

COMUNE



COMUNE DI BORNASCO  
Provincia di Pavia

COMMITTENTE



MICROSOFT 4825 Italy Srl  
Viale Pasubio, 21  
Milano

+39 02 38591444

PROGETTISTA



RKD Design Srl  
Piazza Pietro Merolli, 2  
Roma

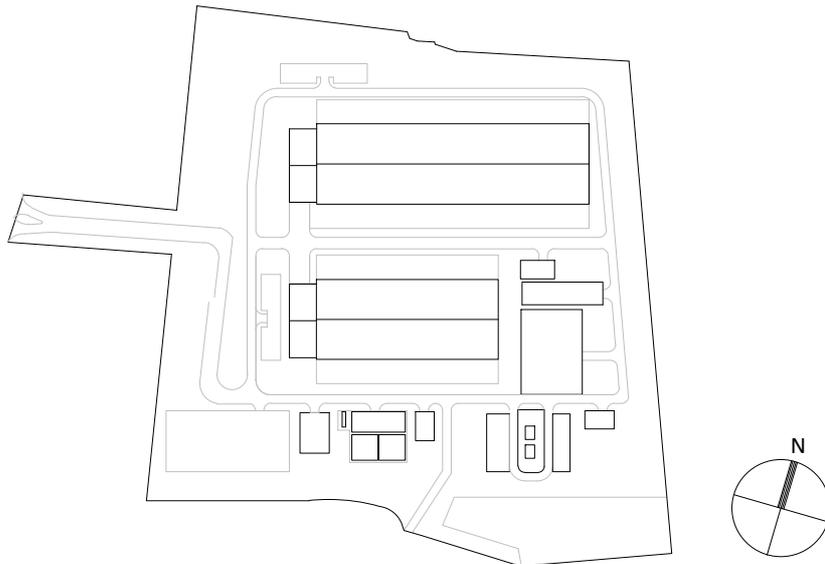
+39 345 2219472

Adottato dal Consiglio Comunale con deliberazione n° ..... in data .....

Pubblicato dal ..... al .....

Approvato definitivamente dal C. C. con deliberazione n° ..... in data .....

PIANTA CHIAVE



PROGETTO

PIANO ATTUATIVO AMBITO DI TRASFORMAZIONE ATP1 CON DESTINAZIONE PRODUTTIVA

PROGETTO N.

21170

INDIRIZZO

VIA DEI PIOPPI, BORNASCO

TITOLO

PIANO ATTUATIVO

DATA

02/02/2022

ELABORATO

RELAZIONE SULLA FATTIBILITA' GEOLOGICA - GEOTECNICA

NUMERO ELABORATO

MIL05-A-X-06

I diritti d'autore e la proprietà di questo disegno spettano a RKD Architects, il cui previo consenso scritto è necessario per il suo utilizzo, riproduzione o pubblicazione a terzi. Tutti i diritti riservati dalla legge sul diritto d'autore e dalle convenzioni internazionali sul diritto d'autore sono riservati a RKD Architects e possono essere protetti da procedimenti giudiziari di risarcimento per danni e/o ingiunzioni e spese. I sistemi di gestione della qualità di RKD Architects sono certificati ISO 9001:2015.

Tutte le dimensioni devono essere controllate in situ. Le quote figurate hanno preferenza sulle dimensioni in scala. Eventuali errori o discrepanze dovranno essere riportati agli architetti. Questo disegno non sarà editato o modificato dal destinatario.

A4

Bornasco ,02/12/2021

Spettabile  
Microsoft 4825 Italy S.r.l.  
Viale Pasubio 21  
20154 Milano

Oggetto: indagine geologica, geotecnica e sismica per la progettazione dell'ambito di trasformazione produttiva ATP 1 sito nel comune di Bornasco (Pavia)

Egregi Signori,

il sottoscritto Dott. Angelo Scotti, iscritto all'ordine dei geologi della Lombardia al n. 763, con studio in via Lungo Adda 24, Pizzighettone (Cremona), nel corso del maggio 2017 ha svolto un'indagine geologica, geotecnica e sismica per la progettazione dell'ambito di trasformazione produttiva ATP 1 sito nel comune di Bornasco (Pavia) identificato al catasto terreni di tale comune al foglio 14, mappali 31 e 32 ("Area") per conto degli allora proprietari, signori Broglia ("Committenti").

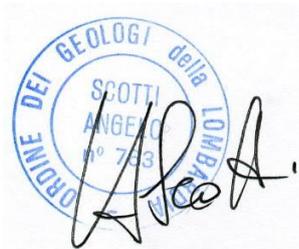
I risultati dell'indagine sono stati descritti nella relazione che si allega quale Allegato 1 ("Relazione").

A seguito di acquisto dell'Area da parte della Vostra società, mi è stato richiesto di mettervi a disposizione la Relazione, per poterla utilizzare nell'ambito del procedimento urbanistico che Microsoft 4825 Italy S.r.l. ha avviato per lo sviluppo edilizio dell'Area.

Alla luce della Vostra richiesta, con la presente Vi confermo che siete autorizzati ad utilizzare la relazione per le Vostre finalità, nel limite di quanto previsto dalla legge, fermo restando che quanto descritto nella Relazione fa riferimento alla situazione rilevata nel maggio 2017 e alle procedure richieste dall'allora vigente normativa nazionale e regionale.

Cordiali saluti

Dott. Angelo Scotti – Geologo

A circular blue ink stamp from the "ORDINE DEI GEOLOGI della LOMBARDIA" with the name "SCOTTI ANGELO" and number "n° 763" in the center. Overlaid on the stamp is a handwritten signature in black ink that reads "A. Scotti".

Consenso dei committenti

Andrea Broglia

Annibale Broglia

Carlo Broglia

# INDAGINE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA PER LA PROGETTAZIONE DELL'AMBITO DI TRASFORMAZIONE PRODUTTIVA APT 1

Bornasco (Pv), foglio 14 mappali 31 e 32

§§ 6.1.2 E 6.2.1 NTC 2008, CAPITOLO 4 DGR LOMBARDIA IX/2616 2011: R1 ED R3 DELL'ALLEGATO C, MODULO 1 DGR 5501/2016  
§§ 6.1.2 E 6.2.2 NTC 2008 : R2 DELL' ALLEGATO C, MODULO 1 DGR 5501/2016

piezometro sonda MASW 16 M



*Piezometro Pz 1 posato presso la prova penetrometrica statica **CPT 1** (area a nord del PL); a destra prova **CPT 2** dove è stato collocato il Piezometro Pz 2 (area a sud del PL);*

COMMITTENTE: Sigg. Broglia Andrea, Annibale e Carlo

maggio 2017

## SOMMARIO

1	RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA Premessa, inquadramento e metodi .....	3
2	Caratteristiche geologiche .....	7
2.1	<i>Aspetti geomorfologici e litostratigrafici</i> .....	7
2.2	<i>Aspetti idrogeologici</i> .....	10
2.3	<i>Classi di fattibilità geologica</i> .....	12
3	Aspetti sismologici e risposta sismica locale.....	14
3.1	<i>Riferimenti normativi</i> .....	14
3.2	<i>Stima del rischio di liquefazione</i> .....	17
4	Conclusioni sugli aspetti geologici e sismici.....	18
5	RELAZIONE GEOTECNICA: stratigrafia locale .....	20
5.1	<i>Cenni sulla tecnica delle prove penetrometriche statiche</i> .....	20
5.1.1	Descrizione del metodo di esecuzione delle prove .....	20
5.1.2	Aspetti generali dell'elaborazione di prove statiche .....	20
5.2	<i>Esito della prova penetrometrica e successione litostratigrafica</i> .....	22
6	Conclusioni sugli aspetti geotecnici .....	29
7	Allegati .....	29

# 1 RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA Premessa, inquadramento e metodi

La relazione è redatta su incarico della proprietà e descrive i caratteri litostratigrafici, geotecnici e sismici dei terreni **interessati dall'Ambito** di trasformazione produttiva ATP 1 in Comune di Bornasco (Pv).

La superficie interessata, costituita da un poligono circa quadrato di 160.800 mq sorge **poco a nord dell'area industriale La Fornace**, nella porzione sud occidentale del territorio comunale, in una zona pianeggiante che sulla restituzione aerofotogrammetrica comunale presenta quote complessivamente comprese tra **83,3 e 85,6 m s.l.m.** e un'acclività compresa tra 1,5‰ e il 3,0 ‰ in direzione SE e est, rappresentando il centro dell'area come un lieve rialzo sui terreni circostanti.

La carta tecnica regionale indica invece quote costanti, comprese tra 83,3 e 83,6 m s.l.m., ma anche in questo caso si denota un lieve acclività verso est e sud est.

Non è possibile determinare, con i dati ora disponibili, se il rialzo indicato nel primo documento sia attribuibile ad errori di misura o se lo spianamento dei campi abbia prodotto il risultato osservato con la CTR.

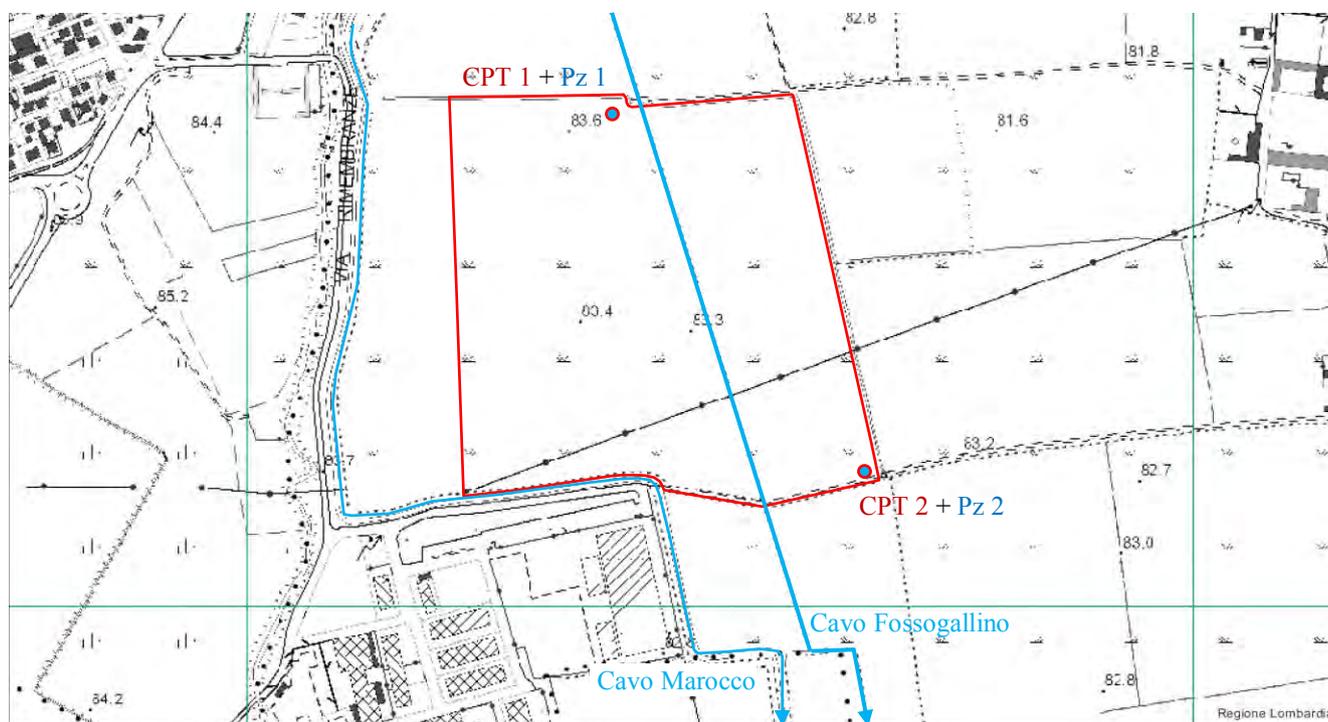


Figura 1: lotto in esame su CTR regionale con indicazione delle prove CPT e relativi piezometri scala 1:8000.

- Ubicazione di un pozzo per acqua la cui stratigrafia è riportata in Figura 3.

Il territorio si colloca **circa al centro della media pianura pavese**, sui depositi tardo pleistocenici del *livello fondamentale della pianura* sicuramente appartenenti al bacino del fiume Olona e interposta tra le depressioni del fiume Lambro Meridionale che scorre 5,5 km a NE e il fiume Ticino presso Pavia, circa 9 Km a SW.

La superficie è delimitata a nord da una roggia di circa 4,5 metri di ampiezza che è

priva di nome nei documenti consultati (tra cui lo studio geologico di PGT, novembre 2008 a cura del Dott. Felice Sacchi), in parte del confine sud ovest dal Cavo Marocco (sempre secondo il PGT) e a est dalla prosecuzione lungo quel lato della roggia senza nome che forma il limite nord.



Figura 2: roggia lungo il confine est della lottizzazione vista da sud, in corrispondenza del punto di prova CPT 2 e piezometro Pz 2 (freccia)

Per caratterizzare l'area sotto il profilo stratigrafico e idrogeologico, in data 25 maggio 2017 sono state eseguite due prove penetrometriche statiche CPT con punta meccanica Begemann nelle posizioni indicate in Figura 1.

La prima è stata approfondita 9,8 metri dal piano campagna ipotizzato a quota di **83,6** m s.l.m. per la presenza di un punto quotato CTR nelle vicinanze, la seconda a -7,8 metri dal piano campagna ipotizzato a **83,2** m s.l.m. per la presenza di un punto quotato CTR sulla strada circa 90 metri ad est.

Nel foro delle prove CPT sono stati collocati altrettanti micropiezometri (**Pz 1, 2**) alla profondità di -5,0 metri dalla superficie, che hanno consentito di rilevare la falda alle quote di seguito indicate.

Micropiezometro	Soggiacenza da p.c.	Quota stimata s.l.m.
<b>Pz 1</b>	<b>-3,20</b>	<b>80,4</b>
<b>Pz 2</b>	<b>-3,50</b>	<b>79,7</b>

Tabella 1: misure della quota di falda nei micropiezometri Pz 1 e Pz 2 eseguiti e misurati in data 25.05.17.

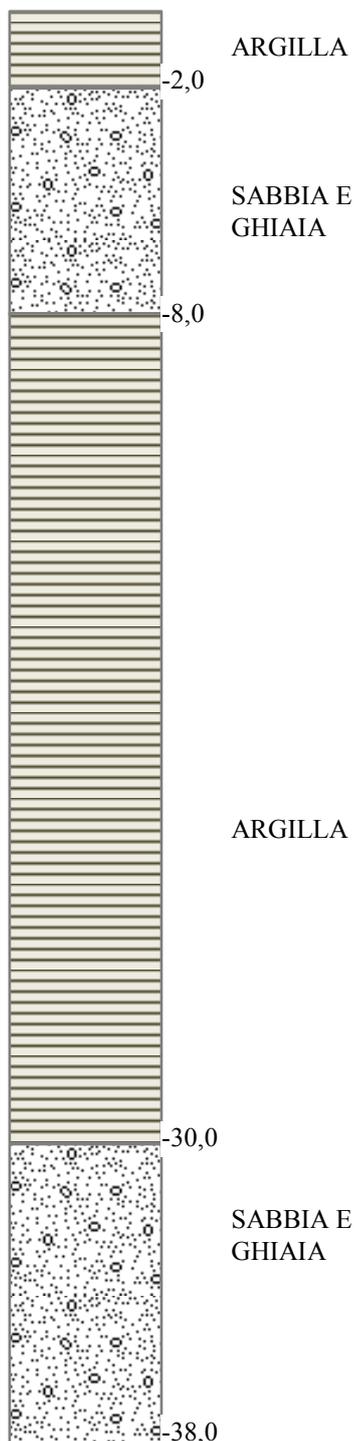
Per definire la categoria di sottosuolo ai sensi del punto 3.2.2. delle NTC '08 in questa fase si è fatto riferimento all'elaborazione delle prove penetrometriche e ai dati stratigrafici di un pozzo eseguito circa 350 m a sud del limite sud ovest dell'area in esame (ubicazione in Figura 1).

I documenti di quest'ultimo, resi disponibili sul gis regionale, indicano la successione del pozzo B7C263330807 del catalogo regionale riferita in Figura 3.

Per formulare una ragionevole stima sulla base del profilo litologico è necessario individuare un intervallo

Tipo di terreno	Vs [m/s]
Argille molto soffici	40 ÷ 80
Argille e limi normalmente consolidati	150 ÷ 300
Sabbia da mediamente a ben addensata	200 ÷ 400
Ghiaia	400 ÷ 800
Rocce tenere	500 ÷ 1000
Calcari fratturati	700 ÷ 1500
Rocce cristalline non alterate	700 ÷ 1500

ragionevole di valori e con riferimento a quanto riportato in è possibile stimare cautelativamente Vs<sub>30</sub> pari alla media dei valori minimi tra le litologie evidenziate ", ovvero 175 m/s e quindi considerare la probabile collocazione nella **categoria D, o a cavallo tra la D e la C.**



Peraltro le esperienze effettuate dello scrivente in terreni simili, ma posti ad alcuni chilometri di distanza e quindi non direttamente utilizzabili per la presente analisi, portano a ritenere più probabile la collocazione dei terreni nella categoria C con valori Vs<sub>30</sub> compresi per lo più tra 200 e 240 m/s.

