



PROLUNGAMENTO DELLA S.S. n° 9 "TANGENZIALE NORD di REGGIO EMILIA" NEL TRATTO DA S. PROSPERO STRINATI A CORTE TEGGE

PROGETTO DEFINITIVO

COORDINAMENTO GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

 **COMUNE DI REGGIO EMILIA**
ing. David Zilioli - Dirig. U.diP. Area Nord

IL PROGETTISTA:

dott. ing. Andrea Burchi
Ordine Ingegneri di Bologna n° 7927A



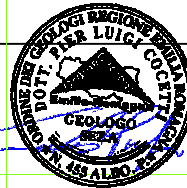
IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

dott. ing. Rodolfo Biondi
Ordine Ingegneri di Modena n° 1256



IL GEOLOGO:

dott. geol. Pier Luigi Cocetti
Ordine Geologi della Regione Emilia Romagna n° 455



GRUPPO DI PROGETTAZIONE:


SITECO
ing. Andrea Burchi

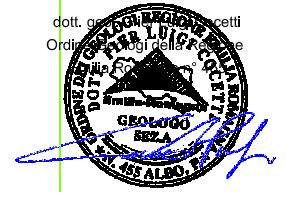
PROGETTISTA

dott. ing. Andrea Burchi
Ordine Ingegneri di Bologna n° 7927A



**TECNICO COMPETENTE
(O PROGETTISTA SPECIALISTICO)**

dott. geol. Pier Luigi Cocetti
Ordine Geologi della Regione Emilia Romagna n° 455



VISTO: IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO

ing. Angela Maria Carbone

VISTO: IL RESPONSABILE
UNITA' DEL COORDINAMENTO

ing. Nicola Dinnella

PROTOCOLLO

DATA

05_GEOTECNICA RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

CODICE PROGETTO

PROGETTO

LIV. PROG.

N. PROG.

COBO27

D

1101

NOME FILE

05.1 T00GEO0GETRE01A.DWG

REVISIONE

SCALA:

CODICE
ELAB.

T00GEO0GETRE01

A

—

C

B

A

EMISSIONE

settembre 2013

geol. M. Cocetti

geol. P. Cocetti

ing. A. Burchi

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

INDICE

1. INDAGINI GEOGNOSTICHE	Pag. 3
2. INDAGINI DI LABORATORIO	Pag. 6
- 2.1 FASE 1	Pag. 7
- 2.2 FASE 2	Pag. 9
- 2.3 FASE 3	Pag.11
3. CALCOLO DEI PARAMETRI GEOMECCANICI	Pag.14
3.1 PROVE DI LABORATORIO	Pag.14
3.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA CON CPT	Pag.16
3.3 STANDARD PENETRATION TEST (SPT)	Pag.18
4. PARAMETRI CARATTERISTICI	Pag.20
4.1 PARAMETRI CARATTERISTICI DALLE CPT	Pag.20
4.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DALLE PROVE DI LABORATORIO	Pag.20
5. STRATIGRAFIA E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	Pag.21
1) PONTE SUL CROSTOLO SPONDA DESTRA	Pag.22
2) PONTE SUL CROSTOLO SPONDA SINISTRA	Pag.23
3) SOTTOVIA HIROSHIMA	Pag.25
4) SVINCOLO RETE 2	Pag.27
5) SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE	Pag.29
6) CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI	Pag.31
7) SOTTOPASSO DI VIA FERRARONI ALLA FFSS	Pag.33
8) SOTTOVIA CARLO MARX	Pag.35
9) PONTE SUL TORRENTE MODOLENA	Pag.37
10) PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO	Pag.39
11) SOTTOVIA FFSS MILANO-BOLOGNA	Pag.41
6. VERIFICHE DI STABILITA'	Pag.43
ZONA 2 - CROSTOLO SPONDA SINISTRA	Pag.44
ZONA 5 - SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE	Pag.45
ZONA 6 - CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI	Pag.45
ZONA 10 - PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO	Pag.47
7. CALCOLO DEI CEDIMENTI E TEMPI DI CONSOLIDAZIONE	Pag.49
ZONA 2 - CROSTOLO SPONDA SINISTRA	Pag.49
ZONA 5 - VINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE	Pag.51
ZONA 6 - CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI	Pag.52
ZONA 10 - PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO	Pag.53

8. CONSOLIDAZIONE CON DRENI VERTICALI	Pag.55
ZONA 2: CROSTOLO SPONDA SINISTRA	Pag.55
ZONA 5: SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE	Pag.56
ZONA 6: CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI	Pag.56
ZONA 10: PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO	Pag.57
9. CALCOLO DELLA PORTANZA DEL PALO SINGOLO	Pag.58
9.1 FORMULE UTILIZZATE NEL CALCOLO DEI PALI	Pag.58
1-PORTANZA ALLA BASE PER TERRENI NON COESIVI	Pag.58
2-PORTANZA LATERALE LIMITE PER TERRENI NON COESIVI	Pag.61
3-PORTANZA ALLA BASE PER TERRENI COESIVI	Pag.61
4-PORTANZA LATERALE LIMITE PER TERRENI COESIVI	Pag.62
9.2 FORMULE UTILIZZATE NEL CALCOLO DEI MONOLITI	Pag.62
9.3 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE	Pag.63
-TABELLA RIASSUNTIVA CALCOLO PALI E MONILITI	Pag.64
10. VERIFICA ALLA PROPENSIONE ALLA LIQUEFAZIONE	Pag.65
10.1 FORMULE UTILIZZATE NEI CALCOLI	Pag.65
10.2 CONTENUTO DI FINE (FC%)	Pag.70
10.3 CALCOLO DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	Pag.71
10.4 CONCLUSIONI SULLA PROPENSIONE ALLA LIQUEFAZIONE	Pag.72

ALLEGATI

ALLEGATO A: INTERPRETAZIONI PROVE DI LABORATORIO

ALLEGATO B: ELABORAZIONI PROVE CPT

ALLEGATO C: TABULATI DI CALCOLO

- CALCOLI DI STABILITA'
- CALCOLI DEI CEDIMENTI
- DRENI VERTICALI
- CALCOLO DEI PALI E DEI DIAFRAMMI (MONILITI)
- VERIFICHE ALLA LIQUEFAZIONE

RELAZIONE GEOTECNICA

1. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Il presente rapporto è il quadro riassuntivo delle indagini utilizzate per il progetto definitivo della Tangenziale Nord di Reggio Emilia.

Le indagini geognostiche eseguite appositamente per il presente progetto sono costituite da un totale di: 13 sondaggi a carotaggio continuo; 15 prove penetrometriche statiche; 4 sismiche in foro (Down Hole); 8 pozzetti geognostici.

Si sono consultate numerose altre prove geognostiche eseguite in occasione del PRG di Reggio Emilia, del PSC-RE ed infine per il precedente progetto della Tangenziale Nord a committenza ITALFER (queste ultime prove sono state in parte utilizzate per la ricostruzione stratigrafica l'ungo l'asse stradale).

Le prove geognostiche effettuate per il presente progetto sono state eseguite in tre distinte campagne di indagini: la prima nel 2008 (prove blu), la seconda nel 2009 (prove verdi) e l'ultima nel 2012 (prove rosse).

Durante la prima fase di indagini o campagna di indagine, sono stati eseguiti n°3 sondaggi a carotaggio continuo (S1-S3 blu), n°5 prove penetrometriche statiche (CPT1-CPT5 blu) ed una prova Down Hole.

Nella seconda campagna di indagine sono stati eseguiti 6 sondaggi a carotaggio continuo (S4-S9 verdi), 8 prove penetrometriche statiche (CPT6-CPT13 verdi), 2 indagini geofisiche tipo Down Hole (DHS4, DHS6), 8 scavi per con prelievo di campioni per il trattamento a calce.

