DELLA VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO E CARATTERISTICHE DEGLI STRATI IN PROFONDITA'**

G0: Modulo di deformazione al taglio (*);

Ed: Modulo edometrico (*);

M0: Modulo di compressibilità volumetrica (*);

Ey: Modulo di Young (*);

*) Valori validi per piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiori alla soglia elastica).

N.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	densità [Kg/cm ³]	Coefficiente di Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	1.09	1.09	80.42	196.99	1800.00	0.40	11.64	69.85	54.33	32.60	5.00	7.81
2	2.68	1.59	137.26	336.23	1860.00	0.40	35.04	210.27	163.54	98.13	28.00	114.71
3	7.96	5.28	136.47	334.28	1870.00	0.40	34.83	208.96	162.53	97.52	8.00	111.42
4	17.92	9.96	194.78	477.12	1880.00	0.40	71.33	427.97	332.86	199.72	24.00	665.89
5	31.74	13.82	216.74	530.91	1890.00	0.40	88.79	532.72	414.34	248.60	22.00	1139.00
6	36.09	4.35	224.69	550.38	1900.00	0.40	95.92	575.55	447.65	268.59	19.00	1365.03
7	oo	oo	304.21	745.16	1910.00	0.40	176.76	1060.54	824.87	494.92	0.00	N/A

L'analisi dei risultati ottenuti dall'indagine MASW ha portato alla determinazione degli strati e delle velocità delle onde sismiche trasversali (V_s) fino a una profondità di **mt.36,09** dal piano campagna, profondità alla quale non si sono riscontrati valori di velocità superiori a 800 m/s, pertanto di seguito è stato calcolato il valore di $V_{s,30}$ a cui fare riferimento per la determinazione della categoria di sottosuolo.

Velocità onde Vs da elaborazione MASW				
Strato	Base strato [m]	h_i [m]	$V_{s,i}$ [m/s]	$h_i / V_{s,i}$ [s]
1	1.09	1.09	80.42	0.013554
2	2.68	1.59	137.26	0.011584
3	7.96	5.28	136.47	0.038690
4	17.92	9.96	194.78	0.051135
5	31.74	12.08	216.74	0.055735
6	36.09	0.00	224.69	0.000000

Calcolo del valore di $V_{s,30}$		
$V_{s,30}$ calcolato	175.75	[m/s]
Errore strumentale	0.059	[%]
$V_{s,30}$ - Max	175.85	[m/s]
$V_{s,30}$ - Min	175.65	[m/s]

In riepilogo, le basi sismiche con il metodo MASW hanno ottenuto i seguenti valori di $V_{s,30}$ (per successivo arrotondamento):

-Stendimento 1	Chiavica di svaso	$V_{s,30}$ =183 m/sec
-Stendimento 2	Strada della Vittoria	$V_{s,30}$ =174 m/sec
-Stendimento 3	Stendimento lato sud	$V_{s,30}$ =184 m/sec
-Stendimento 4	Chiavica di invaso	$V_{s,30}$ =176 m/sec

In merito alla categoria di sottosuolo sismico in base al punto 3.2.2. del D.M. 14.01.2018, si attribuiscono le seguenti categoria di sottosuolo:

-Stendimento 1	Chiavica di svaso	$V_{s30}=183$ m/sec	Categoria di sottosuolo C
-Stendimento 2	Strada della Vittoria	$V_{s30}=174$ m/sec	Categoria di sottosuolo D
-Stendimento 3	Stendimento lato sud	$V_{s30}=184$ m/sec	Categoria di sottosuolo C
-Stendimento 4	Chiavica di invaso	$V_{s30}=176$ m/sec	Categoria di sottosuolo D

La definizione del tipo di terreno e dei parametri caratteristici sismici del sottosuolo classificati come C e come D sono indicati al capo 3.2.2. (categorie di sottosuolo) delle NTC 2018 e così descritti:

Categoria C

-Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < Cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Categoria D

-Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.