L'elaborazione è stata condotta in conformità con il Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 "Nuove norme tecniche per le costruzioni" (G. U. 4 febbraio 2008 n. 29 - S. O. n. 30) e con la Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (C.S.LL.PP.) del 2 febbraio 2009 n. 617 "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» "(G.U. n.47 del 26-2-2009 - S.O. n. 27), ed in particolare con i paragrafi 6.1.2 (prescrizioni generali) e 6.2.1 (caratterizzazione e modellazione geologica del sito).

Gli aspetti geotecnici dell'area sono esposti in un distinto elaborato, concettualmente connesso al presente e riportato per ragioni pratiche nella seconda parte di questo stesso fascicolo, nel rispetto di quanto precisato ai paragrafi 6.1.2 (prescrizioni generali) e 6.2.2 (indagini, caratterizzazione e modellazione geotecnica) delle NTC 2008.

Tale suddivisione tra indagine geologica, che contiene anche gli aspetti sismici, e indagine geotecnica è stata ribadita dalla recente DGR del 30 marzo 2016 n. 5501 contenente i criteri attuativi della LR 33 del 12 ottobre 2015 in materia di costruzioni in zona sismica e relativa vigilanza e della DGR 11 luglio 2014 n. 2129 che individua la nuova classificazione sismica regionale definitivamente entrate in vigore in data 10 aprile 2016.

Figura 3: stratigrafia pozzo B7C263330807

Nella citata DGR 5501/2016 (ALL. C, Modulo 1 – *istanza di autorizzazione sismica o di certificazione di sopraelevazione*, paragrafo 21 *Allegati progettuali*, punti 10, 11 e 12 pag. 24-25-26) i singoli elaborati sono specificamente individuati nel modo seguente:

**R1** (relazione **geologica** R1): da redigere ai sensi del § 6.2.1 NTC 2008, individua i caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio in rapporto al tipo d'intervento e complessità del contesto geologico, al fine inquadrare i problemi geotecnici e definire il programma delle indagini geotecniche.

**R2** (relazione **geotecnica** R2): da redigere ai sensi del § 6.2.2 NTC 2008 sulla base delle informazioni dedotte dal punto precedente (R1), comprende la programmazione e l'interpretazione delle indagini geotecniche estese sul volume significativo interessato dall'intervento e permette di definire i modelli geotecnici di sottosuolo necessari alla progettazione, ovvero gli schemi rappresentativi delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e delle rocce finalizzato all'analisi quantitativa.

**R3** (relazione **geologica** R3): da redigere ai sensi della DGR 30 novembre 2011 - n. IX/2616, "Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio" è finalizzata a verificare la fattibilità dell'intervento proposto in relazione alla specifica classe di fattibilità geologica e di pericolosità sismica che l'estensore dello studio geologico del PGT ha attribuito all'area, comprese eventuali opere di mitigazione del rischio necessarie per rendere fattibile l'opera. L'elaborato deve accompagnare il progetto preliminare dell'opera, se presentato per il rilascio del titolo abilitativo a costruire.

Data la relativa uniformità dell'assetto geologico dell'area e l'assenza di particolari elementi di rischio geologico, classificata nel PGT come 3 "Fattibilità con consistenti limitazioni", ma solo per problematiche geotecniche individuate nella presente analisi, si ritiene conveniente riunire in un unico documento, quello qui esposto, gli elaborati richiesti per le relazioni geologiche R1 ed R3.

La relazione geotecnica (R2) costituisce il secondo elaborato riportato di seguito alle relazioni R1 ed R3 e, come detto, è unito ad esse in un unico fascicolo per ragioni di praticità.

Per la caratterizzazione geologica generale dell'area si è fatto riferimento ai dati disponibili nel geoportale regionale (<http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale>) e allo studio geologico per la variante di PGT .

## 2 Caratteristiche geologiche

### 2.1 ASPETTI GEOMORFOLOGICI E LITOSTRATIGRAFICI

Nella carta geologica ufficiale, foglio 59 Pavia, l'area di progetto è collocata sul "livello fondamentale della pianura", unità morfo stratigrafica costituita da "alluvioni fluvioglaciali e fluviali del würm, prevalentemente sabbiose, con lenti limose e sottili livelli ghiaiosi e con strato di alterazione di debole spessore, generalmente brunastro -Q<sub>1r</sub>".

I terreni presentano estese coperture limose nei primi metri dalla superficie e la formazione del deposito d'interesse per gli aspetti geotecnici, quindi indicativamente dei primi 10 - 20 metri dal p.c., è attribuita alla divagazione degli scaricatori del bacino dell'Olona, succedutesi durante le fasi di maggiore intensità di precipitazioni della glaciazione würmiana (terminata approssimativamente 12.000 anni fa).

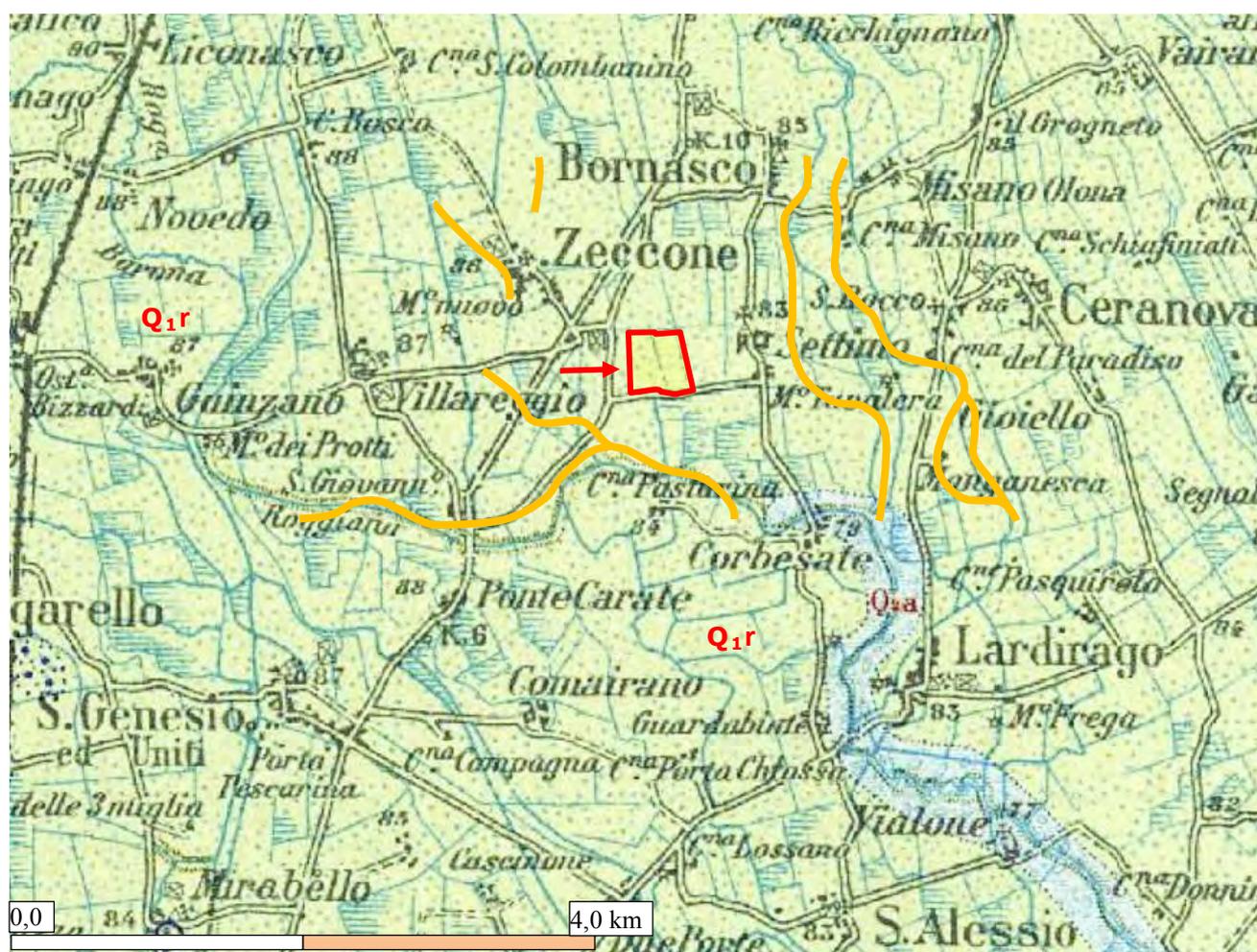


Figura 4: individuazione dell'area d'indagine **→** nella "Carta Geologica d'Italia" – 1963, Servizio Geologico Nazionale, riprodotta in scala 1:50.000 dall'originale in scala 1: 100.000.. **Q<sub>1r</sub>** = diluvium recente, alluvioni fluvioglaciale tardo pleistoceniche sabbiose del "livello fondamentale della pianura"; **Q<sub>2a</sub>** = alluvium antico, che costituiscono terrazzi compresi tra le alluvioni recenti ed attuali dei fiumi e il diluvium recente, si tratta di depositi formati dopo una fase di erosione, ma che talora rappresentano semplici superfici di erosione. La tessitura è data da ghiaie e sabbie prevalenti.

 Tracce di paeloalvei presenti in prossimità dell'area in esame, ridisegnati dalla carta morfologica regionale.

La presenza di una copertura limosa assai diffusa nei primi metri dal piano campagna è interpretata dagli Autori come il prodotto della permanenza degli alvei, in periodo Postglaciale, a quote prossime a quelle del "*Livello fondamentale della Pianura*", probabilmente per cause tettoniche.

Nella cartografia di Figura 4 sono riportate con le linee continue di colore arancione le tracce dei paleoalvei individuati nella cartografia regionale nell'intorno dell'area in esame. Questo aspetto è segnalato perché talora il percorso di paleoalvei, peraltro di difficile individuazione, può associarsi alla presenza di terreni di recente deposizione e molto compressibili, generati dal riempimento ad opera della vegetazione palustre delle depressioni dell'alveo abbandonato. Nel caso in esame si rileva l'assenza di tali tracce, o almeno l'assenza del loro riconoscimento in corrispondenza dei terreni dell'ATP 1.

L'indagine penetrometrica ha confermato le caratteristiche litologiche generali sopra indicate, evidenziato un profilo stratigrafico essenzialmente formato da sabbie limose di sciolte e di media densità alle quali sono talora intercalati strati limo argillosi e argilloso limosi di media consistenza dello spessore di pochi decimetri.

Il suolo dell'area in esame è descritto nella pubblicazione "*Suoli e paesaggi della provincia di pavia*" dell'ERSAF (2004 - D.G. Agricoltura e D.G. Territorio e Urbanistica) come appartenente alla media pianura idromorfa, formata da superfici subpianeggianti e stabili poste intorno a 90 m s.l.m., caratterizzata da pietrosità superficiale (granuli di dimensioni superiori a 2 mm) scarsa o nulla. I substrati sono formati da depositi alluvionali da medi a grossolani, non calcarei (sabbie, sabbie limose con ghiaia).

È riconosciuta la presenza di una consociazione di suoli denominati nel catalogo regionale come VIN2 e GSS1. I primi sono da moderatamente a poco profondi (50 - 100 cm) limitati da orizzonti idromorfi, a tessitura moderatamente grossolana (franco sabbiosa), scheletro (granuli di dimensioni > di 2mm presenti nel profilo del suolo) assente o scarso e drenaggio lento, mentre i secondi sono molto profondi (> 150 cm), a tessitura da moderatamente grossolana a media (da franco sabbioso fine a limoso) con scheletro comune e drenaggio buono.

I suoli VIN2 sono individuati nella classificazione USDA come **Typic Hapludalf coarse loamy, mixed, superactive, mesic** e sono caratterizzati da processi di illuviazione delle argille mentre i suoli GSS sono suoli meno evoluti (inceptisuoli) permanentemente o periodicamente soggetti a saturazione idrica e riduzione chimica, con tasso di saturazione basica del complesso di scambio inferiore al 50%, classificati secondo USDA come **Aquic-dystric Eutrudepts coarse loamy, mixed, superactive, mesic**.

La tessitura è data per i suoli VIN2 in prevalenza da sabbie (60-70%), in subordine da limi (25-33%) e da argilla per il 3 -10 %. Nei suoli GSS le sabbie sono sempre prevalenti (52-80%), il limo è lievemente più abbondante, intorno al 40 %, e l'argilla è presente con poche unità percentuali.

La successione di terreni presenti a maggiori profondità è rappresentata dalla

stratigrafia del pozzo riportata nella Figura 3 e dalle seguenti stratigrafie di pozzi posti a distanza di circa 1,5 Km dal centro dell'area in esame, rispettivamente a NE e SW.

I dati mostrano la predominanza di terreni granulari nei primi 8 metri circa, seguiti fino a circa -55 metri da spessi strati limosi o limosi con sabbia, ai quali si alternano strati sabbiosi. Oltre tale quota compaiono depositi più grossolani estesi fino a fondo pozzo.

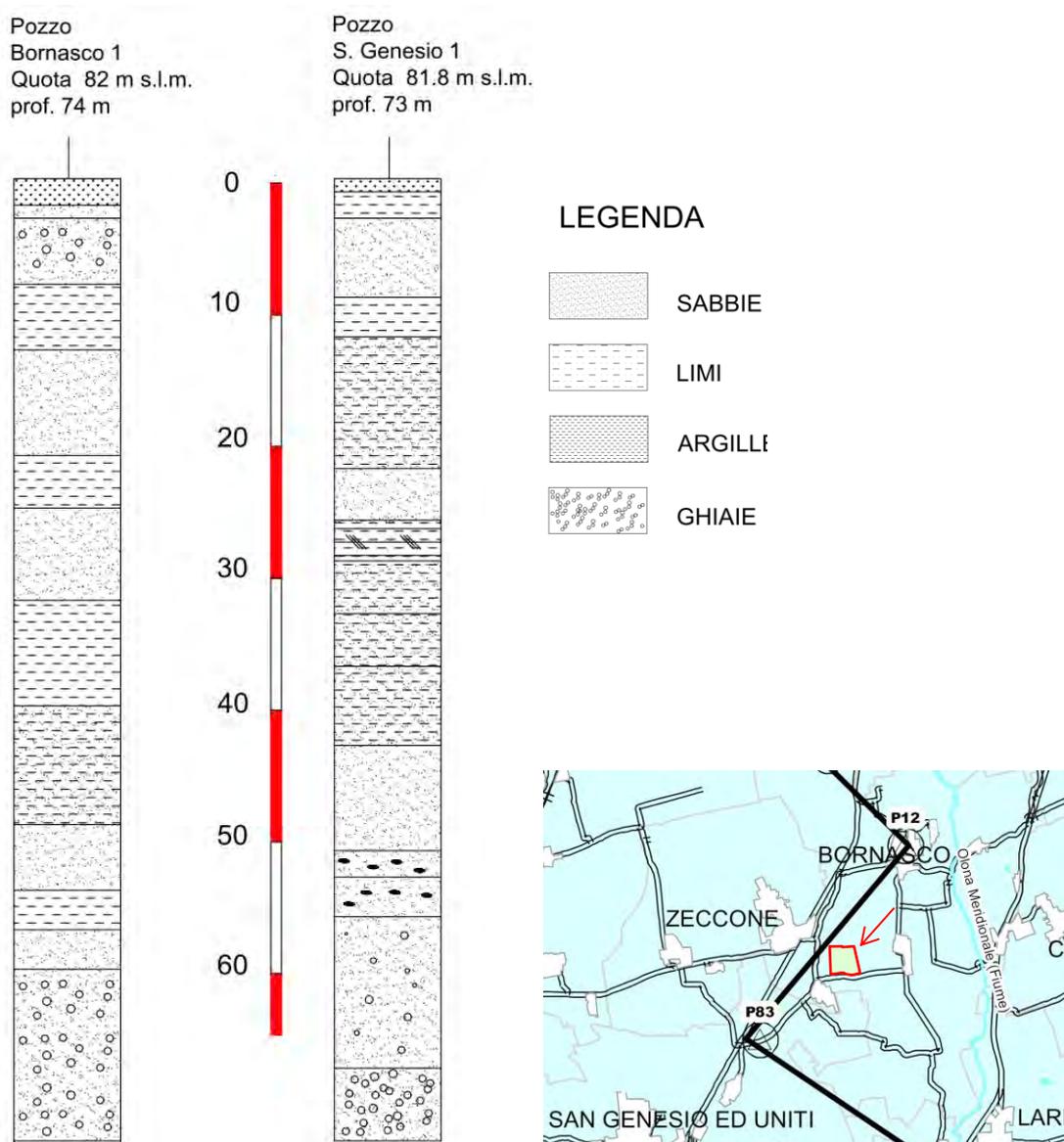


Figura 5: stratigrafie di pozzi riportati nella tavola 4 del Piano Cave della provincia di Pavia (2004) e relativa ubicazione .