Nella terza, ed ultima campagna di indagine, sono stati infine eseguiti 4 sondaggi a carotaggio continuo (SA, SB, SD ed SE rossi), 2 prove penetrometriche statiche (CPT1-CPT2 rosse) ed una prova Down Hole.

Per le prove si è preferito mantenere la numerazione originaria aggiungendo solamente l'anno di esecuzione a pedice o una colorazione diversa al simbolo.

Per la natura del terreno i campioni prelevati dai 13 sondaggi eseguiti sono stati abbastanza numerosi, per un totale di **68** campioni così distribuiti:

FASE	SONDAGGIO	N° CAMPIONI
PRIMA	S1	6
	S2	5
	S3	6
SECONDA	S4	7
	S5	3
	S6	7
	S7	4
	S8	3
	S9	5
TERZA	SA	6
	SB	4
	SD	8
	SE	4 ⁽¹⁾

(1) MANCANO LE PROVE SUL CAMPIONE SE-C2

COD.LAB.	DESCRIZIONE
DSC	APERTURA E DESCRIZIONE DEL CAMPIONE INDISTURBATO
CFV	CARATT. FISICO VOLUMETRICHE
LIM	LIMITI DI ATTERBERG E INDICE DI PLASTICITA'
EDO	PROVA DI COMPRESSIONE EDOMETRICA. MISURE DI CV E KV
CDC	PROVA DI TAGLIO DIRETTO CD CON SCATOLA DI CASAGRANDE
ELL	PROVA DI ESPANSIONE LATERALE LIBERA CON CURVE
TUU	PROVA TRIASSIALE U.U. CURVA SFORZI DEFORMAZIONI
TCU	PROVA TRIASSIALE C.U. CURVA SFORZI DEFORMAZIONI
TCD	PROVA TRIASSIALE C.D. CURVA SFORZI DEFORMAZIONI
COR	COLONNA RISONANTE

TABELLA 1: Elenco delle prove di laboratorio con il relativo codice.

La tabella che segue elenca tutte le prove di laboratorio eseguite per il presente lavoro, individuandole con il numero di sondaggio (a pedice l'anno di esecuzione) e la sigla del campione.

S	C	DSC	CFV	LIM	EDO	CDC	ELL	TUU	TCU	TCD	COR
S1 ₀₈	C1	X	X	X					X		X
	C2	X	X	X					X		X
	C3	X	X	X					X		X
	C4	X	X	X					X		X
	C5	X	X	X					X		X
	C6	X	X	X					X		X
S2 ₀₈	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
	C5	X	X	X	X				X		
S3 ₀₈	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
	C5	X	X	X	X				X		
	C6	X	X	X	X				X		
S4 ₀₉	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
	C5	X	X	X	X				X		
	C6	X	X	X	X				X		
	C7	X	X	X	X				X		
S5 ₀₉	C1	X	X	X					X		
	C2	X	X	X					X		
	C3	X	X	X					X		
S6 ₀₉	C1	X	X	X					X		
	C2	X	X	X					X		
	C3	X	X	X					X		
	C4	X	X	X					X		
	C5	X	X	X					X		
	C6	X	X	X					X		
	C7	X	X	X					X		

S	C	DSC	CFV	LIM	EDO	CDC	ELL	TUU	TCU	TCD	COR
S7 ₀₉	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
S8 ₀₉	C1	X	X	X					X		
	C2	X	X	X					X		
	C3	X	X	X					X		
S9 ₀₈	C1	X	X	X					X		
	C2	X	X	X					X		
	C3	X	X	X					X		
	C4	X	X	X					X		
	C5	X	X	X					X		
SA ₁₂	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
	C5	X	X	X	X			X			
	C6	X	X	X	X			X			
SB ₁₂	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X			X			
SD ₀₉	C1	X	X	X	X				X		
	C2	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
	C5	X	X	X	X			X			
	C6	X	X	X	X			X			
	C7	X	X	X	X			X			
	C8	X	X	X	X			X			
SE ₀₉	C1	X	X	X	X				X		
	C3	X	X	X	X				X		
	C4	X	X	X	X				X		
	C5	X	X	X	X			X			

TABELLA 2: Elenco delle prove di laboratorio. Per i codici si veda la tabella precedente.

Per la caratterizzazione geotecnica degli strati meno coesivi, ci si è basati sulle prove SPT, mentre per la caratterizzazione degli strati coesivi, oltre alle prove di laboratorio si sono consultate le prove CPT.

L'ubicazione dei sondaggi e delle altre prove geognostiche è stata riportata nella Carta Ubicazione delle Indagini Geognostiche.

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati spinti ad una profondità massima di 40 m dall'attuale p.c.

I grafici dei sondaggi delle CPT e le colonne stratigrafiche dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati posizionati lungo la sezione dell'asse stradale principale per la ricostruzione della sezione geotecnica; per la ricostruzione di quella geologica invece è stato necessario uniformare le prove creando apposite colonne stratigrafiche che sono state in seguito posizionate sempre lungo l'asse stradale.

Durante l'esecuzione dei sondaggi si è provveduto ad effettuare misure di resistenza a compressione con penetrometro tascabile sui campioni prelevati nei livelli più argillosi e/o limosi e misure di resistenza mediante prove di penetrazione di tipo S.P.T. in avanzamento al foro nei livelli più sabbiosi.

2. INDAGINI DI LABORATORIO

Sui 68 campioni prelevati a varie profondità, dai 13 sondaggi eseguiti durante le tre campagne di indagini negli anni 2008, 2009 e 2012, sono state eseguite numerose indagini di laboratorio.

Per la classificazione del terreno di fondazione sono state eseguite le prove fisiche-volumetriche ed i Limiti di Atterberg (vedi allegato A, pag.1-69).

In particolare sono stati descritti i campioni, ne sono state misurate le principali caratteristiche fisico-volumetriche come il contenuto di acqua, il peso di volume naturale, la porosità e l'indice dei vuoti.

Per la determinazione delle caratteristiche geotecniche sono state effettuate prove triassiali consolidate e non drenate (CIU), prove ad espansione laterale libera (ELL) e infine prove di compressione edometrica con misure di C_v e K_v .

Le prove triassiali e le prove edometriche sono state rielaborate anche dallo scrivente (vedi allegato A, pag.73-188 per le triassiali e pag.194-268 per le edometriche) sia per controllare la correttezza dei dati, ma soprattutto per ottenere i dati geotecnici fondamentali (C' , ϕ' , Ed, etc.) che il laboratorio "Tecno Controlli" di Bologna aveva ritenuto di non dover fornire (vedi laboratorio, 3 fase). Infatti il direttore del laboratorio, interpretando la circolare del consiglio dei ministri del 08/09/2010 che al punto 9 lettera (L) recita che "[...] il certificato non deve contenere valutazioni, apprezzamenti o interpretazioni sui risultati della prova [...]" ha ritenuto di non poter fornire né la coesione efficace né l'angolo di attrito interno dei campioni, per quanto riguarda le prove triassiali CIU e nemmeno il modulo edometrico od altri parametri di compressibilità (RR, CR) per quanto riguarda la prova edometrica.

Quindi si è resa necessaria una interpretazione dei dati da parte dello scrivente che ha ritenuto, a questo punto opportuno rielaborare nell'allegato A anche le prove triassiali e le prove di laboratorio delle prime 2 fasi di indagine.

In particolare le prove triassiali sono state interpretate dallo scrivente con la classica retta di inviluppo dei cerchi di Mohr implementata da una procedura all'interno di un foglio Excel: la procedura esegue un calcolo in modo da disporre la retta di confine così da minimizzare gli errori di tangenza ai cerchi di Mohr.