Per pendii con inclinazione maggiore di 15 gradi la risposta sismica locale deve essere moltiplicata per un fattore S_T denominato coefficiente di amplificazione topografica (NTC 2018); per il sito in esame, disposto su di un'area subpianeggiante si assume **T_I con $S_T=1,0$** .

7. CONSIDERAZIONI TECNICHE

Il corpusco piano di indagini realizzato nel 1991-1992, integrato nel maggio 2018 da indagini sismiche con il metodo MASW, ha consentito di definire il modello litostratigrafico di sottosuolo e di caratterizzare da un punto di vista sismico l'ampia superficie in esame, in accordo con le NTC 2018.

Il modello geologico è contraddistinto da un potente spessore di alluvioni in prevalenza argillose, solo a luoghi inframmezzate da radi orizzonti di limi e limi sabbiosi; le alluvioni fini si spingono sino a circa mt.18-20 da p.c. dove si segnala il passaggio su banconi di sabbie, presenti in considerevole spessore, anche superiori a mt.10, nel settore NE della superficie e che via via tendono a ridursi in direzione SW.

I primi terreni, interessati dalle lavorazioni dell'opera, sia in termini di scavo che in quelli di riutilizzo dei materiali sterrati per la realizzazione delle arginature di contenimento, sono certamente costituiti da termini fortemente argillosi, in cui le prove sulle proprietà indici hanno determinato:

- valori alti del limite liquido (range WL 62%-77%);
- campi plastici da "plastici a "molto plastici (range IP 35-51);
- stati di consistenza tra il solido plastico e il semisolido (IC 0,77-1,02);
- terreni classificabili come A-7-6 in base al sistema ASSHTO (CNR UNI 10006) e descritti come "terre argillose".

In termini permeabilità della porzione superiore in base all'esame sui campioni prelevati in trincea T5 e T12 hanno fornito valori di circa $1-2 \times 10^{-8}$ cm/sec e pertanto tipici dei materiali argillosi; anche l'estensione di indagini in terreni più profondi ha confermato lo stesso ordine di valori di permeabilità.

Le prove meccaniche triassiali in condizioni consolidate e non drenate (CIU) e in condizioni non consolidate e non drenate, hanno fornito sui primi terreni di appoggio dei rilevati valori minimi di coesione efficace di 19 KPa, angolo di attrito di 18 gradi e coesione non drenata 54 KPa.

Per estendere le verifiche anche sia termini di rottura al collasso delle arginature che in termini di cedimento si sono inoltre forniti parametri di resistenza al taglio anche per i livelli più profondi, considerando che per l'estensione del piano di appoggio del rilevato (circa mt.25 in larghezza massima per altezze massime arginate di mt.3), sia il cuneo di rottura che i bulbi di sovrappressione si estenderanno per diversi metri nel sottosuolo.

A tal proposito, in base alle ricognizioni penetrometriche prodotte, il campo di sottosuolo indagato è stato suddiviso in n.5 strati:

-primo strato

argille prevalenti spessore circa mt.2-4 con valori di qc compresi da 10-30 Kg/cm²;

-secondo strato

argille prevalenti spessore di circa mt.7 con valori di qc compresi da 10-16 Kg/cm²;

-terzo strato

argille prevalenti spessore di circa mt.3-5 con valori di qc compresi da 18-30 Kg/cm²;

-quarto strato

argille prevalenti spessore di circa mt.6 con valori di qc compresi da 10-18 Kg/cm².

-quinto strato

sabbie con spessore da nullo all'estremità SO della superficie e crescente in direzione NE e sino a spessori superiori a mt. 10 all'estremità NE dell'area.

La superficie, già in alcune aree acquitrinosa e con specchi umidi, è contraddistinta da un livello freatico di poco soggiacente e/o sub affiorante; di questo aspetto si dovrà tenere in debito conto nelle fasi di scavo del piano di appoggio dei rilevati arginali.

In termini di parametri caratteristici, per le necessarie verifiche agli equilibri in SLU e SLE secondo le NTC 2018, si propende, secondo una stima ragionata e cautelativa che per il caso trattato riconosce valori del parametro di coesione efficace di picco nel complesso elevati in relazione anche alle resistenze alla penetrazione statica, di considerare i minimi determinati nelle prove specifiche e puntuali.