## 2.2 ASPETTI IDROGEOLOGICI

L'assetto geometrico-strutturale del materasso alluvionale della bassa pianura a valle dei fontanili è costituito da corpi acquiferi di natura sabbiosa e sabbioso-ghiaiosa, alternati a livelli semipermeabili di natura limo - argillosa e limo-sabbiosa. Il complesso idrogeologico sotterraneo è in stretta relazione con il sistema idrografico, la cui funzione **alimentatrice si fa risentire sull'acquifero in termini di variazioni periodiche della superficie piezometrica**. Osservazioni a scala regionale indicano un generale drenaggio esercitato dal fiume Po, sia sulle acque profonde sia su quelle superficiali, con un deflusso idrico sotterraneo diretto in direzione S e SE.

In ambito locale si evidenzia che le successioni litologiche che contengono gli acquiferi si estendono in profondità per oltre 200 m e manifestano la presenza di almeno quattro falde sovrapposte con caratteristiche idrogeologiche indipendenti.

L'area è sede di una falda acquifera libera superficiale con moto verso sud est a causa **dell'effetto drenante operato dal Fiume Olona che rappresenta l'asse idrologico del territorio in esame**.

Il regime idrico è condizionato dalla circolazione superficiale e in particolare la pratica **dell'allagamento** delle risaie, che determina **all'inizio della stagione** irrigua, in corrispondenza del periodo estivo, una forte ricarica della prima falda con conseguente innalzamento del livello acquifero fino al oltre un metro.

Le prove eseguite, come detto, evidenziano la prevalenza di sabbie con locali lenti limosi argillose che formano la sede della falda freatica.

Precedenti studi condotti in aree limitrofe hanno verificato una profondità della falda variabile tra 0,80 e 3,20 m dal piano campagna, soggette ad escursioni continue regolate sia da cause naturali, precipitazioni e afflussi da monte, sia da cause artificiali come la già citata coltivazione del riso per sommersione e la manutenzione dei canali.

In merito all'escursione freatica si riporta in Figura 6 i dati di due anni di un pozzo ubicato a Lacchiarella, 9 Km a NNW, fenestrato entro la falda freatica principale, ma la variabilità di questo parametro nello spazio e la sua dipendenza da fenomeni locali, fa sì che i dati forniti siano puramente indicativi e non risolutivi dei fenomeni attesi nell'area in esame.



Figura 6: escursioni del livello freatico a Lacchiarella

Una prima indicazione sulle quote medie, direzioni e gradienti delle acque sotterranee più superficiali è fornita dalla cartografia riportata in Figura 7, che mostra in corrispondenza dell'APT 1 una quota media di falda di circa 82.0 m s.l.m., corrispondente a una soggiacenza di 1,2 - 1,6 metri ed un gradiente verso SSE dell'1,0 ‰.

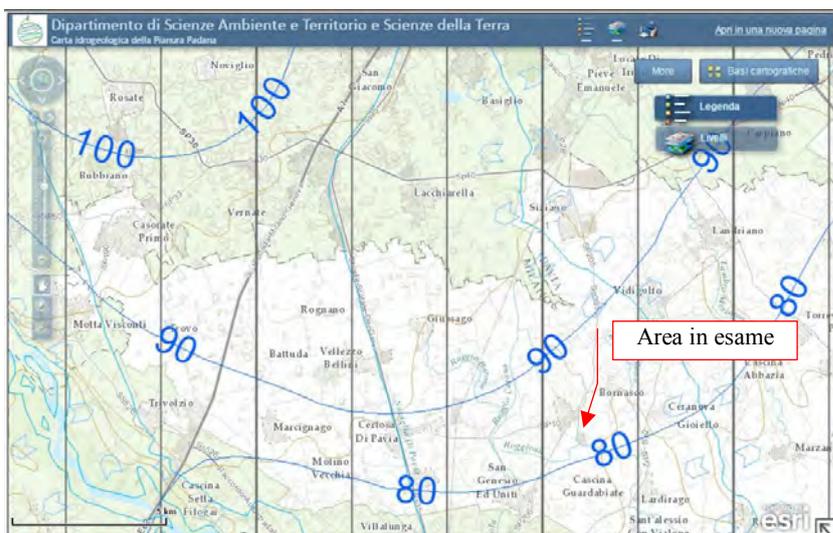


Figura 7: porzione della Cartografia Idrogeologica della Pianura Padana dal sito <http://geomatic.disat.unimib.it/?q=planura>.

Un altro riferimento a piccola scala è dato dalla TAV. 5 ASSETTO IDROGEOLOGICO del Piano Cave della provincia di Pavia (giugno 2004) parzialmente riportato in Figura 8 e che, analogamente al caso precedente, evidenzia una quota di falda di 81.0 m s.l.m., pari a una soggiacenza di 2,2 - 2,6 metri e un gradiente di circa l'1,1 ‰ in direzione sud est.

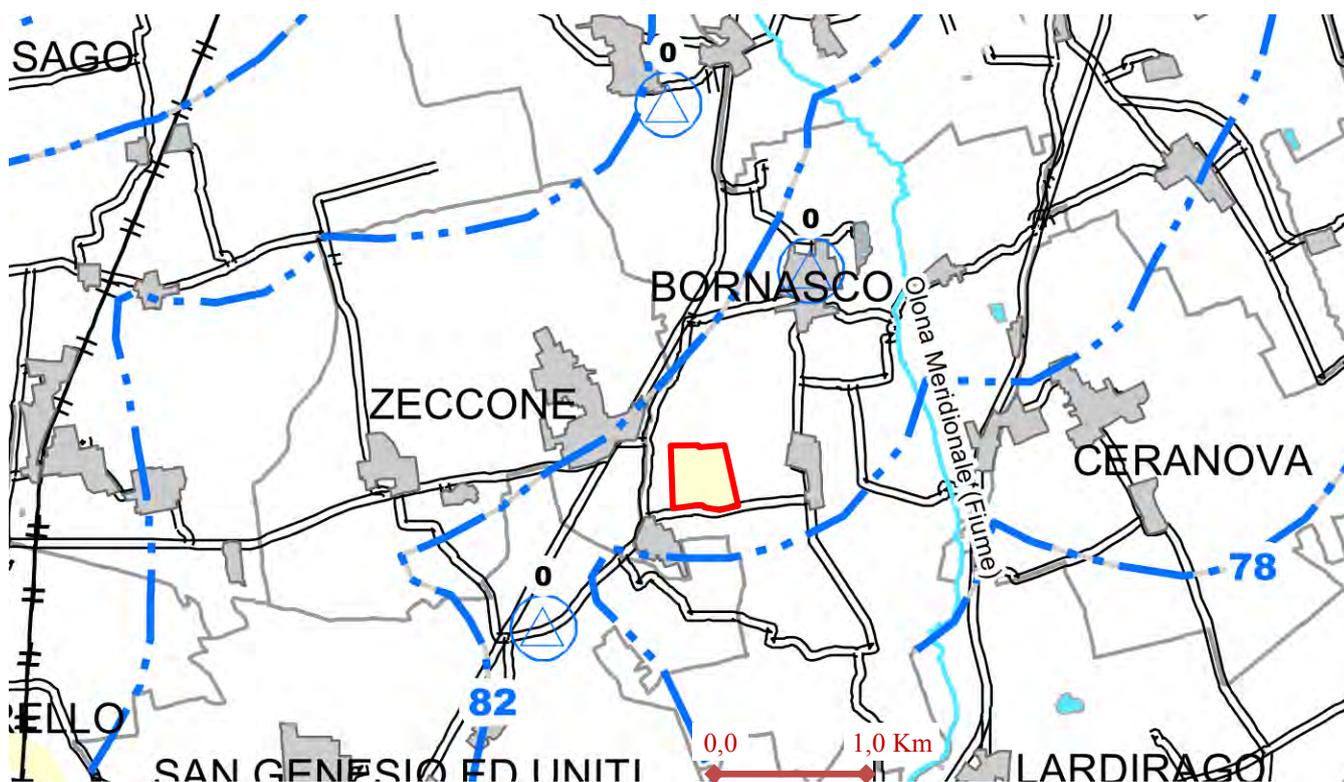


Figura 8: stralcio della tavola 5 ASSETTO IDROGEOLOGICO del Piano Cave della provincia di Pavia (giugno 2004). Riproduzione in scala 1: 50.000

## 2.3 CLASSI DI FATTIBILITÀ GEOLOGICA

La superficie di progetto è collocata in gran parte nella **classe 3 di fattibilità** geologica del PGT vigente, dove per gli interventi di trasformazione del territorio è previsto l'**accertamento diretto delle caratteristiche** geotecniche e litostratigrafiche locali, in particolare a causa della presenza della falda superficiale e di terreni con orizzonti a limitate caratteristiche geotecniche.

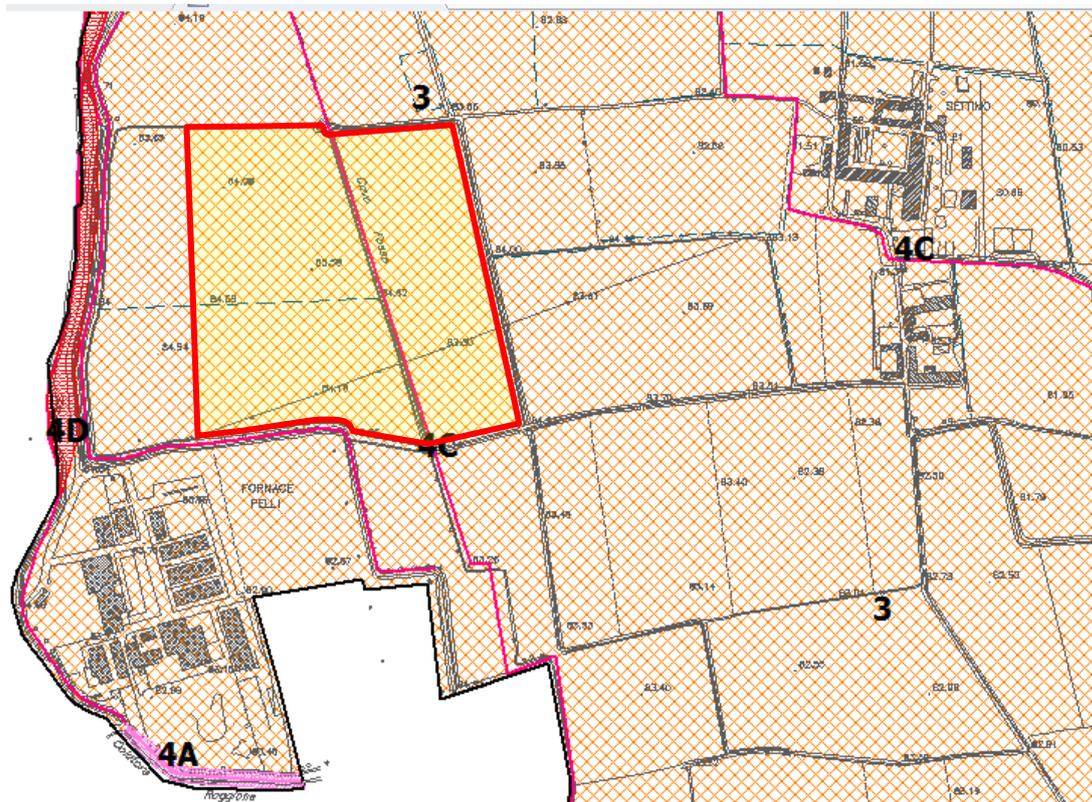


Figura 9: stralcio della tavola 5 “carta di fattibilità geologica” sc. 1:10.000 con individuazione dell’area in esame.

Le prescrizioni vigenti per l’area sono di seguito riportate :

*classe 3: fattibilità con consistenti limitazioni. (colore arancione a righe incrociate con simbolo 3)*

*La classe comprende le zone nelle quali sono state riscontrate consistenti limitazioni all’utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica della destinazione d’uso per le condizioni di pericolosità/vulnerabilità individuate, per il superamento delle quali potrebbero rendersi necessari interventi specifici o opere di difesa. Le indagini e gli approfondimenti devono essere realizzati prima della progettazione degli interventi in quanto propedeutici alla pianificazione ed alla progettazione.*

*Copia delle indagini effettuate e della relazione geologica di supporto deve essere consegnata, congiuntamente alla restante documentazione, in sede di presentazione dei piani attuativi (l.r. 12/05, art. 14) o in sede di richiesta del permesso di costruire (l.r. 12/05, art. 38). Si sottolinea che gli approfondimenti di cui sopra, non sostituiscono, anche se possono comprendere, le indagini previste dal d.m. 11 marzo 1988 e dal decreto 14 gennaio 2008 “nuove norme tecniche per le costruzioni”.*

Gli accertamenti richiesti costituiscono l’oggetto della presente relazione che fornisce gli elementi necessari per valutare alla scala del piano urbanistico le cautele imposte dalle specifiche problematiche osservate.

Sempre nella classe 3 la norma urbanistica prescrive che:

*Al fine di mantenere e migliorare la qualità delle acque freatiche, sono da VIETARE sui terreni di questa classe e su tutto il territorio comunale:*

- *L'insediamento di attività a rischio previste dalla direttiva CEE Seveso*
- *L'apertura di pozzi perdenti*
- *L'esecuzione di pozzi di sfruttamento delle acque che non prevedano una adeguata cementazione ed impermeabilizzazione dei primi metri di terreno con materiali quali fanghi bentonitici, compactonite o boiaccia di cemento additivata con impermeabilizzanti*
- *La dispersione dei liquidi fognari nei primi strati del sottosuolo senza una accurata indagine idrogeologica che ne stabilisca le modalità*
- *La dispersione di liquidi fognari in corsi d'acqua superficiali senza la necessaria depurazione e con caratteristiche difformi da quanto stabilito dalla legge n° 258/2000*
- *La dispersione nel sottosuolo di acque meteoriche provenienti da piazzali e strade senza una accurata indagine idrogeologica che ne stabilisca le modalità*
- *L'apertura di cave che possono essere in connessione con la falda o che permettano, con l'asportazione degli strati fini superficiali, l'infiltrazione degli inquinanti*
- *Lo stoccaggio anche temporaneo all'aperto di rifiuti pericolosi e tossico nocivi*
- *Le discariche all'aperto di materiali lisciviabili*

***In questi terreni inoltre sono da prescrivere***

- *La manutenzione di una adeguata rete di fossi drenanti che smaltiscano rapidamente le acque meteoriche*
- *I depositi di liquami, concimi chimici e/o organici devono avvenire in contenitori stagni o su platee dotate di raccolta del percolato come previsto dalla legge 50/95*
- *L'esecuzione di collettori fognari e di qualsiasi tubazione contenente liquidi o solidi considerati inquinanti delle acque devono avere la possibilità di essere ispezionabili onde verificarne la tenuta*
- *L'interramento di serbatoi di carburanti devono, come prescritto dalle vigenti leggi essere in doppia camicia.*

Infine l'area dell'ATP è attraversata dalla roggia Fosso che ricade nella classe 4C di fattibilità per la quale si specifica quanto segue:

***SOTTOCLASSE 4C (Riga rosso fucsia con simbolo 4C)***

*In sottoclasse 4C sono posti i terreni che costituiscono gli alvei attivi dei corsi d'acqua/stagni non demaniali del territorio di BORNASCO. Per questi valgono le prescrizioni degli art. n° 891, 892, 893 e 897 del C.C.*

### 3 Aspetti sismologici e risposta sismica locale

#### 3.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

La normativa richiede che tra gli elementi di pericolosità geologica siano valutati i possibili effetti che particolari condizioni geologiche e geomorfologiche (condizioni locali) possono determinare in occasione di eventi sismici.

La **pericolosità sismica di base** è definita da studi sismologici nazionali e regionali, mentre gli **EFFETTI LOCALI** sono distinti in funzione del comportamento dinamico dei materiali coinvolti, e principalmente dipendono dalla morfologia e dalle caratteristiche meccaniche del terreno presente nelle prime decine di metri.

Si distinguono due grandi gruppi di **EFFETTI LOCALI**:

- quelli determinati **dall'amplificazione sismica locale**
- quelli dovuti all'**instabilità**

La prima interessa terreni stabili ma che per effetto della loro disposizione e caratteristiche meccaniche producono modificazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza del moto sismico (terremoto di riferimento) proveniente da una sottostante formazione rocciosa (bedrock).

Nell'ambito di tale fenomeno si distinguono:

- **amplificazione topografica**, che si manifesta quando
  - sono presenti morfologie superficiali che favoriscono la focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta del rilievo a seguito di fenomeni di riflessione sulla superficie libera e di interazione fra il campo d'onda incidente e quello diffratto. Nella Tabella 3.2.IV, categorie topografiche, delle NTC 2008 si distinguono:

- T1 Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$
- T2 Pendii con inclinazione media  $i > 15^\circ$
- T3 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media  $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
- T4 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media  $i > 30^\circ$

Le categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

L'area è piana e quindi non rientra tra quelle soggette ad amplificazione topografica (categoria T1).