Per le prove triassiali CIU lo scrivente ha anche calcolato la coesione non drenata C_u tramite la teoria di Skempton riportata nel "Manual on Estimation of Soil Properties for Foundation Design" (Cornell University Ithaca, New York), confrontandola sia con la coesione non drenata ottenuta dalle prove statiche CPT, ma anche con la C_{cu} ottenibile dalla prova triassiale.

Infine, tutte le prove edometriche sono state rielaborate dallo scrivente in funzione delle opere previste in modo da ottenere i moduli edometrici più appropriati in funzione dei carichi previsti dai rilevati in progetto.

Per i dettagli sulle prove di laboratorio si vedano anche gli opportuni elaborati.

Seguono le tabelle dei parametri nominali: per la fase I e II i dati sono quelli

forniti dai laboratori di analisi mentre per la fase III sono riportati i parametri calcolati ed interpretati dallo scrivente (per le interpretazioni di tutte le prove di laboratorio da parte dello scrivente, si veda l'allegato A).

Nella prima tabella sono riportati i parametri fisico-volumetrici e i Limiti di Atterberg, nella seconda tabella sono riportati i parametri efficaci C' e ϕ' ricavati dalla prova triassiale, nella terza tabella i parametri di compressibilità della prova edometrica e nella quarta i coefficienti di consolidazione e di permeabilità.

2.1 FASE 1 (1° Campagna di indagine)

Proprietà indice e Limiti di Atterber

Vediamo in sintesi le proprietà fisico volumetriche e i Limiti di Atterber:

	Prof. (m)	γ_n Mg/m ³	W %	L.L. %	L.P. %	I.P. %	Class. -
S1C1	4.50÷5.00	1.90	29.62	29	22	7	CL-ML
S1C2	9.50÷10.00	1.95	23.89	35	19	16	CL
S1C3	14.60÷15.25	1.88	30.38	21	17	4	CL-ML
S1C4	24.60÷25.15	1.97	24.19	27	19	8	CL
S1C5	31.00÷31.50	1.86	32.01	53	30	23	MH
S1C6	37.00÷37.50	1.94	26.14	41	23	18	CL
S2C1	5.20÷5.70	1.90	32.35	34	23	11	CL
S2C2	11.00÷11.60	1.94	28.26	39	24	15	CL
S2C3	21.00÷21.60	1.98	27.49	39	21	18	CL
S2C4	28.00÷28.50	1.92	30.82	57	28	29	CH
S2C5	33.90÷34.50	2.02	25.31	32	18	14	CL
S3C1	3.90÷4.50	1.79	42.70	51	30	21	MH-OH
S3C2	7.10÷7.60	1.87	36.71	67	29	38	CH
S3C3	14.00÷14.60	2.01	26.28	35	21	14	CL
S3C4	20.00÷20.50	1.92	32.72	59	30	29	CH
S3C5	30.30÷30.90	1.79	42.66	70	35	35	MH-OH
S3C6	36.00÷36.60	1.96	29.12	56	30	26	CH-MH

Si tratta per lo più di limi e limi sabbiosi e argille limose di media plasticità.

Salvo qualche eccezione, il contenuto naturale di acqua pone la consistenza nel campo plastico. I pesi di volume sono nella norma

Resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci

I dati derivano dalle prove triassiali che sono state rielaborate con il procedimento della retta tangente ai cerchi di rottura, cioè assumendo uno sviluppo lineare di rottura e disponendo la retta di confine in modo da minimizzare gli errori di tangenza ai cerchi di Mohr relativi alle diverse condizioni tensionali sperimentate:

	Prof. (m)	ϕ' °	c' kPa
S1C1	4.50÷5.00	32.12	15.71
S1C2	9.50÷10.00	25.11	20.25
S1C3	14.60÷15.25	33.70	12.47
S1C4	24.60÷25.15	32.25	20.05
S1C5	31.00÷31.50	19.20	48.50
S1C6	37.00÷37.50	30.83	3.83
S2C1	5.20÷5.70	32.30	1.03
S2C2	11.00÷11.60	30.98	2.28
S2C3	21.00÷21.60	26.82	1.66
S2C4	28.00÷28.50	24.23	23.11
S2C5	33.90÷34.50	31.82	2.44
S3C1	3.90÷4.50	28.44	1.41
S3C2	7.10÷7.60	20.75	0.21
S3C3	14.00÷14.60	30.34	1.97
S3C4	20.00÷20.50	24.68	0.05
S3C5	30.30÷30.90	20.99	23.99
S3C6	36.00÷36.60	22.74	13.53

Parametri di compressibilità

Le curve edometriche sperimentali necessitano di un'elaborazione intesa a tracciare le probabili curve rappresentative del comportamento in situ del materiale alla compressione. Oltre a CR (rapporto di compressione vergine) ed RR (rapporto di ricomprensione vergine), risulta OCR, vale a dire il rapporto di sovraconsolidazione.

	Prof. (m)	σ'_{v0} kPa	σ_p kPa	OCR -	CR -	RR -
S2C1	5.20÷5.70	88	330	4.1	0.173	0.005
S2C2	11.00÷11.60	146	420	3.0	0.151÷0.213	0.009
S2C3	21.00÷21.60	248	405	1.0÷1.9	0.186÷0.240	0.018
S2C4	28.00÷28.50	299	605	1.0÷2.3	0.199÷0.283	0.025
S2C5	33.90÷34.50	368	720	1.0÷1.9	0.185÷0.237	0.013
S3C1	3.90÷4.50	56	152	2.7	0.210	0.017
S3C2	7.10÷7.60	84	293	5.0	0.235	0.015
S3C3	14.00÷14.60	150	552	1.0÷3.7	0.175÷0.298	0.013
S3C4	20.00÷20.50	202	424	1.0÷2.0	0.201÷0.257	0.021
S3C5	30.30÷30.90	283	667	1.0÷2.3	0.231÷0.317	0.036
S3C6	36.00÷36.60	336	847	1.0÷1.6	0.231÷0.288	0.030

Coefficienti di consolidazione e di permeabilità

Le misure cedimento-tempo effettuate nel corso delle prove edometriche consentono anche di ricavare i seguenti coefficienti di consolidazione (CV) e di permeabilità (K).

	Prof. (m)	$C_{v(75)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(75)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(150)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(150)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(300)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(300)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(400)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(400)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(600)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(600)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$
S2C1	5.20÷5.70	9.79	318	11.6	241						
S2C2	11.00÷11.60	4.85	122	4.07	74.5						
S2C3	21.00÷21.60			0.66	7.54	0.78	12.3				
S2C4	28.00÷28.50			0.52	13.4	0.47	8.11				
S2C5	33.90÷34.50					10.9	124	9.79	139	9.79	139
S3C1	3.90÷4.50	3.43	131	2.94	86.7						
S3C2	7.10÷7.60	0.25	7.59	0.17	6.5						
S3C3	14.00÷14.60	1.33	54.3	1.39	68.6						
S3C4	20.00÷20.50			3.2	46	0.323	5.64				
S3C5	30.30÷30.90			0.35	5.75			0.12	1.81		
S3C6	36.00÷36.60			0.53	10.8			0.27	3.68		

2.2 FASE 2 (2° Campagna di indagine)

Proprietà indice e Limiti di Atterber

Vediamo in sintesi le proprietà fisico volumetriche e i Limiti di Atterber:

	Prof. (m)	γ_n Mg/m^3	W %	L.L. %	L.P. %	I.P. %	Class. -
S4C1	2.50÷3.00	1.98	24.36	38	23	15	CL
S4C2	5.50÷6.00	1.88	30.84	65	31	34	CH
S4C3	8.00÷8.50	1.90	29.32	62	30	32	CH
S4C4	23.00÷23.50	1.94	27.35	48	28	20	ML-OL
S4C5	26.20÷26.70	1.91	34.15	59	31	28	MH-OH
S4C6	30.05÷30.50	1.98	24.59	42	21	21	CL
S4C7	32.30÷32.80	1.95	24.73	30	22	8	CL
S5C1	2.00÷2.50	1.95	22.55	43	22	21	CL
S5C2	4.50÷5.00	1.88	34.23	61	27	34	CH
S5C3	7.00÷7.50	1.99	27.20	59	28	31	CH
S6C1	3.50÷4.00	1.82	35.46	54	27	27	CH
S6C2	6.50÷7.00	1.88	33.62	49	27	22	CL
S6C3	10.00÷10.50	1.89	29.94	38	22	16	CL
S6C4	13.50÷14.00	1.98	27.00	54	29	25	CH
S6C5	18.80÷19.40	1.83	34.69	36	27	9	ML-OL
S6C6	29.05÷29.55	1.90	30.74	30	26	4	ML-OL
S6C7	33.10÷33.60	1.90	31.61	43	29	14	ML-OL
S7C1	2.00÷2.50	1.88	31.44	61	31	30	CH
S7C2	10.10÷10.60	1.87	32.24	64	32	32	CH
S7C3	27.00÷27.50	1.96	27.22	40	25	15	CL
S7C4	30.95÷31.55	1.95	23.41	38	23	15	CL
S8C1	2.50÷3.00	1.93	25.11	37	23	14	CL
S8C2	5.00÷5.50	1.90	29.30	37	24	13	CL
S8C3	7.00÷7.50	1.86	37.08	53	31	22	MH-OH
S9C1	2.40÷3.00	1.86	30.37	41	24	17	CL
S9C2	5.60÷6.20	1.95	27.12	39	23	16	CL
S9C3	9.00÷9.60	1.92	27.88	39	31	8	ML-OL
S9C4	23.20÷23.70	2.02	24.84	32	20	12	CL
S9C5	27.60÷28.10	1.89	30.15	55	25	30	CH

Si tratta per lo più di limi e limi sabbiosi e argille limose di media plasticità. Salvo qualche eccezione, il contenuto naturale di acqua pone la consistenza nel campo plastico. I pesi di volume sono nella norma

Resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci

I dati derivano dalle prove triassiali che sono state rielaborate con la classica retta di involuppo dei cerchi di Mohr e cioè assumendo un lineare sviluppo di rottura, disponendo cioè la retta di confine in modo da minimizzare gli errori di tangenza ai cerchi di Mohr, relativi alle diverse condizioni tensionali sperimentate:

	Prof. (m)	ϕ' °	c' kPa
S4C1	2.50+3.00	15.38	29.47
S4C2	5.50+6.00	15.74	13.69
S4C3	8.00+8.50	23.95	19.92
S4C4	23.00+23.50	27.61	14.95
S4C5	26.20+26.70	26.46	7.65
S4C6	30.05+30.50	28.22	20.26
S4C7	32.30+32.80	30.58	9.66
S5C1	2.00+2.50	26.04	18.03
S5C2	4.50+5.00	21.60	16.72
S5C3	7.00+7.50	22.16	68.09
S6C1	3.50+4.00	34.10	0.58
S6C2	6.50+7.00	25.47	14.87
S6C3	10.00+10.50	23.93	21.09
S6C4	13.50+14.00	23.40	57.32
S6C5	18.80+19.40	27.56	9.62
S6C6	29.05+29.55	33.01	16.75
S6C7	33.10+33.60	28.64	15.39
S7C1	2.00+2.50	22.68	22.00
S7C2	10.10+10.60	26.57	15.65
S7C3	27.00+27.50	31.59	14.75
S7C4	30.95+31.55	42.91	2.45
S8C1	2.50+3.00	29.35	9.33
S8C2	5.00+5.50	27.37	41.78
S8C3	7.00+7.50	27.06	20.64
S9C1	2.40+3.00	26.66	22.77
S9C2	5.60+6.20	29.96	9.94
S9C3	9.00+9.60	31.22	16.07
S9C4	23.20+23.70	26.65	16.53
S9C5	27.60+28.10	23.09	12.91

Parametri di compressibilità

Le curve edometriche sperimentali necessitano di un'elaborazione intesa a tracciare le probabili curve rappresentative del comportamento in situ del materiale alla compressione.

Oltre a CR (rapporto di compressione vergine) ed RR (rapporto di ricomprensione vergine), risulta OCR, vale a dire l'indice di sovraconsolidazione.

	Prof. (m)	σ'_{v0} kPa	σ_p kPa	OCR -	CR -	RR -
S4C1	2.50÷3.00	37	143	3.8	0.185	0.012
S4C2	5.50÷6.00	66	282	4.3	0.186	0.015
S4C3	8.00÷8.50	88	434	4.9	0.261	0.010
S4C4	23.00÷23.50	222	424	1.0÷1.9	0.207÷0.266	0.023
S4C5	26.20÷26.70	252	452	1.0÷1.8	0.216÷0.267	0.023
S4C6	30.05÷30.50	288	501	1.0÷1.7	0.200÷0.244	0.017
S4C7	32.30÷32.80	313	679	1.0÷2.1	0.157÷0.221	0.011
S7C1	2.00÷2.50	42	239	5.7	0.176	0.011
S7C2	10.10÷10.60	131	356	2.7	0.197	0.017
S7C3	27.00÷27.50	283	635	1.0÷2.2	0.177÷0.235	0.012
S7C4	30.95÷31.55	312	786	1.0÷2.5	0.175÷0.249	0.008

Coefficienti di consolidazione e di permeabilità

Le misure cedimento-tempo effettuate nel corso delle prove edometriche consentono anche di ricavare i seguenti coefficienti di consolidazione (CV) e di permeabilità (K).

	Prof. (m)	$C_{v(35)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(35)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(75)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(75)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(150)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(150)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$	$C_{v(300)}$ $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$	$k_{(300)}$ $\text{cm}/\text{s} \cdot 10^{-9}$
S4C1	2.50÷3.00	3.18	115	6.05	152				
S4C2	5.50÷6.00	0.221	6.15	0.392	15.5				
S4C3	8.00÷8.50			14.2	486	15.4	345		
S4C4	23.00÷23.50					0.253	8.2	0.221	4.39
S4C5	26.20÷26.70					0.196	9.19	0.174	4.62
S4C6	30.05÷30.50					1.18	22.2	0.922	14.1
S4C7	32.30÷32.80					4.58	63.7	6.85	65.1
S7C1	2.00÷2.50	0.272	4.7	0.169	3.86				
S7C2	10.10÷10.60			0.632	14.3	0.351	7.64		
S7C3	27.00÷27.50					2.72	39.7	8.62	106
S7C4	30.95÷31.55					6.59	131	8.41	111

2.3 FASE 3 (3° Campagna di indagine)

Proprietà indice e Limiti di Atterber

Vediamo in sintesi le proprietà fisico volumetriche e i limiti di Atterber:

	Prof. (m)	γ_n Mg/m ³	W %	L.L. %	L.P. %	I.P. %	Class. -
SAC1	2.65-3.25	1.85	36.25	47	21	26	CL
SAC2	4.90-5.40	1.89	28.7	71	33	38	CH
SAC3	7.60-8.10	1.94	31.28	50	22	28	CL
SAC4	10.3-10.9	1.91	29.16	63	26	37	CH
SAC5	20.1-20.7	1.87	28.24	40	28	12	ML-OL
SAC6	24.45-25	1.88	30.86	45	26	19	CL