Per indirizzare la migliore compattazione dei rilevati arginali, mediante prove Proctor sino sono forniti i massimi valori di densità secca ottenibile in funzione di un grado di umidità optimum; i valori risultano ben allineati a conferma dell'uniformità litologica dei primi terreni alluvionali che verranno coinvolti nelle operazioni di scavo e ricompattazione.

Sulla scorta delle prospezioni sismiche eseguite si è fornita la modellazione sismica del luogo, caratterizzata da valori di V_{s30} variabili a seconda dei punti da 174 m/sec a 184 m/sec con attribuzione di categorie di sottosuolo C e D; in termini cautelativi risulterebbe pertanto opportuno considerare con il metodo semplificato NTC 2018 una categoria di sottosuolo D.

Le necessarie verifiche agli equilibri dell'opera in SLU e SLD, sia in campo statico che in campo sismico, dovranno tenere conto del quadro litostratigrafico presentato e dei parametri geomeccanici esposti considerati in termini caratteristici.

8. CONCLUSIONI

A riepilogo della presente si rileva in merito alle caratteristiche stratigrafiche, litomeccaniche e sismiche della superficie in esame:

- la presenza sull'area di una litologia alluvionale in prevalenza argillosa attribuita al Subsistema di Ravenna (AES8);
- la disposizione dell'area di intervento su superfici pianeggianti su di un'area nel complesso morfologicamente ribassata appartenente alle cosiddette Valli di Novellara ;
- in base agli esiti penetrometrici la presenza di un potente spessore di alluvioni in prevalenza argillose che si spinge sino a circa mt.18-20 da p.c., e sottolimitato da bancate sabbiose, presenti cospicuamente nel settore NE della superficie e che tendono a ridursi in spessore procedendo in direzione SO;
- la caratterizzazione della resistenza statica (qc) dei livelli sondati che mostra terreni nel complesso mediamente resistenti;
- la presenza di un livello idrico di falda quotato a circa mt.3,0 da p.c. nei punti di ricognizione penetrometrica in cui è stato possibile rilevarlo, su di una superficie in più parti paludosa e contraddistinta da una debole soggiacenza della falda;
- l'esame puntuale su campioni litologici che ha fornito proprietà indici tipiche dei materiali argillosi;
- la classificazione dei primi terreni che verranno ad essere riutilizzati nel componimento dei corpi arginali come A-7-6 in base al sistema ASSHTO (CNR UNI 10006);
- i bassi valori di permeabilità dei terreni, tipici di terreni argillosi;
- le proprietà litomeccaniche determinate in base a prove triassiali CIU e UU che hanno fornito alti valori di coesione e modesti valori dell'angolo di attrito frizionale;
- l'attribuzione di un sottosuolo sismico di categoria C e D e di una categoria topografica T1 secondo NTC 2018;
- la classificazione sismica della superficie inserita in zona 3 (Comune di Novellara) secondo OPCM n.3274/03.

Lo studio geologico prodotto nel 1991-1992 e corredato da una vasta campagna di indagini, ha consentito di elaborare il modello litostratigrafico di sottosuolo e ha permesso di riconoscere terreni adatti ad un uso secondo gli scopi progettuali.

La destinazione della superficie a potenziale invaso idrico, unite alla metodologia costruttiva, ne fanno considerare accettabile l'inserimento ambientale, decisamente esterno a insediamenti antropici e infrastrutture.

Attribuendo pertanto parere geologico favorevole alla realizzazione della superficie come invaso per un uso potenziale a cassa di espansione nei periodi di emergenza, si sottolinea l'importanza di una sua corretta costruzione secondo le regole d'arte nonché una sua verifica d'integrità periodica; indispensabile risulterà inoltre la verifica geologica di quanto asserito, rapportata soprattutto alla fase esecutiva dei lavori.

PRO-GEO S.G.A.
Dr.Geol.Cesare Sandoni

Modena, 30 Ottobre 2020