- **amplificazione litologica**: si verifica quando sono presenti morfologie sepolte (bacini sedimentari, chiusure laterali, corpi lenticolari, eteropie ed interdigitazioni, gradini di faglia ecc.), e/o da particolari profili stratigrafici che possono generare esaltazione locale delle azioni sismiche trasmesse dal terreno, fenomeni di risonanza fra onda sismica incidente e modi di vibrare del terreno e fenomeni di doppia risonanza fra periodo fondamentale del moto sismico incidente e modi di vibrare del terreno e della sovrastruttura. Le informazioni disponibili consentono di **escludere la presenza di indizi di strutture sepolte in grado di determinare variazioni significative delle onde sismiche**. L'**instabilità** riguarda principalmente le dinamiche dei versanti ma può

interessare anche terreni particolarmente scadenti dal punto di vista geotecnico, dove si possono verificare scivolamenti e rotture del suolo. Nei terreni granulari sopra falda sono possibili cedimenti a causa della **densificazione** del materiale, mentre sotto falda sono possibili fenomeni di **liquefazione**. Fenomeni analoghi a quelli della liquefazione possono interessare anche depositi/unità stratigrafiche contenenti argille tissotropiche, il cui rifluimento può innescare frane superficiali o espansioni laterali.

Nel caso in esame fenomeni di densificazione, che producono cedimenti, non sono **probabili perché l'evento sismico atteso è molto basso e il fenomeno citato interessa solo terreni naturali o artificiali (ad esempio i terreni di riporto) a grana sabbioso-limosa e messa in posto recente**<sup>1</sup>, mentre fenomeni di liquefazione possono essere esclusi per le ragioni indicate nel § 0.

Con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 "*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica...*" è entrata in vigore la nuova classificazione sismica, che suddivide il territorio nazionale in 4 zone sismiche e colloca **Bornasco** nella zona 4, di bassissima sismicità, caratterizzata nominalmente da una accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A ( $V_s > 800$  m/s) →  **$a_g = 0,05 g$** , con  $g$  = accelerazione di gravità =  $9,81 \text{ m/s}^2$ , ma con l'entrata in vigore della D.G.R. 11 luglio 2014, n.2129 "*Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia*" l'area è stata collocata nella "**zona sismica 3**", circostanza che peraltro non ha modificato le sollecitazioni sismiche da considerare essendo queste ultime fornite dal reticolo dell'INGV con le "*mappe interattive di pericolosità sismica*".

Con la pubblicazione il 4 febbraio 2008 delle Norme Tecniche per le Costruzioni **l'azione sismica di riferimento** da adottare per la progettazione non è più rappresentata dalle "zone" precedentemente citate, ma è definita sulla base dei nodi di una rete nazionale di valori di pericolosità sismica, proposti da valori tabellari riferiti nell'allegato stesso e disponibili al sito <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>. Come nel caso delle "zone" il valore è espresso in termini di accelerazioni previste su suolo rigido di categoria A ( $V_s > 800$  m/s) in unità  $g$ .

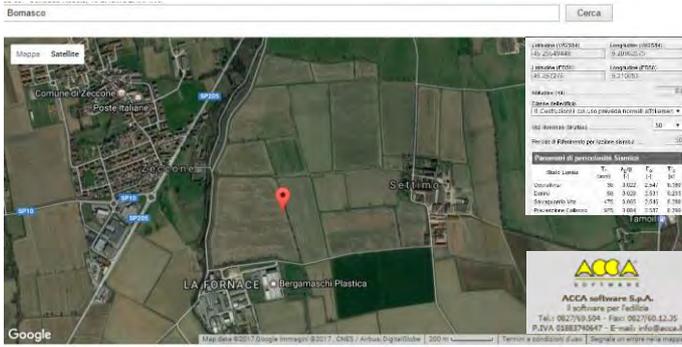
L'accelerazione orizzontale massima del suolo  **$a_g$** , come definita dall'OPCM 3519/2006, è quella che in ambito internazionale è chiamata PGA (Peak **Ground Acceleration**). E' una funzione probabilistica associata a soglie di eccedenza e valori di incertezza, e non è più rappresentata da un unico numero ma da un insieme di valori.

Il valore di riferimento impiegato per le costruzioni ordinarie è quello delle probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni equivalente a un tempo di ritorno di 475 anni, corrispondente allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) nel DM 14 gennaio 2008.

Tale condizione riferita al territorio in esame mostra  $0,050 < a_g < 0,075$  (v. Figura 11), e più specificamente  **$a_g = 0,065 g$**  per il nodo posto circa 1 km NW dell'area in esame.

Più in dettaglio, i valori interpolati dai software disponibili (v. Figura 10) per edifici di Classe **d'uso II** e vita nominale  $V_N = 50$  anni (§ 2.4 NTC 08) sono:

<sup>1</sup> Definizioni tratte da: Linee guida per la realizzazione dello studio di compatibilità sismica per i Piani di Assetto del Territorio comunali e intercomunali (PAT e PATI) – D.G.R. n. 3308/2008 Regione Veneto



### Parametri di pericolosità Sismica

"Stato Limite"	$T_r$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T^*_c$ [s]
Operatività	30	0.022	2.547	0.180
Danno	50	0.028	2.531	0.203
Salvaguardia Vita	<b>475</b>	<b>0.065</b>	<b>2.546</b>	<b>0.280</b>
Prevenzione Collasso	975	0.084	2.537	0.290

Figura 10: valori interpolati per l'area in esame dei parametri di pericolosità sismica per edifici di classe II.

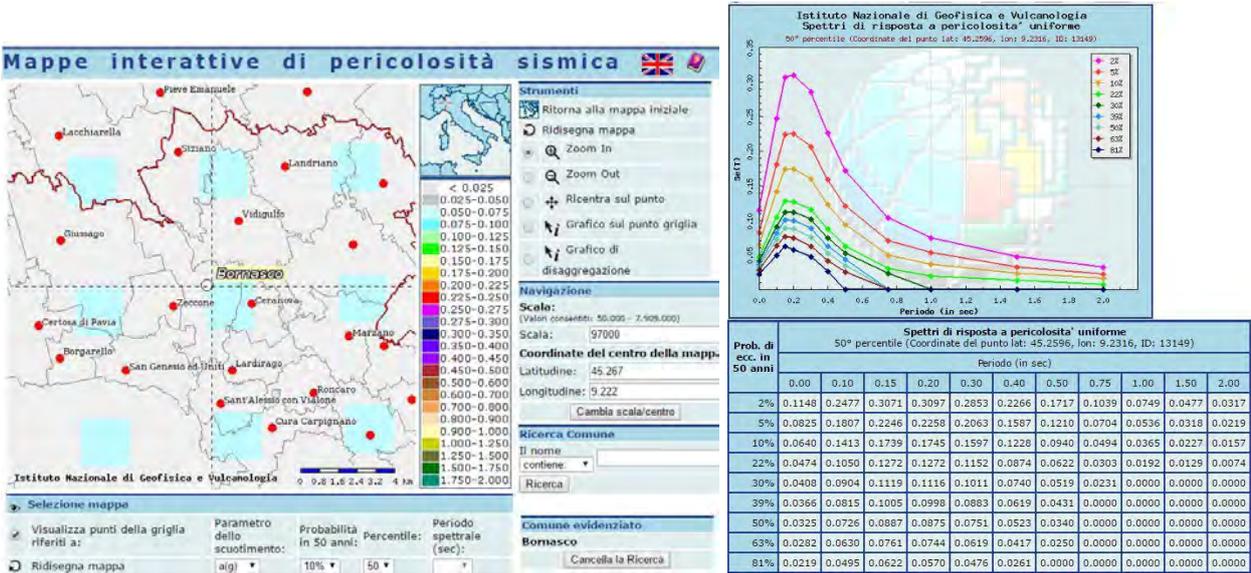
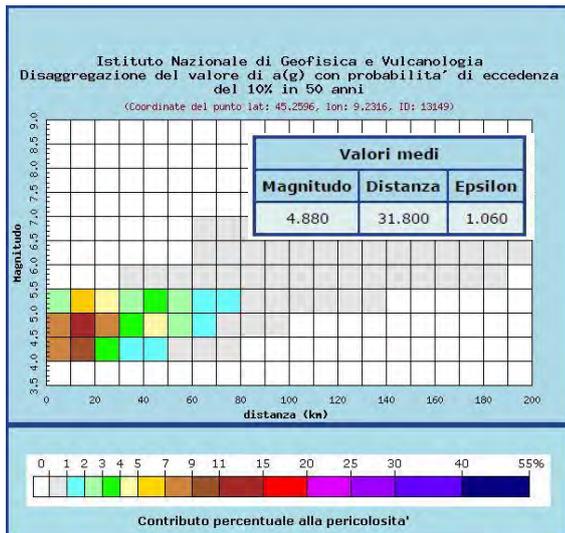


Figura 11: valori di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione prevista su suolo rigido. Nella figura in alto a sinistra è indicata la distribuzione dei valori di  $a_g$  intorno all'area in esame associata alla probabilità di superamento del 10% in 50 anni, equivalente a un tempo di ritorno di 475 anni.

A sinistra : grafico di disaggregazione dei valori di pericolosità, che esprime il contributo percentuale alla stima di pericolosità fornito da tutte le possibili coppie di valori di magnitudo (M) e distanza (R). Il parametro  $\epsilon$  rappresenta il numero di deviazioni standard per cui lo scuotimento (logaritmico) devia dal valore mediano predetto da una data legge di attenuazione dati M ed R.

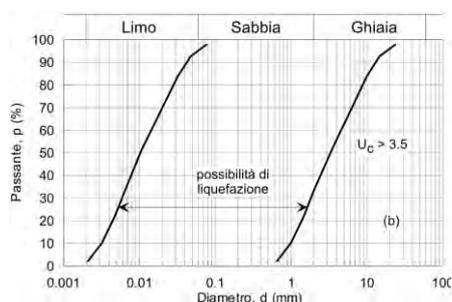
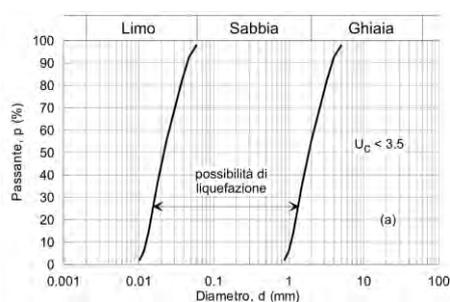
Il contributo massimo è dato da sismi posti da 10 a 20 Km e di magnitudo da 4,5 a 5,0. La magnitudo media prevista con probabilità di superamento del 10 % in 50 anni è di  $M = 4,88$ .



## 3.2 STIMA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

La stima del RISCHIO DI LIQUEFAZIONE può essere omessa in conformità a quanto indicato al paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC 08 "Esclusione della verifica a liquefazione", poiché ricorrono le circostanze di cui ai punti 1 e 2 della norma, di seguito elencate.

1. eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5 (v. Figura 11);
2. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di  $0,1g$  (Figura 10);
3. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali);
4. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$  dove  $(N_1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .



## 4 Conclusioni sugli aspetti geologici e sismici

Le analisi hanno consentito di precisare le problematiche e il grado di conoscenza attuale dell'area, già configurata dallo studio di PGT dell'intero territorio comunale e che resta qui confermata.

La superficie interessata, costituita da un poligono circa quadrato di 160.800 mq, sorge poco a nord dell'area industriale La Fornace, nella porzione sud occidentale del territorio comunale, in una zona pianeggiante che la carta tecnica regionale indica quote costanti, comprese tra 83,3 e 83,6 m s.l.m. (Figura 1), che denotano un lieve acclività verso est e sud est, compresa tra 1,5‰ e il 3,0 ‰.

Il territorio si colloca circa al centro della media pianura pavese, sui depositi tardo pleistocenici sabbioso limosi del livello fondamentale della pianura sicuramente appartenenti al bacino del fiume Olona e interposta tra le depressioni del fiume Lambro Meridionale che scorre 5,5 km a NE e il fiume Ticino presso Pavia, circa 9 Km a SW.

La superficie è delimitata a nord da una roggia di circa 4,5 metri di ampiezza che è priva di nome nei documenti consultati, in parte del confine sud ovest dal Cavo Marocco (sempre secondo il PGT) e a est dalla prosecuzione lungo quel lato della roggia senza nome che forma il limite nord.

Per caratterizzare l'area sotto il profilo stratigrafico e idrogeologico, in data 25 maggio 2017 sono state eseguite due prove penetrometriche statiche CPT con punta meccanica Begemann nelle posizioni indicate in Figura 1.

La prima è stata approfondita 9,8 metri dal piano campagna ipotizzato a quota di 83,6 m s.l.m. per la presenza di un punto quotato CTR nelle vicinanze, la seconda a -7,8 metri dal piano campagna ipotizzato a 83,2 m s.l.m. per la presenza di un punto quotato CTR sulla strada circa 90 metri ad est.

Nel foro delle prove CPT sono stati collocati altrettanti micropiezometri (Pz 1, 2) alla profondità di -5,0 metri dalla superficie, che hanno consentito di rilevare la falda alle quote indicate in Tabella 1.

Per definire la categoria di sottosuolo ai sensi del punto 3.2.2. delle NTC '08 in questa fase si è fatto riferimento all'elaborazione delle prove penetrometriche e ai dati stratigrafici di un pozzo eseguito circa 350 m a sud del limite sud ovest dell'area in esame (ubicazione in Figura 1).

I documenti di quest'ultimo, resi disponibili sul gis regionale, indicano la successione del pozzo B7C263330807 del catalogo regionale riferita in Figura 3.

Per formulare una ragionevole stima sulla base del profilo litologico è necessario individuare un intervallo ragionevole di valori e con riferimento a quanto riportato in Tabella 2 è possibile stimare cautelativamente  $V_{s30}$  pari alla media dei valori minimi tra le litologie evidenziate, ovvero 175 m/s e quindi considerare la probabile collocazione nella categoria D, o a cavallo tra la D e la C.

Peraltro le esperienze effettuate dello scrivente in terreni simili, ma posti ad alcuni chilometri di distanza e quindi non direttamente utilizzabili per la presente analisi, portano a ritenere più probabile la collocazione dei terreni nella categoria C con valori  $V_{s,30}$  compresi per lo più tra 200 e 240 m/s.

La classe di fattibilità geologica individuata dal PGT (2008) per l'area di progetto è la "3" (Figura 9), dove per gli interventi di trasformazione del territorio è previsto l'accertamento delle caratteristiche

geotecniche e litostratigrafiche per tenere conto delle problematiche connesse alla presenza "della falda superficiale e di terreni con orizzonti a limitate caratteristiche geotecniche".

Le prescrizioni del PGT valide per tutto il territorio comunale richiedono inoltre di progettare con le cautele riportate nel § 2.3.

L'area ricade altresì nella zona di pericolosità sismica locale (PSL) definita in ambito regionale con la sigla Z4a, caratterizzata da potenziale amplificazione sismica per effetto della litologia.

La verifica sismica di secondo livello non è stata eseguita mancando al momento le indagini in sito che ne consentono l'attuazione, ma dovrà necessariamente essere prodotta nella fase di attuazione del piano.

La **verifica del rischio di liquefazione** nelle condizioni sismiche previste per l'area dagli elaborati predisposti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia in ottemperanza all'Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006 **è stata omessa**, perché ricorrono varie condizioni indicate al paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC 2008 per l'"Esclusione della verifica a liquefazione" (§ 0).



ORDINE DEI GEOLOGI della  
SCOTTI  
ANGELO  
n° 763

## 5 RELAZIONE GEOTECNICA: stratigrafia locale

### 5.1 CENNI SULLA TECNICA DELLE PROVE PENETROMETRICHE STATICHE

#### 5.1.1 *Descrizione del metodo di esecuzione delle prove*

La prova denominata C.P.T. (Cone Penetration Test), o prova penetrometrica "statica", consiste nella misura della spinta necessaria (indicata come  $q_c$ ) ad ottenere l'avanzamento nel terreno di una punta standard (3,57 cm di diametro, angolo al vertice di 60°) a velocità costante di 2 cm/s. La spinta sulla punta avviene attraverso una serie di astine coassiali alla batteria principale, che consentono la lettura della resistenza alla sola punta, escludendo quindi l'attrito che si sviluppa sulla batteria durante l'infissione nel terreno. Le misure sono effettuate per tratti di 8 cm, intervallati da 12 cm di avanzamento con punta chiusa, cioè solidale alla batteria. Il metodo consente anche di misurare indirettamente l'attrito tra un manicotto di 150 cm<sup>2</sup> di superficie laterale ed il terreno, ottenendo così valori indicativi delle caratteristiche tessiturali del tratto interessato. Con questa tecnica si possono quindi sommariamente distinguere i terreni che offrono resistenza prevalentemente per effetto della coesione tra i minerali (terreni argillosi s.l.) da quelli nei quali la resistenza alla deformazione è in prevalenza offerta dall'attrito tra i granuli (comportamento incoerente, terreni sabbiosi s.l.). Il valore **Fr** (friction ratio) definisce appunto tale misura, come rapporto tra la resistenza di punta  $q_c$  e la resistenza di attrito sul manicotto **fs** (detta resistenza di attrito laterale locale)

La misura della resistenza alla punta è correlata dagli autori sia sperimentalmente che mediante modelli teorici, con i parametri di caratterizzazione meccanica dei terreni, in particolare con la coesione non drenata  **$c_u$**  e con l'angolo di resistenza al taglio in condizioni drenate  $\varphi'$ . Molto utile è infine la correlazione diretta dei dati penetrometrici con la capacità portante limite dei pali in sabbie.