SBC1	2.20-2.70	1.87	22.76	43	26	17	CL
SBC2	4.90-5.40	1.97	23.87	35	22	13	CL
SBC3	7.50-8.00	1.95	28.78	61	31	30	CH
SBC4	24.5-25.1	1.88	29.28	59	28	31	CH
SDC1	2.50-2.90	1.97	24.92	56	27	29	CH
SDC2	5.50-6.00	1.97	27.26	49	27	22	CL
SDC3	7.50-8.00	1.95	24.82	64	31	33	CH
SDC4	9.8-10.4	1.86	35.29	56	28	28	CH
SDC5	17.3-17.8	1.91	30.84	51	26	25	CH
SDC6	23.75-24.25	1.97	29.91	64	28	36	CH
SDC7	30.5-31.0	1.85	33.43	60	30	38	CH
SDC8	35.0-35.5	1.91	28.14	40	25	15	CL
SEC1	2.50-3.00	1.97	25.54	44	25	19	CL
SEC2	5.00-5.50	1.91	30.94	32	-	-	-
SEC3	7.00-7.50	1.95	28.59	45	25	20	CL
SEC4	10.0-10.5	2.03	22.18	46	25	21	CL

Si tratta per lo più di limi e limi sabbiosi e argille limose di media plasticità. Salvo qualche eccezione, il contenuto naturale di acqua pone la consistenza nel campo plastico. I pesi di volume sono nella norma

Resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci

I parametri geotecnici C' e Φ' derivano dalle prove triassiali i dati delle quali sono stati rielaborati, dallo scrivente, tramite appositi fogli di calcolo tenendo conto di uno sviluppo di rottura lineare e disponendo la retta di confine in modo da minimizzare gli errori di tangenza ai cerchi di Mohr relativi alle diverse condizioni tensionali sperimentate:

	Prof. (m)	ϕ °	C' KPa
SAC1	2.65-3.25	24.8	21
SAC2	4.90-5.40	24.8	34
SAC3	7.60-8.10	30	28
SAC4	10.3-10.9	28.7	47
SAC5	20.1-20.7	-	-
SAC6	24.45-25	-	-
SBC1	2.20-2.70	23.6	28
SBC2	4.90-5.40	31.4	1
SBC3	7.50-8.00	28.7	3
SBC4	24.5-25.1	-	-
SDC1	2.50-2.90	24.8	9
SDC2	5.50-6.00	26.1	12
SDC3	7.50-8.00	22.4	46
SDC4	9.8-10.4	24.8	6
SDC5	17.3-17.8	-	-
SDC6	23.75-24.25	-	-
SDC7	30.5-31.0	-	-
SDC8	35.0-35.5	-	-
SEC1	2.50-3.00	31.3	3
SEC2	5.00-5.50	-	-
SEC3	7.00-7.50	30.0	3
SEC4	10.0-10.5	24.8	14

Per i dettagli sui calcoli utilizzati per ricavare tutti i parametri efficaci ricavati dalle prove triassiali si veda l'allegato A (pag.73).

Parametri di compressibilità

Le curve edometriche necessitano di una opportuna elaborazione per tracciare le curve rappresentative del comportamento del materiale sottoposto ad una certa pressione.

Tramite la classica costruzione di Casagrande, implementata in appositi fogli di calcolo, è stato possibile ricavare la pressione di preconsolidazione del σ'_{v_0} del materiale e quindi il grado di sovraconsolidazione OCR.

A seconda delle opere previste e quindi delle sovrappressioni esercitate e trasmesse ad una certa profondità sullo strato è stato possibile calcolare il modulo edometrico più opportuno.

Nella tabella seguente si riportano solamente i moduli edometrici rappresentativi della pressione geostatica efficace esercitata sul campione (σ'_{v_0}):

	Prof. (m)	σ'_{v_0} KPa	σ'_p KPa	OCR %	ED KPa
SAC1	2.65-3.25	29.7	185.7	6.3	925
SAC2	4.90-5.40	51.3	275.7	5.4	10215
SAC3	7.60-8.10	79.3	445.6	5.6	4001
SAC4	10.3-10.9	101.5	295	2.9	4209
SAC5	20.1-20.7	-	-	-	-
SAC6	24.45-25	-	-	-	-
SBC1	2.20-2.70	44.9	135.2	3.0	3556
SBC2	4.90-5.40	82.4	108.3	1.3	3086
SBC3	7.50-8.00	105.2	311.5	3.0	10287
SBC4	24.5-25.1	-	-	-	-
SDC1	2.50-2.90	53.2	160.2	3.0	4651
SDC2	5.50-6.00	83.3	240.5	2.9	4602
SDC3	7.50-8.00	101.2	265.6	2.6	4093
SDC4	9.8-10.4	114.9	69.5	0.6	1809
SDC5	17.3-17.8	-	-	-	-
SDC6	23.75-24.25	-	-	-	-
SDC7	30.5-31.0	-	-	-	-
SDC8	35.0-35.5	-	-	-	-
SEC1	2.50-3.00	49.8	177.7	3.6	3021
SEC2	5.00-5.50	70.8	102.5	1.4	2388
SEC3	7.00-7.50	86.9	304.7	3.5	4203
SEC4	10.0-10.5	125.0	111.8	0.9	3922

Per i modulo edometrici che tengano in debito conto la pressione esercitata sullo strato anche dell'opera in progetto (rilevato), si vedano le tabelle riportate nel paragrafo 5 (stratigrafia e caratterizzazione geotecnica) e le elaborazione riportate nell'allegato A (pag.194).

3. CALCOLO DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

3.1 Prove di laboratorio

Calcolo della C_u

La C_u è stata ricavata, dove possibile, da prove di compressione semplice (ELL) e confrontata con le seguenti relazioni:

$$C_{u(NC)} = 0.11 + 0.0037 \cdot I_p \quad (\text{Skempton, 1957})$$

$$C_{u(OC)} = C_{u(NC)} \cdot OCR^{0.8} \quad (\text{Ladd et all., 1977})$$

$$C_u = (0.22 \pm 0.03) \cdot OCR^{0.8} \cdot s_{v_0} \quad (\text{Koutsoftas e Ladd, 1985})$$

La C_u è inoltre stata ricavata dalle prove CPT e confrontata con i dati ricavati dalla elaborazione delle prove triassiali CIU secondo la teoria di Skempton riportata nel “Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design” (by Cornell University, New York).

In particolare la coesione non drenata è stata ricavata dalla seguente relazione:

$$S_u = C_u = \sigma'_{v_0} \cdot \sin(\phi') / [(1 + 2A_f - 1) \cdot \sin(\phi')]$$

Dove:

$$A_f = \Delta u / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

Per una consolidazione isotropica è spesso utilizzato anche il modello denominato “Cam Clay Model”, per il quale possiamo scrivere:

$$S_u / \sigma'_{v_0} = 0.5 M (0.5)^N$$

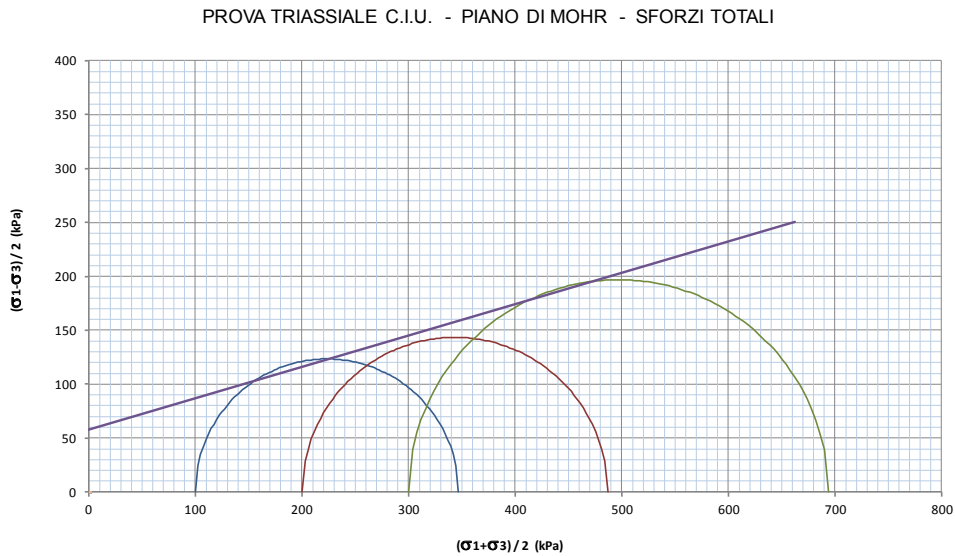
Dove:

$$M = 6 \cdot \sin(\phi') / (3 - \sin(\phi'))$$

$$N = 1 - (C_s - C_c) \sim 0.8/0.7$$

Calcolo di ϕ'