#### 5.1.2 *Aspetti generali dell'elaborazione di prove statiche*

Non è possibile sintetizzare le procedure di stima dei parametri geotecnici, i limiti e le caratteristiche di affidabilità delle procedure adottate, che talora sono accennate quando necessario nei capitoli dove queste vengono utilizzate. Per la comprensione dei procedimenti occorre rimandare alle seguenti pubblicazioni:

Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 306 p.

Mesri, G., D.O.K. Lo, and T.W. Feng. "Settlement of Embankments on Soft Clays." Keynote Lecture, Settlement '94, Texas A&M University, College Station, Texas, Geotechnical Special Publication 40, 1, June 1994, pp. 8-56.

Mesri, G. and M. Shahien. "Prediction of Settlement of Footings on Sand." Prediction Symposium, Geotechnical Special Publication 41, ASCE, (June 1994): pp. 188-191

T. Lunne, P.K. Robertson and J.J.M. Powell, *Cone Penetration testing in Geotechnical Practice*, Taylor & Francis Group Spon Press (London, Jan 1997):

Eurocode 7 - Designers' Guide to EN 1997-1: Geotechnical design - General rules, R Frank, C Bauduin, R Driscoll, M Kavvasas, N Krebs Ovesen, T Orr and B Schuppener;

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - *NCHRP SYNTHESIS 368 Cone Penetration Testing, a Synthesis of Highway Practice* - CONSULTANT PAUL W. MAYNE Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia, Washington D.C., 2007;

Can. Geotech. J. 46: 1337-1355 (2009) *Interpretation of cone penetration tests — a unified approach*. P.K. Robertson;

Gregg Drilling & Testing Inc. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering By P. K. Robertson and K.L. Cabal (Robertson)*, 4th Edition, July 2010.

Inoltre è consultabile in rete il manuale del programma impiegato per l'interpretazione all'indirizzo <http://www.geologismiki.gr/Documentation.html>.

Occorre tenere conto che il programma impiegato è predisposto per illustrare e interpretare prove fatte con punte elettriche e piezocono, che permettono di ottenere dettagli molto maggiori (ogni 1-2 cm), misure accurate, e di registrare le pressioni neutre (non rilevanti in terreni sabbiosi).

In genere inoltre si deve ipotizzare che le misure eseguite siano soggette a errori che arrivano a  $\pm 15\%$  del valore, ai quali si aggiungono le incertezze dei procedimenti interpretativi.

Considerando la rilevante differenza qualitativa tra le prove CPT meccaniche e CPTu, in un lavoro eseguito dallo scrivente in area centro lodigiana, si è sfruttata la possibilità di verificare con verticali eseguite a brevi distanze su terreni complessivamente uniformi, le differenze ottenute con i due tipi di punta.

L'esito di tali confronti ha consentito di rilevare che per quanto riguarda la resistenza alla punta i valori non si differenziano in modo apprezzabile, mentre sensibili discordanze si manifestano nella misura dell'attrito laterale.

Tale circostanza è nota in letteratura ma non è codificata in alcun documento, e ad esempio secondo quanto riferito da F. Cestari (*Prove geotecniche in sito*, 1996 Ed. GeoGraph, pag. 101) "*nelle sabbie il valore di fs con punta meccanica può essere fino a 2 volte quello misurato con la punta elettrica. In argilla tale differenza è praticamente trascurabile*".

Nella sperimentazione citata si sono quindi confrontate le misure ottenute dalle prove CPTu con quelle delle CPT in tratti sicuramente sabbiosi, verificando che i valori di fs delle CPT meccaniche sono superiori di oltre tre volte quelli misurati con la punta elettrica. La medesima verifica è stata condotta nei depositi in prevalenza limo argillosi, ottenendo un rapporto tra fs meccanica / fs elettrica = 1,7 - 1,9.

Partendo quindi dall'assunto che la punta elettrica fornisca la "misura più attendibile", prima di elaborare i dati per definire la litologia e i parametri geotecnici, nel caso citato si sono divisi per 2,0 o 2,5 i valori di fs delle prove nei tratti sabbiosi e per 1,5 i valori di fs di tutti i tratti limo argillosi individuati in un primo momento partendo dai dati originari.

Tale procedura è stata applicata anche ai dati della presente indagine, ottenendo in ogni caso valori cautelativi di tutti i parametri geotecnici derivati. Di seguito si riportano le principali relazioni utilizzate nella presente elaborazione, come indicate in uno degli allegati al programma. Per la determinazione dei parametri  $I_c$ ,  $Q_{tn}$  e  $F_r$  si veda la legenda e i commenti al termine del § 5.2.

Presented below is a list of formulas used for the estimation of various soil properties. The formulas are presented in SI unit system and assume that all components are expressed in the same units.

**:: Unit Weight,  $g$  (kN/m<sup>3</sup>) ::**

$$g = g_w \cdot \left( 0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{P_a}\right) + 1.236 \right)$$

where  $g_w$  = water unit weight

**:: Permeability,  $k$  (m/s) ::**

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$$

**:: N<sub>SPT</sub> (blows per 30 cm) ::**

$$N_{60} = \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

**:: Young's Modulus,  $E_s$  (MPa) ::**

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

(applicable only to  $I_c < I_{c\_cutoff}$ )

**:: Relative Density,  $D_r$  (%) ::**

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \left( \text{applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \right. \\ \left. \text{or } I_c < I_{c\_cutoff} \right)$$

**:: State Parameter,  $\psi$  ::**

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$$

**:: Peak drained friction angle,  $\phi$  (°) ::**

$$\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 5, 6, 7 and 8)

**:: 1-D constrained modulus,  $M$  (MPa) ::**

If  $I_c > 2.20$

$$a = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$a = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

$$M_{CPT} = a \cdot (q_t - \sigma_v)$$

If  $I_c \leq 2.20$

$$M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

**:: Small strain shear Modulus,  $G_0$  (MPa) ::**

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

**:: Shear Wave Velocity,  $V_s$  (m/s) ::**

$$V_s = \left( \frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

**:: Undrained peak shear strength,  $S_u$  (kPa) ::**

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: Remolded undrained shear strength,  $S_{u(rem)}$  (kPa) ::**

$$S_{u(rem)} = f_s \quad \left( \text{applicable only to SBT}_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \right. \\ \left. \text{or } I_c > I_{c\_cutoff} \right)$$

**:: Overconsolidation Ratio, OCR ::**

$$k_{OCR} = \left[ \frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{-1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: In situ Stress Ratio,  $K_0$  ::**

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'}$$

(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: Soil Sensitivity,  $S_t$  ::**

$$S_t = \frac{N_s}{F_r}$$

(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**References**

- Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 5<sup>th</sup> Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337-1355 (2009)

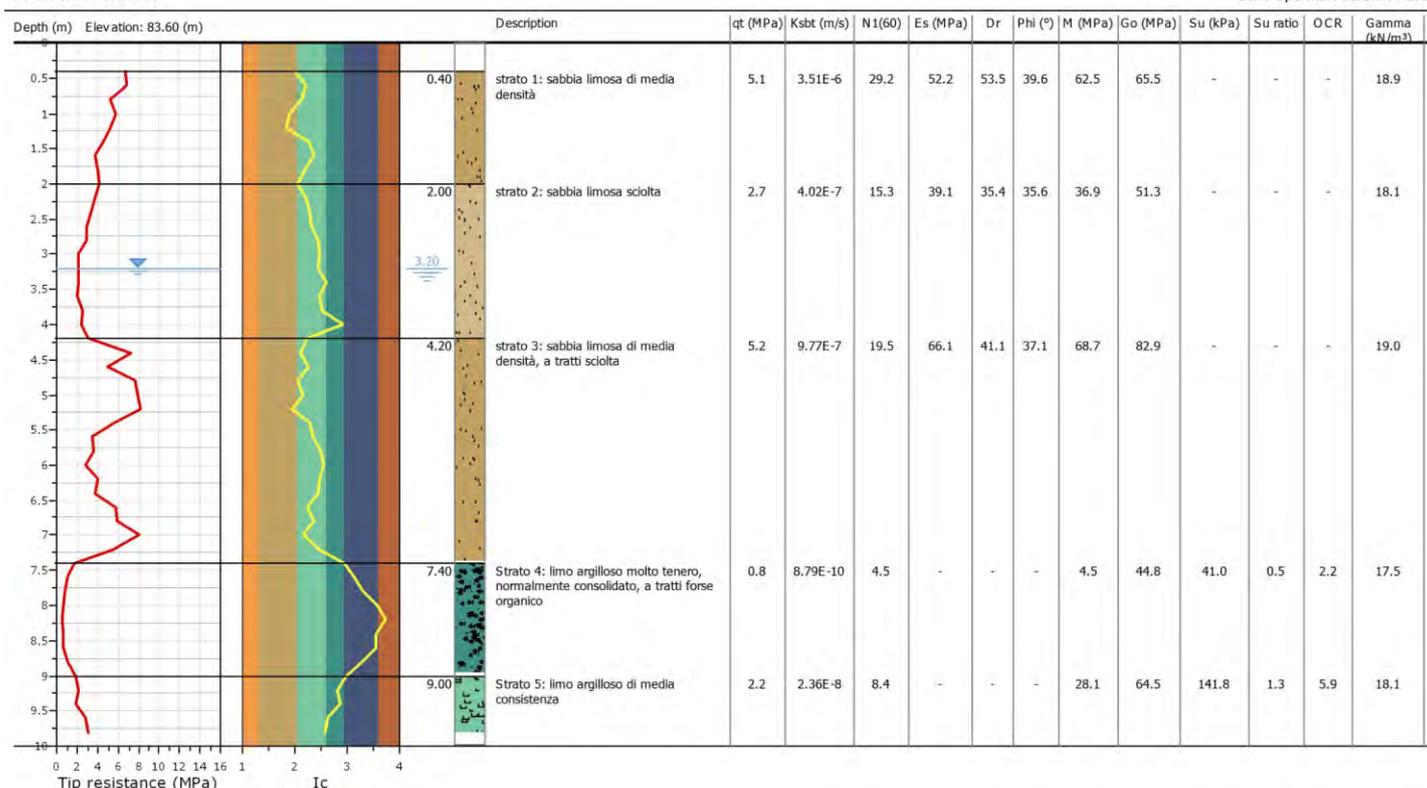
## 5.2 ESITO DELLA PROVA PENETROMETRICA E SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA

L'esame del profilo stratigrafico dei primi metri è stato eseguito mediante due prove penetrometriche statiche, che hanno consentito di osservare la predominanza di depositi sabbioso limosi, talora contenenti lenti limose, in prevalenza sciolti o di medio bassa densità. L'interpretazione sintetica dei dati è riportata dalle seguenti figure: la prova 1 effettuata circa al centro del lato nord dell'area, la seconda al limite SE (Figura 1).

**Dott. Angelo Scotti**  
studio di geologia  
via Lungo Adda 24 - 26026 Pizzighettone  
E.mail ccxsc@tin.it

**Project: PL AT1**  
**Location: Bornasco**

**CPT: CPT-1**  
Total depth: 9.80 m, Date: 25/05/2017  
Surface Elevation: 83.60 m  
Coords: X:0.00, Y:0.00  
Cone Type: Begemann  
Cone Operator: Barbieri Marco



**Summary table of mean values**

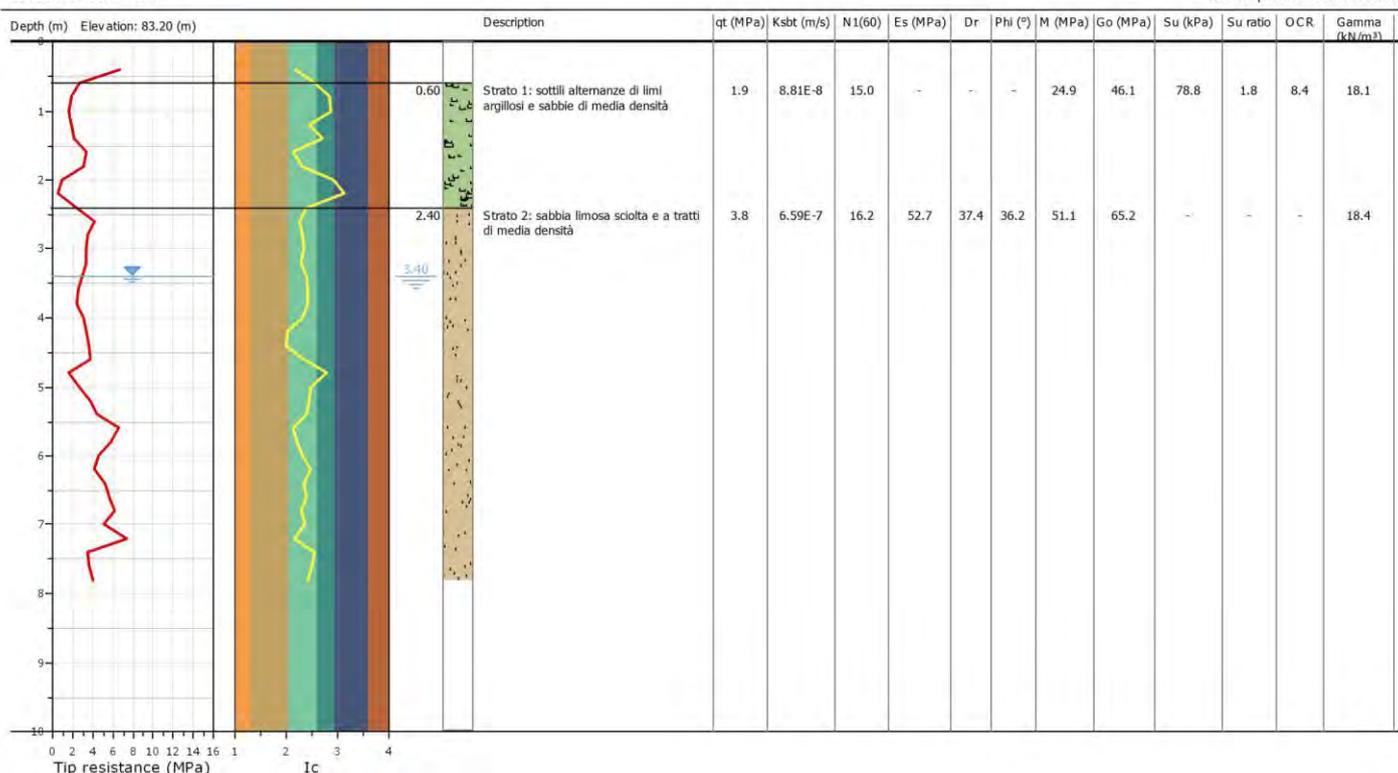
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.40		3.51E-06	29.2	52.2	53.5	39.6	62.5	65.5	0.0	0.0	0.0	18.9
2.00	1.60	(±7.68E-06)	(±6.6)	(±13.2)	(±6.2)	(±1.1)	(±15.4)	(±16.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
2.00		4.02E-07	15.3	39.1	35.4	35.6	36.9	51.3	0.0	0.0	0.0	18.1
4.20	2.20	(±1.52E-06)	(±3.9)	(±4.9)	(±6.4)	(±1.6)	(±8.9)	(±11.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
4.20		9.77E-07	19.5	66.1	41.1	37.1	68.7	82.9	0.0	0.0	0.0	19.0
7.36	3.16	(±2.73E-06)	(±5.5)	(±15.2)	(±7.7)	(±1.8)	(±23.3)	(±19.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
7.40		8.79E-10	4.5	0.0	0.0	0.0	4.5	44.8	41.0	0.5	2.2	17.5
8.96	1.56	(±3.64E-09)	(±1.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.2)	(±7.7)	(±28.2)	(±0.3)	(±1.4)	(±0.4)
9.00		2.36E-08	8.4	0.0	0.0	0.0	28.1	64.5	141.8	1.3	5.9	18.1
9.80	0.80	(±4.23E-08)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.9)	(±3.3)	(±40.7)	(±0.3)	(±1.2)	(±0.2)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

**Dott. Angelo Scotti**  
 studio di geologia  
 via Lungo Adda 24 - 26026 Pizzighettone  
 E.mail ccxsc@tin.it

**Project: PL AT1**  
**Location: Bornasco**

**CPT: CPT-2**  
 Total depth: 7.80 m, Date: 25/05/2017  
 Surface Elevation: 83.20 m  
 Coords: X:542319.15, Y:5009484.00  
 Cone Type: Begemann  
 Cone Operator: Barbieri Marco



**Summary table of mean values**

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>i</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m³)
0.60	1.80	8.81E-08	15.0	0.0	0.0	0.0	24.9	46.1	78.8	1.8	8.4	18.1
2.40	5.40	(±1.03E-06)	(±5.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±12.7)	(±12.1)	(±39.8)	(±0.9)	(±4.3)	(±0.7)
2.40	5.40	6.59E-07	16.2	52.7	37.4	36.2	51.1	65.2	0.0	0.0	0.0	18.4
7.80		(±1.92E-06)	(±4.0)	(±16.0)	(±4.7)	(±1.2)	(±19.8)	(±20.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.8)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

**Figura 12: profili interpretati delle prove CPT e principali parametri geotecnici**

Le figure che seguono riportano in forma grafica gran parte dei dati rilevati e dei parametri derivati delle elaborazioni dalla prova CPT 1, riferite alla quota di inizio della prova stessa.

I valori numerici sono riferiti nelle tabelle che **formano l'allegato 1** alla presente relazione.

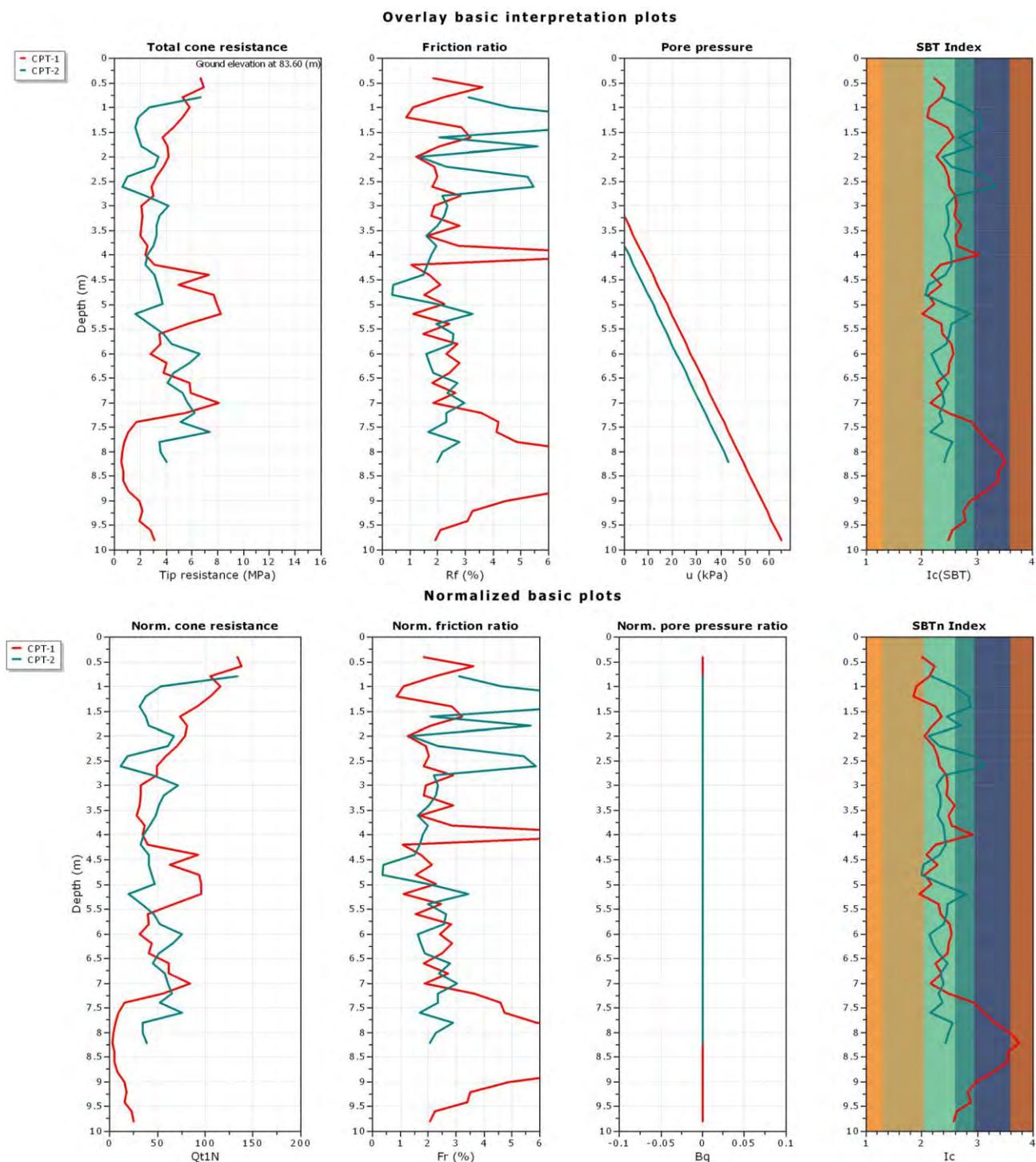
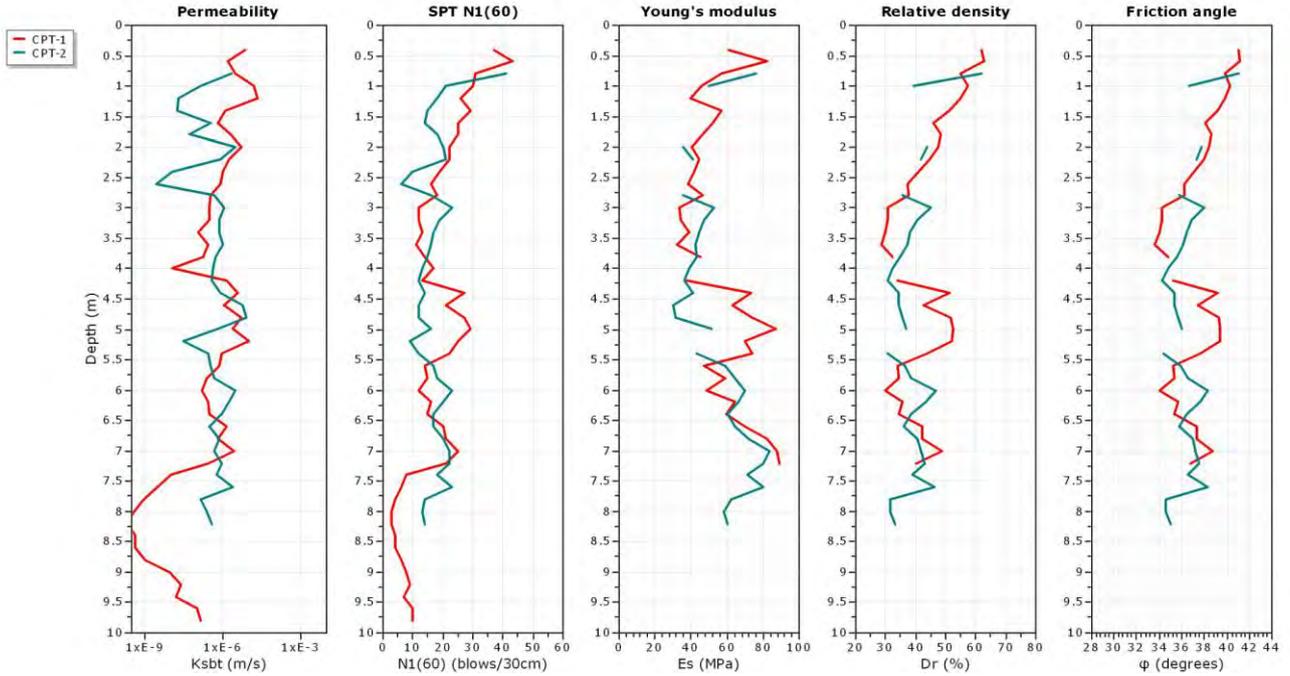
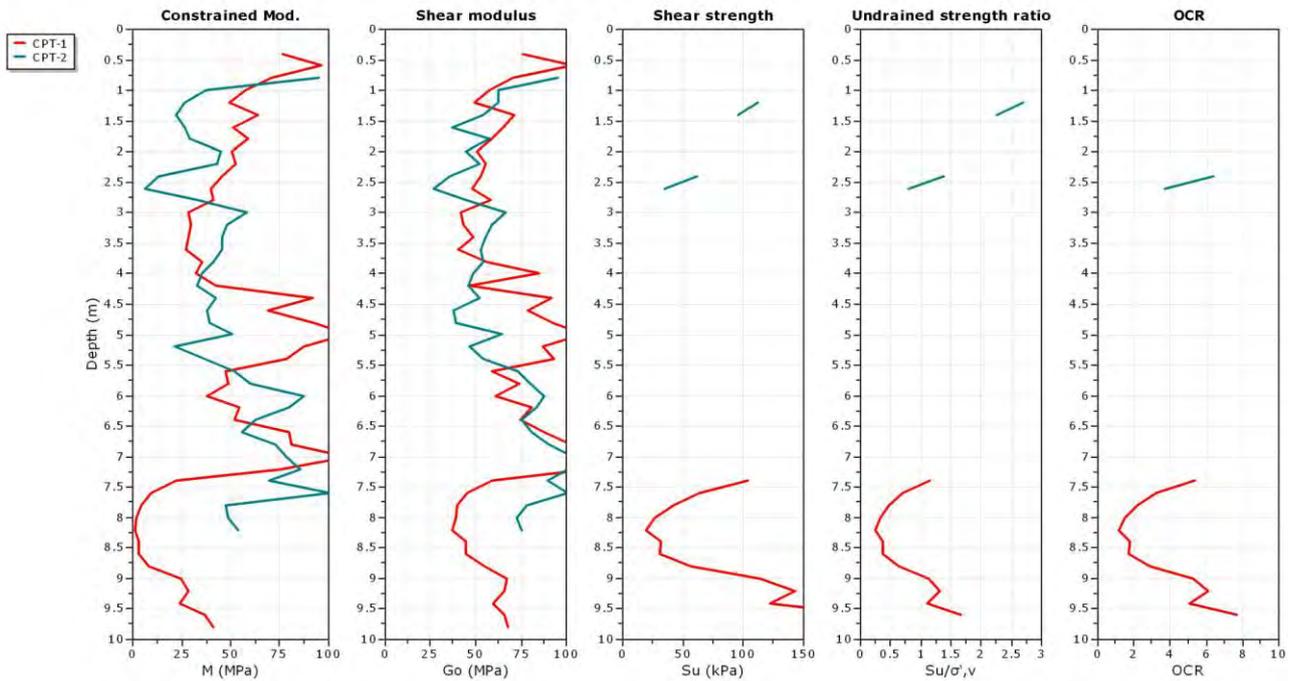


Figura 13 : in alto diagrammi dei valori di resistenza penetrometrica, del rapporto di frizione, della pressione neutra (posta pari alla pressione idrostatica) e dell'indice SBT (Soil Behavior Type). In basso i medesimi valori normalizzati con la profondità.

Overlay estimation plots (1)



Overlay estimation plots (2)



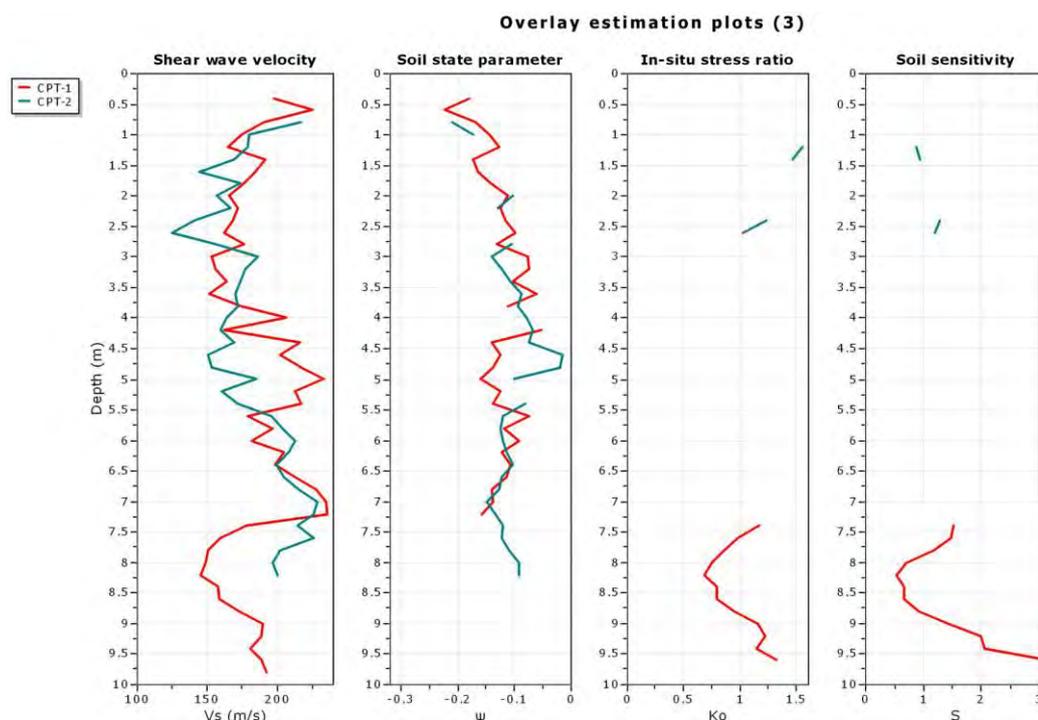


Figura 14: grafici dei parametri geotecnici derivati della prova CPT.

Nel paragrafo 5.1.2 a pag. 20 sono sommariamente descritti il metodo della prova e le relazioni impiegate per l'interpretazione geotecnica. Qui di seguito, a completamento di tali informazioni sono riferiti una legenda e alcuni commenti sui singoli parametri per consentirne una più chiara lettura.

**Tip resistance =  $q_c$  (MPa)** = resistenza alla punta del cono =  $Q_c / A_c$  (resistenza misurata / area del cono proiettata [10 cm<sup>2</sup>]).

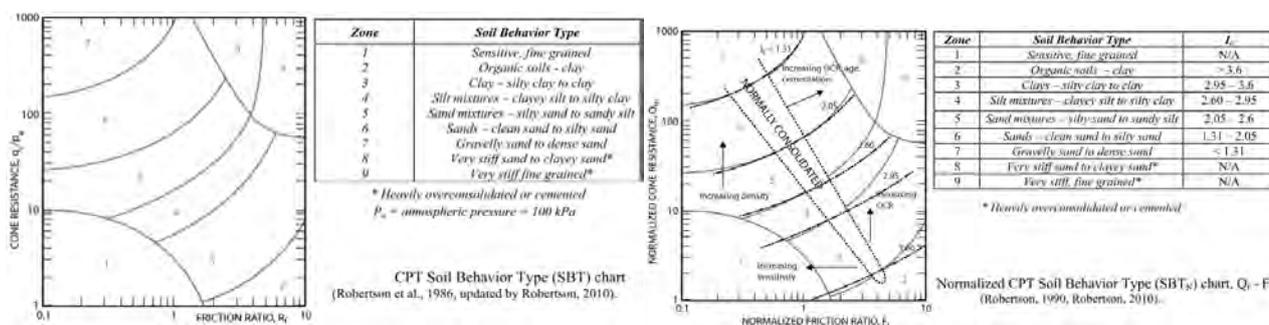
**$q_t$  (MPa) = resistenza del cono corretta** =  $q_c + u_2 (1-a)$  dove "a" è un valore determinato in laboratorio sulla specifica punta impiegata (di norma da 0,7 a 0,85) ed  $u_2$  la misura della pressione neutra ottenuta dalle prove CPTu. Poiché in terreni granulari non si sviluppano sovrappressioni durante l'inserimento del cono, in questi casi si può porre  $q_t = q_c$ . Le presenti prove sono state fatte con la punta meccanica Begemann, che non contiene strumenti per la misura della pressione neutra "u" e necessariamente nell'elaborazione si è posto  $q_t = q_c$ .

**Friction ratio,  $R_f$  %** = il rapporto espresso in termini percentuali tra la resistenza del manicotto di frizione  $f_s$  e la resistenza corretta del cono  $q_t$ .  **$R_f = (f_s / q_t) \times 100\%$ .**

**Relative density** è la densità relativa (%), espressa solo dove i terreni sono grossolani (indicativamente con granuli più grossi di una sabbia fine, dove il comportamento in condizioni statiche è drenato). Il valore della costante nella relazione  $Dr = (Q_{tr}/K_{DR})^{0.5}$  impiegata nella presente stima (Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto*) varia tra 300 per sabbie fini a 400 per sabbie grossolane e incrementa con depositi di età superiore ai 1000 anni, in particolare oltre i 10000 anni (forse presenti oltre i -10 metri circa).

**Shear strenght ( $s_u$ )** esprime la resistenza al taglio in condizioni non drenate (per terreni più fini di una sabbia fine) e deriva da relazioni tra  $q_c$  e  $s_u$  ampiamente accettate in letteratura.

**SBT & SBTn = Soil Behavior Type e Soil Behavior Type Normalized.** Il tipo di terreno riconoscibile dai valori di prova è determinato mediante confronto dei valori di misura semplici o normalizzati, in funzione dello stato di sforzo totale verticale dei terreni alla quota della misura ( $\sigma_{vo}$ ), con grafici predisposti che individuano vari ambiti di appartenenza dei valori letti, ovvero il tipo di comportamento prevalente del terreno (v. figure sottostanti).