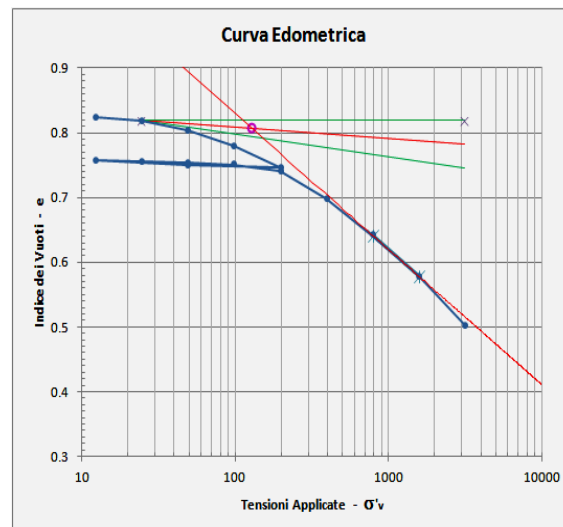
L'angolo d'attrito interno del materiale (ϕ) è stato ricavato dalle SPT per gli strati incoerenti attraverso le note correlazioni esistenti in letteratura (vedi paragrafo seguente) e dalle prove di laboratorio (prova triassiale) per gli strati più coesivi. In particolare la prova triassiale è stata elaborata in modo da ottenere i cerchi delle tensioni sul piano di Mohr e quindi si è utilizzata una procedura di calcolo che ha ricavato la retta tangente ai cerchi minimizzandone l'errore:



Calcolo del Modulo Edometrico (E_d), di C_v e K .

Il modulo edometrico (E_d) e il coefficiente di consolidazione (C_v) e la permeabilità (K) sono stati ricavati dalle prove edometriche di laboratorio.

Per una stima corretta del modulo edometrico (E_d) si è inoltre tenuto conto della pressione efficace che doveva insistere sul campione alla profondità di prelievo e della pressione trasmessa dal rilevato stradale.



3.2 Caratterizzazione geotecnica con CPT

La caratterizzazione geotecnica dei materiali è stata fatta, la dove erano carenti i sondaggi a carotaggio continuo, sulla base delle risultanze delle prove penetrometriche statiche (CPT) e mediante SPT in foro.

I dati penetrometrici sono stati processati mediante appositi fogli di calcolo (vedi allegato B) che restituiscono in forma grafica le stratigrafie e con tabulati i principali parametri geotecnici (C_u e ϕ).

In queste interpretazioni sono evidenziate la classificazione litologica, l'angolo d'attrito interno e la coesione non drenata dei materiali, in relazione alla pressione litostatica efficace.

Il programma di calcolo ha permesso di distinguere, dal rapporto fra la resistenza alla punta (R_p) e quella laterale (R_l), la stratigrafia dei terreni attraversati (vedi Begemann 1965 3 raccomandazioni A.G.I. 1977).

In particolare si sono distinte le seguenti classi:

LITOLOGIA BEGEMANN 1965 - AGI 1977		
Argille Organiche - Torbe		$0 < R_p/R_l < 15$
Argille e/o Limi		$15 < R_p/R_l < 30$
Limi Sabbiosi - Sabbie Limose		$30 < R_p/R_l < 60$
Sabbie e/o Ghiaie		$60 < R_p/R_l < 90$
Ghiaie con Sabbie		$90 < R_p/R_l < 120$

Nel caso in cui tale rapporto è risultato inferiore a 30 (terreni prevalentemente coesivi) si è calcolata la resistenza al taglio non drenata con la classica espressione sotto riportata:

$$C_u = (R_p - h \cdot \gamma) / n$$

Dove:

C_u = Coesione non drenata

R_p = Resistenza alla punta

h = Profondità dal p.c.

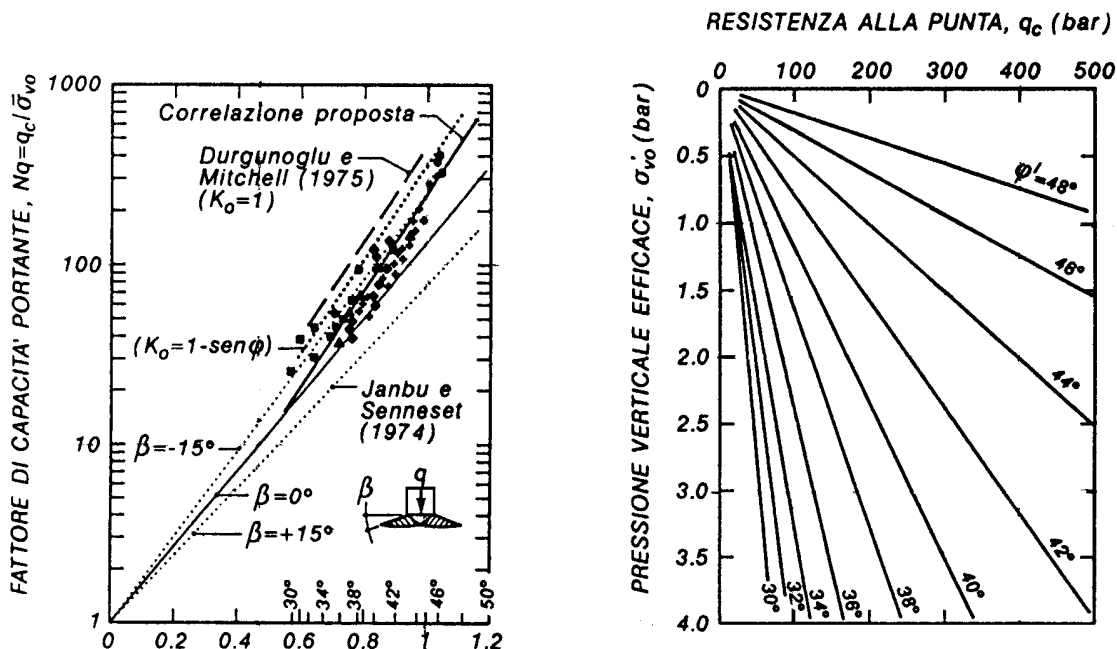
γ = Peso di volume.

$N = 15 \pm 3$ (a seconda della compattezza dell'argilla)

Nei fogli di calcolo utilizzati si è assunto un valore di "n" pari a 15.

Nel caso in cui il rapporto R_p/R_l è risultato superiore a 30 (terreni prevalentemente incoerenti) si è stimato l'angolo di attrito interno del materiale con le correlazioni esistenti in letteratura fra R_p e ϕ' .

L'angolo di attrito interno del materiale è stato infatti ricavato sia dalle note relazioni con le prove SPT sia dalle correlazioni ottenute da P.K.Robertson e G.Campanella (1983) fra la camera di calibrazione e le prove triassiali (vedi figure sottostanti).



Dal punto di vista pratico le correlazioni empiriche di cui sopra sono state introdotte nel programma di calcolo in modo sufficientemente preciso con la seguente formula:

$$\phi'_{\text{CPT}} = \text{Arctan} [\log (Qc / \sigma'_{vo}) \cdot 0.38 + 0.1]$$

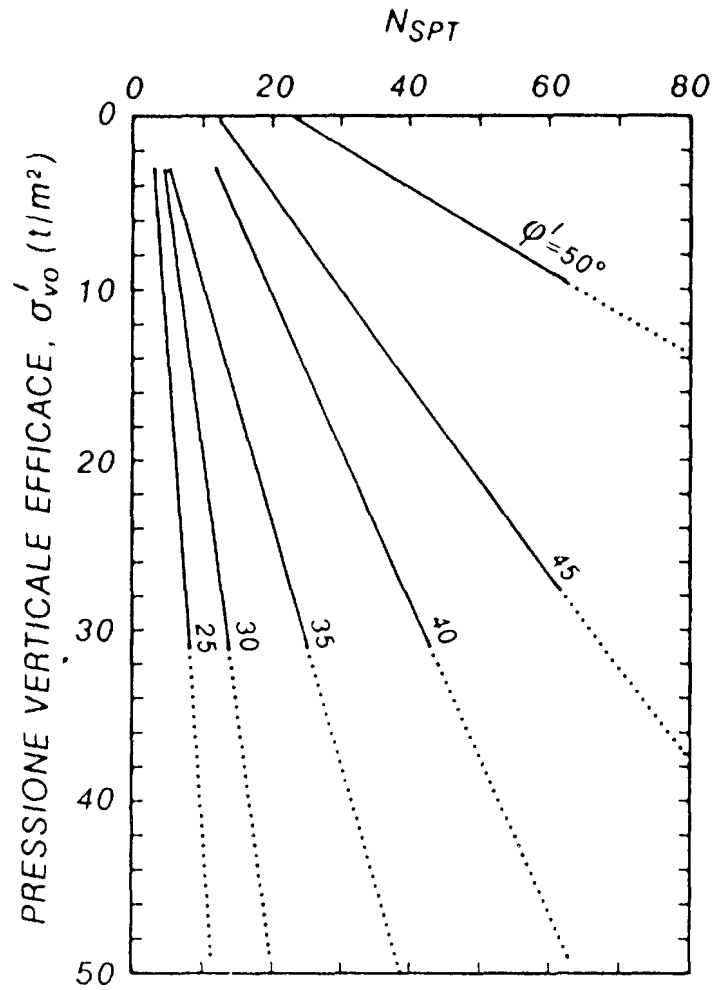
Dove:

- ϕ'_{CPT} = Angolo d'attrito interno
- Qc = Resistenza alla punta del penetrometro statico
- σ'_{vo} = $(\sigma_{vo} - U)$
- σ_{vo} = $(h \cdot \gamma)$
- U = $(h_w \cdot \gamma_w)$
- h = Profondità dal p.c. della punta.
- h_w = Profondità dal p.c. della falda.
- γ = Peso di volume del terreno.
- γ_w = Peso di volume dell'acqua.

Si è visto che nel caso di depositi sovraconsolidati la correlazione può leggermente sovrastimare il valore di ϕ' .

3.3 Standard Penetration Test (SPT)

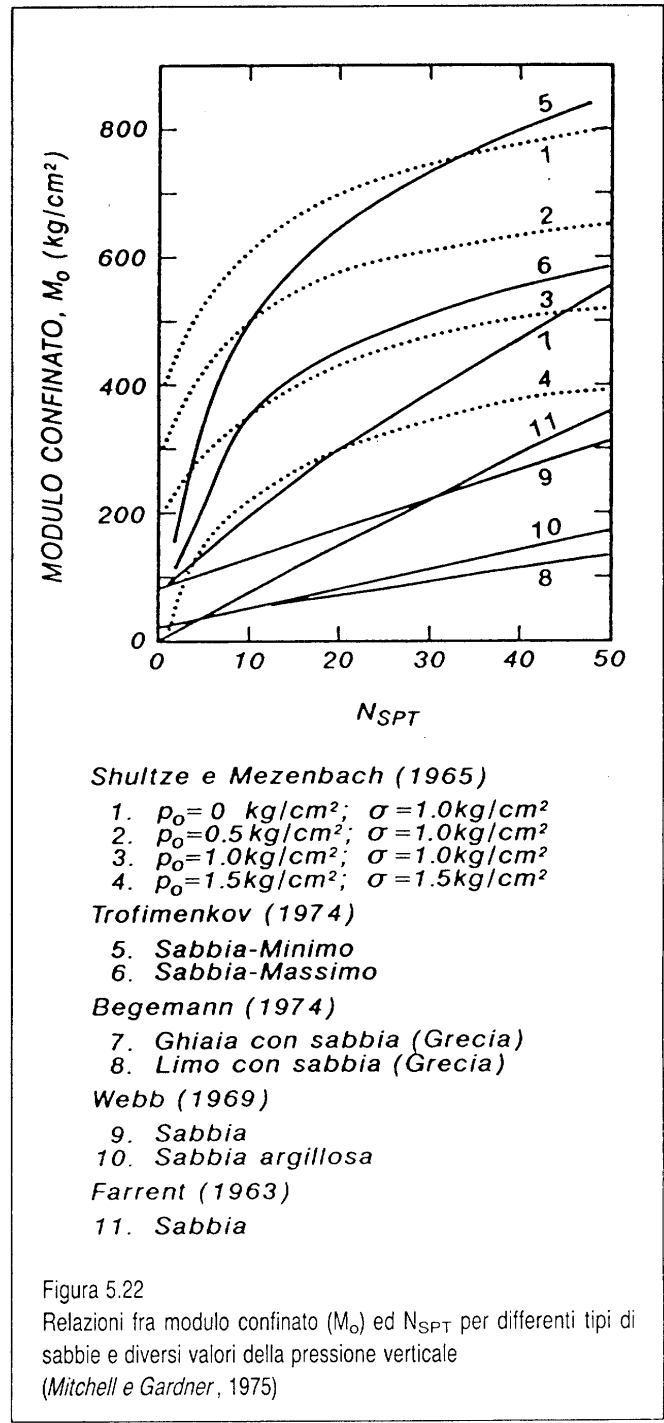
Durante l'esecuzione dei sondaggi meccanici in foro, sono stati effettuati alcune prove di Standard Penetration Test entro le formazioni di materiali granulari. In particolare è stata utilizzata la relazione di De Mello (1971) fra l'angolo d'attrito delle sabbie e i valori di N_{spt} che tiene conto dell'influenza del peso del terreno sovrastante.



Relazione fra angolo di attrito (ϕ') delle sabbie e valori di N_{SPT} , tenendo conto dell'influenza del peso del terreno sovrastante (σ'_{vo}) (De Mello, 1971)

Modulo confinato (Mo)

Per i terreni non coesivi il modulo confinato (equivalente del modulo Edometrico) è stato valutato ricorrendo alle correlazioni esistenti in letteratura con le SPT. In particolare si è utilizzata la relazione di Weeb (1969) per le sabbie poiché è una delle più cautelative.



4. PARAMETRI CARATTERISTICI

4.1 Parametri Caratteristici dalle prove CPT

Negli allegati (allegato B) vengono riportate le elaborazioni delle prove penetrometriche statiche dove vengono ricavati i parametri geotecnici Caratteristici e di Progetto dei vari strati di terreno.