Il valore **I<sub>c</sub>** (detto Indice del SBT) deriva da tali grafici e rappresenta il raggio dei cerchi essenzialmente concentrici che formano i limiti degli ambiti omogenei dei terreni sul grafico. Operando con valori normalizzati :  $I_c = ((3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F + 1.22)^2)^{0.5}$  dove:

$$Q_{tn} = \text{resistenza penetrometrica normalizzata (adimensionale)} = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{P_{a2}} * \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

**n** (esponente della tensione) =  $0.381 (I_c) + 0.05 (\sigma'_{vo} / P_a) - 0.15$  con  $n \leq 1$ ,  $P_{a2}$  e  $P_a$  pressioni di riferimento (es 100 kPa) nelle medesime unità rispettivamente di  $\sigma_{vo}$  e  $\sigma'_{vo}$  che a loro volta rappresentano la tensione geostatica totale ed efficace. Il valore di  $I_c$  è ottenuto mediante procedura iterativa finché la variazione di **n** è minore di 0,01. L'esponente **n** varia tipicamente tra 0,5 in sabbie pulite a 1,0 in terreni argillosi.

$$F = \text{rapporto di frizione normalizzato, in \%} = (f_s / (q_c - \sigma_{vo})) * 100.$$

Se l'esponente **n** = 1, il rapporto di frizione normalizzato è **Fr %** =  $(f_s / (q_t - \sigma_{vo})) * 100$  e  $Q_{tn} = Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma'_{vo}}$ . Nei grafici prodotti dal software in uso tale parametro è indicato come  $Q_{t1}$  dove l'indice 1 è utilizzato per precisare che l'esponente impiegato è pari a 1.

**Friction angle ( $\varphi'$ )** è l'angolo di resistenza al taglio ed è il principale parametro impiegato per valutare il carico limite /ammisibile in terreni sabbiosi. Il valore è ottenuto da una relazione che lo pone in rapporto con  $q_c$  ed SBTn (Soil Behavior Type normalized) :  $\varphi' = 17.6 + 11 \log (Q_{tn})$ , ampiamente utilizzata in letteratura, ma molto meno cautelativa di quelle impiegate fino alla fine degli anni '90.

Il rapporto **Undrained Shear Strength Ratio** ( $s_u / \sigma'_{vo}$ ), resistenza al taglio non drenata/sforzo efficace e **OCR** (over consolidation ratio) esprimono il grado di sovraconsolidazione dei depositi fine. Sono relazioni ampiamente note anche se (molto) approssimate.

La **permeabilità k** è una stima di massima da non impiegare in forma esclusiva per progettare drenaggi etc., ma che può essere utile per valutazioni a piccola scala per descrivere le variazioni relative del parametro su ampie superfici.

**Constrained modulus (M)** è il modulo elastico in condizioni confinate (modulo edometrico): è il principale parametro che governa i cedimenti in terreni sotto le fondazioni. Deriva da una relazione con  $q_c$ , SBTn e tensione litostatica alle varie profondità; la relazione è piuttosto recente e a parere dello scrivente non sufficientemente discussa in letteratura. Suggestisco quindi per il momento incrementare del 50 % il valore dei cedimenti che sono determinati con tale procedura, per un principio generale di prudenza. Inoltre gli autori specificano che la stima in presenza di terreni che presentano condizioni non drenate può essere molto approssimativa ed occorre quindi acquisire informazioni sulla plasticità, umidità e contenuto in sostanza organica.

**Shear wave Vs (m/s)** La correlazione tra la velocità delle onde di taglio Vs e la resistenza alla punta conica CPT in funzione del tipo di terreno e dell'indice  $I_c$  del SBT. Le Vs sono sensibili all'età dei depositi e alla cementazione, così che lo stesso tipo di deposito presenta velocità maggiori in terreni più antichi e minori in quelli più recenti. La relazione proposta è espressa dal grafico sotto riportato, che mostra i rapporti tra i valori normalizzati delle CPT e ( $Q_{tn}$  e  $F_r$ ) e valori normalizzati delle velocità delle onde di taglio  $V_{s1}$ , dove  $V_{s1} = V_s (P_a / \sigma'_{vo})^{0.25}$ .

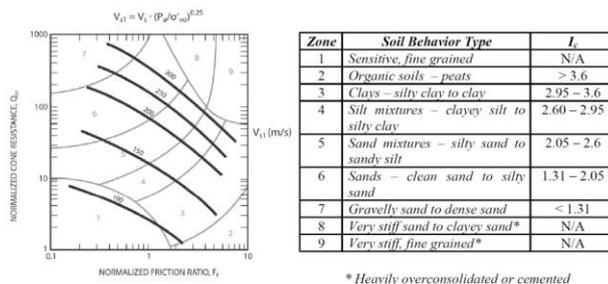


Figure 23 Evaluation of normalized shear wave velocity,  $V_{s1}$ , from CPT for uncemented Holocene and Pleistocene age soils ( $1 \text{ m/s} = 3.28 \text{ ft/sec}$ )

$$V_{s1} = [\alpha_u (q_c - \alpha_u) P_a]^{0.25} \text{ (m/s)}, \text{ where } \alpha_u = 10^{0.22 I_c - 1.40}$$

**Pore pressure u (kPa)** = pressione dei pori (o pressione interstiziale) misurata durante l'infissione. Quando l'elemento poroso che permette la misura è posto dietro il cono la lettura è indicata come  $u_2$ , mentre quando è collocata sulla punta è indicata come  $u_1$ . Nel nostro caso non essendo possibile la misura della pressione neutra, questa è stata posta pari alla pressione idrostatica alle varie quote di misura ( $\gamma_w * z$ ).

**B<sub>q</sub>** = rapporto normalizzato della pressione interstiziale =  $\Delta u / q_n$ , dove  $\Delta u$  (sovrapressione interstiziale) =  $u_2 - u_0$ , con  $u_2$  misura della pressione interstiziale letta durante l'inserimento del cono CPTU,  $u_0$  misura della pressione idrostatica e  $q_n = q_t - \sigma_{vo}$  è la resistenza netta del cono. La misura è utilizzata particolarmente nelle

prove a mare, dove la perfetta saturazione del cono è quasi sempre garantita, per migliorare mediante grafici analoghi a quelli sopra riferiti l'individuazione del parametro SBTn. Inoltre  $B_q$  è correlato inversamente al coefficiente  $N_k$ , utilizzato per determinare il valore della resistenza al taglio in condizioni non drenate  $s_u$  [ $s_u = (q_t - \sigma_{vo})/N_k$ ], e può fornire una stima dei parametri drenati  $c'$  e  $\varphi'$  in presenza di terreni fini normalmente consolidati o poco sovraconsolidati. Nel caso in esame il parametro  $B_q$  non può essere individuato, e in ogni modo non avrebbe utilità pratica in terreni sabbiosi.

$N_{SPT(60)}$  è una stima basata del valore corrispondente di numero di colpi della prova SPT in foro, che mostra discreta affidabilità in terreni sabbiosi.

**Young's modulus** è una stima del modulo elastico non confinato applicabile in sabbie silicee di recente deposizione non cementate, definito a circa lo 0,1% di deformazione.

**Small strain shear modulus ( $G_0$ )** è il modulo di resistenza al taglio con piccole deformazioni, inferiori a  $\gamma = 10^{-4}$  %. Secondo la teoria elastica è correlato al modulo di Young e al rapporto di Poisson ( $\nu$ ) dalla relazione  $E_0 = 2(1 + \nu)G_0$  dove  $\nu$  assume valori compresi tra 0.1 e 0.3 in gran parte dei terreni. Spesso si stima mediante le indagini sismiche.

**State parameter.** Il parametro di stato  $\psi$  rappresenta la differenza tra l'indice dei vuoti  $e_0$  del terreno in condizioni naturali e l'indice dei vuoti allo stato critico  $e_{cs}$ , che rappresenta lo stato ultimo oltre il quale il terreno continua a deformarsi senza variazioni di volume e resistenza. Il parametro è individuato da relazioni validate sperimentalmente in camera di calibrazione, principalmente in sabbie oloceniche non cementate, con la resistenza penetrometrica normalizzata equivalente in sabbia pulita  $Q_{tn,cs}$ .

**In-Situ Stress Ratio ( $K_0$ )**, coefficiente di spinta dei terreni a riposo. Non esiste una relazione affidabile per individuare questo parametro con prove CPT e quella proposta fornisce risultati di considerare di larga massima. L'approccio inoltre è generalmente limitato a depositi coesivi sovraconsolidati meccanicamente.

**Soil Sensitivity:** la sensitività ( $S_t$ ) di un deposito argilloso è definita dal rapporto tra la resistenza al taglio di picco in condizioni non drenate ( $S_u$ ) e la resistenza al taglio in condizioni non drenate dello stesso terreno totalmente rimaneggiato ( $S_{ur,rem}$ ), il cui valore può essere assunto pari alla resistenza del manicotto di frizione  $f_s$ . Comunemente si assume la relazione  $S_t = 7/Fr$  e per valori relativamente elevati di  $S_t$  ( $> 10$ ) la resistenza di attrito laterale  $f_s$  diviene così bassa da rendere difficile la sua misura in sito anche con la punta elettrica.

## 6 Conclusioni sugli aspetti geotecnici

Le analisi hanno consentito di confermare la presenza di modeste problematiche di carattere geotecnico per l'area di progetto, in particolare connesse alla presenza di depositi sabbiosi di media e bassa densità.

Si evidenzia inoltre la presenza di terreni molto compressibili, forse torbosi, a profondità comprese tra -7,4 e -9 metri nella prova 1. Tale circostanza è di particolare rilevanza in caso di utilizzo di fondazioni profonde. Più in generale le indagini che dovranno accompagnare i progetti di opere dovranno tenere conto di tale informazione.

La falda è stata osservata a profondità rispettivamente di 3,2 e 3,4 metri dalla superficie e indica una generale direzione verso sud del flusso, anche se non è possibile determinare la precisa direzione sulla base di soli due punti di misura .

.  
.



## 7 Allegati

- 1) valori tabellari dei dati delle prove CPT 1/2 e CPT 2/2 e dei parametri geotecnici derivati;

## PROVA CPT 1/2

Depth (m)	qc (MPa)	fs (kPa)	u (kPa)	Other	qt (MPa)	Rf (%)	SBT	IcSBT	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{v, \nu}$ (kPa)	u0 (kPa)	$\sigma'_{vo}$ (kPa)	Qt1	Fr (%)	Bq	SBTn	n	Cn	Ic	Qtn
0.4	6.7	124	0	0	6.7	1.85	5	2.22	19.3	7.7	0	7.7	868.5	1.86	0	6	0.62	2	2.01	133.8
0.6	6.9	248	0	0	6.9	3.6	4	2.42	20.1	11.7	0	11.7	587.7	3.61	0	5	0.7	2	2.22	137.8
0.8	5.3	118	0	0	5.3	2.22	5	2.35	19.1	15.5	0	15.5	340.0	2.23	0	5	0.67	2	2.13	105.7
1	5.8	65	0	0	5.8	1.13	5	2.13	18.5	19.2	0	19.2	300.5	1.13	0	6	0.58	2	1.9	115.6
1.2	5.3	46	0	0	5.3	0.86	5	2.1	18.0	22.8	0	22.8	231.0	0.87	0	6	0.57	2	1.85	105.5
1.4	4.6	131	0	0	4.6	2.84	4	2.47	19.2	26.7	0	26.7	171.4	2.86	0	5	0.72	2	2.26	91.5
1.6	3.7	118	0	0	3.7	3.18	4	2.57	19.0	30.5	0	30.5	120.4	3.21	0	5	0.76	2	2.36	73.4
1.8	4.1	85	0	0	4.1	2.07	5	2.41	18.6	34.2	0	34.2	118.9	2.09	0	5	0.7	2	2.19	81.3
2	4.2	52	0	0	4.2	1.25	5	2.27	18.1	37.8	0	37.8	110.1	1.26	0	5	0.65	1.89	2.05	78.5
2.2	3.8	72	0	0	3.8	1.89	5	2.42	18.4	41.5	0	41.5	90.6	1.91	0	5	0.71	1.87	2.21	70.4
2.4	3.3	65	0	0	3.3	1.98	5	2.48	18.3	45.2	0	45.2	72.1	2.01	0	5	0.74	1.8	2.28	58.7
2.6	2.9	52	0	0	2.9	1.8	5	2.5	17.9	48.7	0	48.7	58.5	1.83	0	5	0.76	1.72	2.32	49.1
2.8	3	85	0	0	3	2.83	4	2.61	18.5	52.4	0	52.4	56.2	2.88	0	5	0.81	1.68	2.44	49.6
3	2.1	39	0	0	2.1	1.87	4	2.62	17.5	55.9	0	55.9	36.5	1.92	0	5	0.82	1.61	2.46	32.9
3.2	2.2	39	0	0	2.2	1.78	4	2.59	17.5	59.4	0	59.4	36.0	1.83	0	5	0.81	1.53	2.45	32.7
3.4	2.1	59	2	0	2.1	2.8	4	2.72	18.0	63.0	2	61.1	33.4	2.89	0	5	0.87	1.53	2.59	31.3
3.6	2	33	3.9	0	2	1.63	4	2.6	17.3	66.5	3.9	62.6	30.9	1.69	0	5	0.83	1.47	2.48	28.5
3.8	2.6	72	5.9	0	2.6	2.76	4	2.65	18.3	70.1	5.9	64.3	39.4	2.84	0	5	0.85	1.46	2.53	36.8
4	2.4	222	7.9	0	2.4	9.26	3	3.03	19.5	74.1	7.8	66.2	35.2	9.55	0	4	1	1.51	2.92	35.1
4.2	3.1	33	9.8	0	3.1	1.05	5	2.34	17.4	77.5	9.8	67.7	44.7	1.08	0	5	0.74	1.33	2.25	40.3
4.4	7.3	124	11.8	0	7.3	1.7	5	2.17	19.3	81.4	11.8	69.6	103.7	1.72	0	5	0.68	1.28	2.09	92.4
4.6	5	105	13.7	0	5	2.09	5	2.35	19.0	85.2	13.7	71.5	68.8	2.13	0	5	0.75	1.29	2.28	63.3
4.8	7.7	118	15.7	0	7.7	1.53	5	2.12	19.3	89.0	15.7	73.3	103.8	1.55	0	5	0.67	1.23	2.06	93.7
5	7.9	177	17.7	0	7.9	2.23	5	2.23	19.7	93.0	17.7	75.3	103.7	2.26	0	5	0.71	1.22	2.17	95.6
5.2	8.2	92	19.6	0	8.2	1.12	6	2.01	19.0	96.8	19.6	77.2	105.1	1.13	0	6	0.64	1.18	1.96	95.6
5.4	5.7	137	21.6	0	5.7	2.41	5	2.35	19.3	100.7	21.6	79.1	70.9	2.45	0	5	0.77	1.2	2.3	67.1
5.6	3.5	52	23.5	0	3.5	1.49	5	2.38	18.0	104.3	23.5	80.7	42.1	1.54	0	5	0.78	1.18	2.34	40.2
5.8	3.6	98	25.5	0	3.61	2.72	4	2.53	18.8	108.0	25.5	82.5	42.4	2.81	0	5	0.84	1.18	2.5	41.1
6	2.8	65	27.5	0	2.81	2.33	4	2.58	18.2	111.6	27.5	84.2	32.0	2.43	0	5	0.86	1.16	2.55	31.3
6.2	4	111	29.4	0	4.01	2.77	4	2.5	18.9	115.4	29.4	86.0	45.2	2.86	0	5	0.84	1.13	2.48	44.1
6.4	3.8	92	31.4	0	3.81	2.4	4	2.48	18.7	119.2	31.4	87.8	42.0	2.48	0	5	0.83	1.11	2.46	41.1
6.6	5.8	105	33.4	0	5.81	1.8	5	2.26	19.0	123.0	33.4	89.6	63.4	1.84	0	5	0.75	1.09	2.24	61.7
6.8	5.9	157	35.3	0	5.91	2.66	5	2.37	19.5	126.9	35.3	91.6	63.1	2.71	0	5	0.79	1.07	2.36	62.0
7	8.1	150	37.3	0	8.11	1.86	5	2.16	19.6	130.8	37.3	93.5	85.3	1.89	0	5	0.72	1.05	2.15	83.7
7.2	5.5	196	39.3	0	5.51	3.56	4	2.48	19.7	134.7	39.2	95.5	56.3	3.65	0	5	0.84	1.04	2.48	55.9
7.4	1.7	72	41.2	0	1.71	4.21	3	2.9	18.1	138.3	41.2	97.1	16.2	4.58	0	4	1	1.03	2.94	16.2
7.6	1.1	46	43.2	0	1.11	4.13	3	3.05	17.4	141.8	43.2	98.7	9.8	4.74	0	3	1	1.01	3.12	9.8
7.8	0.8	39	45.2	0	0.81	4.85	3	3.2	17.1	145.3	45.1	100.1	6.6	5.91	0	3	1	1	3.31	6.6
8	0.6	46	47.2	0	0.61	7.52	3	3.41	17.2	148.7	47.1	101.6	4.5	9.94	0	3	1	0.98	3.58	4.5
8.2	0.5	46	49.1	0	0.51	8.98	2	3.52	17.1	152.1	49	103.1	3.5	12.8	0	2	1	0.97	3.74	3.5
8.4	0.7	59	51.1	0	0.71	8.28	3	3.38	17.5	155.6	51	104.6	5.3	10.6	0	3	1	0.96	3.55	5.3
8.6	0.7	59	53.1	0	0.71	8.27	3	3.38	17.5	159.1	53	106.2	5.2	10.66	0	3	1	0.94	3.56	5.2
8.8	1.1	72	55	0	1.11	6.47	3	3.17	17.9	162.7	54.9	107.8	8.8	7.58	0	3	1	0.93	3.28	8.8
9	1.9	85	57	0	1.91	4.45	3	2.88	18.3	166.4	56.9	109.5	15.9	4.87	0	3	1	0.91	2.96	15.9
9.2	2.2	72	59	0	2.21	3.25	4	2.75	18.2	170.0	58.9	111.2	18.4	3.52	0	4	0.98	0.9	2.83	18.4
9.4	1.9	59	60.9	0	1.91	3.08	4	2.78	17.9	173.6	60.8	112.8	15.4	3.38	0	4	1	0.89	2.88	15.4
9.6	2.8	59	62.9	0	2.81	2.09	4	2.55	18.1	177.2	62.8	114.5	23.0	2.23	0	4	0.91	0.88	2.62	23.3
9.8	3.1	60	64.9	0	3.11	1.93	5	2.49	18.1	180.9	64.7	116.1	25.3	2.05	0	5	0.89	0.88	2.57	25.7

Depth (m)	In situ data										Estimations									
	qc (MPa)	fs (kPa)	SBTn	Nkbt (m/s)	SPT N60 (blows/30cm)	Constrained Mod. (MPa)	Dr (%)	Friction angle (°)	Es (MPa)	Go (MPa)	Nkt	Su (kPa)	Su ratio	Kocr	OCR	Vs (m/s)	State parameter	Ko	Sensitivity	
0.4	6.7	124	6	7.2E-06	37	76.3	62	41	61	76	0	0	0	0.3	0	197	-0.18	0	0	
0.6	6.9	248	5	1.6E-06	43	96.4	63	41	82	103	0	0	0	0.3	0	224	-0.22	0	0	
0.8	5.3	118	5	2.9E-06	31	70.8	55	40	57	71	0	0	0	0.3	0	191	-0.17	0	0	
1	5.8	65	6	1.5E-05	30	57.5	57	40	46	58	0	0	0	0.3	0	175	-0.15	0	0	
1.2	5.3	46	6	2.1E-05	26	49.6	55	40	40	50	0	0	0	0.3	0	164	-0.13	0	0	
1.4	4.6	131	5	1.3E-06	29	64	51	39	57	72	0	0	0	0.3	0	191	-0.17	0	0	
1.6	3.7	118	5	6.1E-07	25	51.4	46	38	52	65	0	0	0	0.3	0	184	-0.16	0	0	
1.8	4.1	85	5	1.9E-06	25	58.7	48	39	47	59	0	0	0	0.3	0	176	-0.14	0	0	
2	4.2	52	5	5.1E-06	22	50.5	47	38	40	51	0	0	0	0.3	0	166	-0.11	0	0	
2.2	3.8	72	5	1.7E-06	22	52.6	45	38	44	56	0	0	0	0.3	0	172	-0.13	0	0	
2.4	3.3	65	5	1.0E-06	19	45.6	41	37	42	53	0	0	0	0.3	0	168	-0.12	0	0	
2.6	2.9	52	5	8.1E-07	16	39.9	37	36	38	48	0	0	0	0.3	0	162	-0.1	0	0	
2.8	3	85	5	3.3E-07	18	41.3	38	36	47	59	0	0	0	0.3	0	176	-0.13	0	0	
3	2.1	39	5	2.9E-07	12	28.6	31	34	33	42	0	0	0	0.3	0	153	-0.08	0	0	
3.2	2.2	39	5	3.1E-07	12	30	31	34	34	43	0	0	0	0.3	0	155	-0.07	0	0	
3.4	2.1	59	5	1.2E-07	13	28.5	30	34	39	49	0	0	0	0.3	0	163	-0.1	0	0	
3.6	2	33	5	2.6E-07	11	27.1	29	34	32	40	0	0	0	0.3	0	151	-0.06	0	0	
3.8	2.6	72	5	1.8E-07	14	35.4	32	35	45	56	0	0	0	0.3	0	174	-0.11	0	0	
4	2.4	222	4	1.2E-08	17	32.6	0	0	0	85	17.4	134	2	0.3	11.6	206	0	1.5	0.7	
4.2	3.1	33	5	1.3E-06	13	42.3	34	35	37	47	0	0	0	0.3	0	162	-0.05	0	0	
4.4	7.3	124	5	3.9E-06	27	92	51	39	73	92	0	0	0	0.3	0	216	-0.14	0	0	
4.6	5	105	5	1.1E-06	21															

### PROVA CPT 2/2

Depth (m)	In situ data				Basic output data																
	qc (MPa)	fs (kPa)	u (kPa)	Other	qt (MPa)	Rf (%)	SBT	Ic SBT	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_v$ (kPa)	u0 (kPa)	$\sigma'_{vo}$ (kPa)	Qt1	Fr (%)	Bq	SBTn	n	Cn	Ic	Qtn	
0.4	6.7	209	0	0	6.7	3.12	5	2.38	19.9	7.9	0	7.9	842.2	3.13	0	5	0.68	2	2.18	133.8	
0.6	2.7	124	0	0	2.7	4.6	3	2.78	18.9	11.7	0	11.7	229.2	4.62	0	5	0.83	2	2.56	53.8	
0.8	1.9	150	0	0	1.9	7.92	3	3.05	19.0	15.5	0	15.5	121.4	7.98	0	4	0.94	2	2.84	37.7	
1	1.6	118	0	0	1.6	7.36	3	3.08	18.7	19.3	0	19.3	82.1	7.45	0	4	0.95	2	2.87	31.6	
1.2	1.9	39	0	0	1.9	2.06	4	2.68	17.5	22.8	0	22.8	82.5	2.09	0	5	0.79	2	2.44	37.5	
1.4	2.1	118	0	0	2.1	5.6	3	2.92	18.8	26.5	0	26.5	78.2	5.68	0	4	0.89	2	2.71	41.5	
1.6	3.4	46	0	0	3.4	1.35	5	2.37	17.9	30.1	0	30.1	112.1	1.36	0	5	0.68	2	2.13	67.4	
1.8	3.1	72	0	0	3.1	2.32	4	2.54	18.3	33.7	0	33.7	90.9	2.34	0	5	0.75	2	2.31	61.3	
2	1	52	0	0	1	5.23	3	3.14	17.5	37.2	0	37.2	25.8	5.43	0	4	0.99	2	2.93	19.3	
2.2	0.6	33	0	0	0.6	5.45	3	3.33	16.8	40.6	0	40.6	13.8	5.85	0	3	1	2	3.13	11.2	
2.4	2.4	52	0	0	2.4	2.18	4	2.61	17.9	44.2	0	44.2	53.3	2.22	0	5	0.79	1.9	2.4	44.8	
2.6	4.2	98	0	0	4.2	2.34	5	2.44	18.8	47.9	0	47.9	86.6	2.36	0	5	0.74	1.72	2.27	71.5	
2.8	3.5	78	0	0	3.5	2.24	4	2.49	18.5	51.6	0	51.6	66.8	2.27	0	5	0.76	1.66	2.33	57.1	
3	3.3	65	0	0	3.3	1.98	5	2.48	18.3	55.3	0	55.3	58.7	2.02	0	5	0.77	1.57	2.33	51.1	
3.2	3.3	52	0	0	3.3	1.58	5	2.42	18.0	58.9	0	58.9	55.0	1.61	0	5	0.75	1.49	2.29	48.2	
3.4	3	59	0	0	3	1.96	4	2.51	18.1	62.5	0	62.5	47.0	2	0	5	0.79	1.45	2.39	42.6	
3.6	2.6	46	2	0	2.6	1.76	4	2.53	17.8	66.1	2	64.1	39.5	1.81	0	5	0.8	1.43	2.42	36.2	
3.8	2.4	39	3.9	0	2.4	1.63	4	2.54	17.5	69.6	3.9	65.6	35.5	1.68	0	5	0.81	1.41	2.43	32.8	
4	3.1	46	5.9	0	3.1	1.48	5	2.42	17.8	73.1	5.9	67.3	45.0	1.51	0	5	0.77	1.36	2.32	41.1	
4.2	3.3	13	7.9	0	3.3	0.4	5	2.12	16.4	76.4	7.8	68.6	47.0	0.41	0	6	0.66	1.28	2.03	41.3	
4.4	3.6	13	9.8	0	3.6	0.36	6	2.07	16.4	79.7	9.8	69.9	50.4	0.37	0	6	0.64	1.26	1.99	44.3	
4.6	3.7	72	11.8	0	3.7	1.94	5	2.43	18.4	83.4	11.8	71.6	50.5	1.99	0	5	0.78	1.3	2.35	47.0	
4.8	1.6	52	13.7	0	1.6	3.26	3	2.86	17.7	86.9	13.7	73.2	20.7	3.45	0	4	0.95	1.34	2.79	20.4	
5	2.7	52	15.7	0	2.7	1.93	4	2.54	17.9	90.5	15.7	74.8	34.9	2	0	5	0.83	1.27	2.47	33.2	
5.2	3.8	98	17.7	0	3.8	2.58	4	2.5	18.8	94.3	17.7	76.6	48.4	2.64	0	5	0.82	1.24	2.44	46.1	
5.4	4.4	111	19.6	0	4.4	2.52	5	2.45	19.0	98.1	19.6	78.4	54.9	2.58	0	5	0.8	1.21	2.39	52.3	
5.6	6.6	105	21.6	0	6.6	1.58	5	2.18	19.1	101.9	21.6	80.3	81.0	1.61	0	5	0.7	1.17	2.14	75.9	
5.8	5.8	98	23.5	0	5.8	1.69	5	2.24	18.9	105.7	23.5	82.1	69.4	1.72	0	5	0.73	1.15	2.2	65.8	
6	4.6	85	25.5	0	4.6	1.85	5	2.34	18.7	109.4	25.5	83.9	53.6	1.89	0	5	0.77	1.15	2.31	51.5	
6.2	4.1	111	27.5	0	4.1	2.71	4	2.49	18.9	113.2	27.5	85.7	46.6	2.78	0	5	0.83	1.14	2.46	45.4	
6.4	5.3	124	29.4	0	5.3	2.34	5	2.36	19.2	117.0	29.4	87.6	59.2	2.39	0	5	0.79	1.11	2.34	57.6	
6.6	5.7	170	31.4	0	5.7	2.98	5	2.41	19.6	120.9	31.4	89.5	62.4	3.04	0	5	0.81	1.09	2.4	61.1	
6.8	6.2	144	33.4	0	6.2	2.32	5	2.31	19.4	124.8	33.4	91.5	66.5	2.36	0	5	0.77	1.07	2.3	65.2	
7	5.1	118	35.3	0	5.1	2.3	5	2.37	19.1	128.6	35.3	93.3	53.3	2.36	0	5	0.8	1.06	2.37	52.6	
7.2	7.4	124	37.3	0	7.4	1.68	5	2.16	19.3	132.5	37.3	95.2	76.4	1.71	0	5	0.72	1.04	2.16	75.4	
7.4	3.5	98	39.3	0	3.5	2.8	4	2.55	18.7	136.2	39.2	97.0	34.8	2.91	0	5	0.87	1.03	2.56	34.6	
7.6	3.6	78	41.2	0	3.6	2.17	5	2.47	18.5	139.9	41.2	98.7	35.1	2.26	0	5	0.85	1.01	2.49	35.1	
7.8	4	80	43.2	0	4.0	2	5	2.41	18.6	143.7	43.2	100.5	38.5	2.07	0	5	0.83	1	2.43	38.5	

Depth (m)	In situ data				Estimations																
	qc (MPa)	fs (kPa)	SBTn	Ksbt (m/s)	SPT N60 (blows/30cm)	Constrained Mod. (MPa)	Dr (%)	Friction angle (°)	Es (MPa)	Go (MPa)	Nkt	Su (kPa)	Su ratio	Kocr	OCR	Vs (m/s)	State parameter	Ko	Sensitivity		
0.4	6.7	209	5	2.1E-06	41	95	62	41	76	95	0	0	0	0.3	0	217	-0.21	0	0		
0.6	2.7	124	5	1.4E-07	21	37.6	39	37	50	62	0	0	0	0.3	0	180	-0.17	0	0		
0.8	1.9	150	4	2.0E-08	18	26.4	0	0	0	62	16.8	112	2.2	0.3	12.4	179	0	1.6	0.9		
1	1.6	118	4	1.7E-08	15	22.1	0	0	0	54	16.6	95	1.9	0.3	10.4	169	0	1.5	0.9		
1.2	1.9	39	5	3.4E-07	14	26.3	33	35	30	37	0	0	0	0.3	0	145	-0.09	0	0		
1.4	2.1	118	4	5.3E-08	18	29	0	0	0	58	15.8	131	2.6	0.3	13.7	173	0	1.6	1.2		
1.6	3.4	46	5	3.1E-06	20	44.9	44	38	36	45	0	0	0	0.3	0	157	-0.1	0	0		
1.8	3.1	72	5	8.2E-07	21	42.9	42	37	41	52	0	0	0	0.3	0	166	-0.13	0	0		
2	1	52	4	1.1E-08	10	13.5	0	0	0	36	15.6	62	1.2	0.3	6.4	141	0	1.2	1.3		
2.2	0.6	33	3	2.7E-09	6	6.3	0	0	0	27	15.9	35	0.7	0.3	3.7	125	0	1	1.2		
2.4	2.4	52	5	4.5E-07	16	33	36	36	35	44	0	0	0	0.3	0	156	-0.11	0	0		
2.6	4.2	98	5	1.1E-06	23	58.1	45	38	53	66	0	0	0	0.3	0	186	-0.14	0	0		
2.8	3.5	78	5	7.5E-07	19	48.3	40	37	47	59	0	0	0	0.3	0	177	-0.12	0	0		
3	3.3	65	5	7.4E-07	17	45.4	38	36	45	56	0	0	0	0.3	0	173	-0.11	0	0		
3.2	3.3	52	5	1.0E-06	16	45.4	37	36	42	53	0	0	0	0.3	0	170	-0.09	0	0		
3.4	3	59	5	4.9E-07	15	41.1	35	36	43	54	0	0	0	0.3	0	172	-0.09	0	0		
3.6	2.6	46	5	4.1E-07	13	35.5	32	35	39	49	0	0	0	0.3	0	164	-0.08	0	0		
3.8	2.4	39	5	3.6E-07	12	32.6	31	34	36	46	0	0	0	0.3	0	160	-0.07	0	0		
4	3.1	46	5	7.7E-07	14	42.4	34	35	41	52	0	0	0	0.3	0	169	-0.07	0	0		
4.2	3.3	13	6	6.0E-06	12	38	34	35	30	38	0	0	0	0.3	0	151	-0.02	0	0		
4.4	3.6	13	6	8.1E-06	12	39.3	36	36	31	39	0	0	0	0.3	0	153	-0.02	0	0		
4.6	3.7	72	5	6.3E-07	16	50.7	37	36	51	64	0	0	0	0.3	0	185	-0.1	0	0		
4.8	1.6	52	4	3.1E-08	9	21.2	0	0	0	46	14.3	106	1.4	0.3	6.7	160	0	1.3	2		
5	2.7	52	5	2.7E-07	12	36.6	31	34	43	54	0	0	0	0.3	0	172	-0.08	0	0		
5.2	3.8	98	5	3.4E-07	17	51.9	36	36	59	73	0	0	0	0.3	0	196	-0.12	0	0		
5.4	4.4	111	5	4.7E-07	18	60.3	39	37	64	80	0	0	0	0.3	0	204	-0.13	0	0		
5.6	6.6	105	5	2.9E-06	23	87.5	47	38	70	87	0	0	0	0.3	0	212	-0.12	0	0		
5.8	5.8	98	5	1.8E-06	20	79.8	43	38	67	83	0	0	0	0.3	0	208	-0.11	0	0		
6	4.6	85	5	8.6E-07	17	62.9	38	36	60	75	0	0	0	0.3	0	199	-0.1	0	0		
6.2	4.1	111	5	3.0E-07	17	55.9	36	36	65	81	0	0	0	0.3	0	205	-0.12	0	0		
6.4	5.3	124	5	6.9E-07	20	72.6	41	37	72	91	0	0	0	0.3	0	215	-0.13	0	0		
6.6	5.7	170	5	4.7E-07	22	78.2	42	37	83	104	0	0	0	0.3	0	229	-0.15	0	0		
6.8	6.2	144	5	9.2E-07	22	85.1	43	38	80	101	0	0	0	0.3	0	225	-0.13	0	0		
7	5.1	118	5	5.7E-07	18	69.7	39	37	72	90	0	0	0	0.3	0	21					