I dati sono stati rielaborati al 5° percentile di distribuzione della media così da ottenere i valori caratteristici (X_k).

Il valori di progetto (X_d) vengono ricavati da quelli caratteristici secondo il DM 14/01/2008 (vedi tabella 6.2.II del DM 14/01/2008).

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
<i>Tangente dell'angolo di resistenza al taglio</i>	$\tan \varphi'_k$	γ_φ	1,0	1,25
<i>Coesione efficace</i>	c'_k	γ_c	1,0	1,25
<i>Resistenza non drenata</i>	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
<i>Peso dell'unità di volume</i>	γ	γ_f	1,0	1,0

Prendiamo come esempio l'elaborazione della prova penetrometrica CPT1₀₈ nella quale vengono fornite 2 tabelle: nella prima vengono forniti i parametri caratteristici e di progetto per grandi superfici e quindi per opere come platee, fondazioni nastriformi o rilevati stradali; nella seconda tabella invece vengono forniti i valori caratteristici e di progetto per piccole superfici, quindi pali o plinti.

Nella prima tabella i dati di progetto vengono ridotti (M1), così da poter essere utilizzati anche per il DA1, mentre nella seconda tabella i dati di progetto sono uguali a quelli caratteristici (M1), perché espressamente elaborati per i pali.

4.2 Parametri Caratteristici dalle Prove di Laboratorio

Nell'elaborato che segue ("Stratigrafia e Caratterizzazione Geotecnica") vengono riportate le elaborazioni delle prove di laboratorio dove vengono forniti i parametri nominali dei vari strati di terreno.

I dati sono stati rielaborati al 5° percentile di distribuzione della media così da ottenere i valori caratteristici (X_k).

5. STRATIGRAFIA E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.

Per la stratigrafia di dettaglio si sono integrate le conoscenze bibliografiche con i sondaggi a carotaggio continuo e con le prove penetrometriche statiche CPT.

La classificazione adottata nell'elaborazione delle CPT di norma suddivide le litologie attraversate in 4 o 5 classi principali a seconda del rapporto fra resistenza alla punta e resistenza laterale (AGI 1977):

- | | |
|--------------------------------|-----|
| 1) Torbe o argille organiche | (T) |
| 2) Argille e limi argillosi | (A) |
| 3) Limi sabbiosi e sab. limose | (L) |
| 4) Sabbie e sabbie con Ghiaie | (S) |
| 5) Ghiaie prevalenti | (G) |

Le ultime 2 classi (la 4 e la 5 a volte vengono raggruppate in una unica classe.

Il tracciato stradale è stato suddiviso, in base alle opere in progetto, in 11 zone od aree principali: per ognuna di queste zone, è stata ricostruita una stratigrafia di massima e sono stati forniti, in apposite tabelle, le principali caratteristiche meccaniche del terreno (parametri volumetrici, coesione, angolo d'attrito, modulo edometrico, coefficienti di consolidamento, parametri di permeabilità).

Rispetto alle stratigrafie ottenibili dai sondaggi o dalle prove penetrometriche statiche, nelle tabelle che seguono si sono talvolta raggruppati strati leggermente diversi o trascurati strati particolarmente poco potenti: ciò ha permesso di semplificare la stratigrafia dell'area senza alterare significativamente le caratteristiche geotecniche del terreno.

Nell'elencare le prove geognostiche di riferimento, per la descrizione stratigrafica delle aree, si è preferito mantenere la sigla e la numerazione originaria con l'avvertenza di mettere a pedice (CPT₁₀₈) o dopo un trattino (CPT1-08) l'anno d'esecuzione della prova in modo da poter eventualmente risalire alla campagna di indagine originale.

Ciò permette di consultare facilmente la documentazione di origine mantenendo tuttavia distinte le diverse prove geognostiche.

Nelle ricostruzioni stratigrafiche e nelle classificazioni geotecniche che seguono, a fianco dell'indicazione dell'area che si vuole descrivere, vengono quindi elencate le prove geognostiche con la metodologia sopra descritta.

Infine nella Carta delle Indagini Geognostiche viene utilizzata la numerazione originale con colori differenti in modo da individuare facilmente la provenienza delle prove e l'anno di indagine.

Ad esempio la campagna di indagine 2008 avrà simboli di colore blu, la campagna di indagine 2009, simboli color verde, ed infine la campagna di indagine 2012 simboli di color rosso.

Per la simbologia adottata si veda anche le legende riportate nelle carte tematiche.

1) PONTE SUL CROSTOLO-SPONDA DX [S1₀₈, CPT1₀₈, CPT2₀₈]

In quest'area sono previsti solo pali e diaframmi.

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S1 (BLU)

H Falda (m) = 4.1

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	5.4	Riporto limoso, Limo sabbioso e sabbia	S1 - C1	4.70	-
2	5.4	14.1	Argilla grigia plastica poco. cons., Argilla Limosa cons., Argilla chiara med. Cons.	S1 - C2	9.70	-
3	14.1	15.4	Sabbia limosa, lenti ghiaiose, sabbia limosa	-	-	-
4	15.4	19.1	Argilla grigia da plastica a mediamente consistente	S1 - C3	14.90	-
5	19.1	21.1	Ghiaietto in matrice sabbiosa	-	-	-
6	21.1	26.1	Argilla Grigia Bruna plastica, Argilla grigio Chiara da plastica a consistente	S1 - C4	24.90	-
7	26.1	27.2	Sabbia fine limosa med. Addensata	-	-	-
8	27.2	32.0	Argilla grigia Plastica, Argilla Limosa	S1 - C5	31.20	-
9	32.0	40.0	Argilla Grigia consistente	S1 - C6	37.20	-

Come si nota prevalgono i termini coesivi costituiti da argille e limi. Ai diversi strati si sono attribuiti i seguenti parametri geomeccanici ricavati dalle prove di laboratorio e dalle prove geognostiche effettuate in sito:

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S1 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO										
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			Cu (kPa)	C _{um} C _{uk} (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)			
				WL	WP	PI									
1	0.0	4.70	19.0	29	22	7	59.0	59.0	54	19.0	19.0	17	31.3	31.3	28.7
2	5.4	9.70	19.5	35	19	16	73.0	73.0	67	21.4	21.4	20	24.8	24.8	22.8
3	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	15.4	14.90	18.8	21	17	4	91.0	91.0	84	11.0	11.0	10	34.1	34.1	31.3
5	19.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	21.1	24.90	19.7	27	19	8	163.0	163.0	150	28.0	28.0	26	31.3	31.3	28.7
7	26.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	27.2	31.20	18.6	53	30	23	96.0	96.0	88	53.0	53.0	49	18.7	18.7	17.2
9	32.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	32.0	37.20	19.4	41	23	18	190.0	190.0	174	10.0	10.0	9	30.0	30.0	27.5

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa - 4.1 m rispetto al p.c. nel sondaggio S1₀₈.

2) PONTE SUL CROSTOLO SPONDA SX [S2₀₈, CPT3₀₈]

Nell'area sono previsti rilevati di altezze notevoli, fino a 7 metri dal piano campagna, quindi si sono sviluppati i calcoli di stabilità e calcoli dei cedimenti con i relativi tempi. L'area mostra caratteristiche meccaniche abbastanza modeste per quanto riguarda i terreni più superficiali per cui sarebbe opportuno l'uso delle geogriglie durante la costruzione dei rilevati, per lo meno per quelli di altezze maggiori.

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S2 (BLU)

H Falda (m) = 3.9

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	6.4	Limi e limi sabbiosi. Lenti di ghiaie	S2 - C1	5.40	-
				-	-	-
2	6.4	14.2	Argille e Argille limose	S2 - C2	11.30	-
				-	-	-
3	14.2	16.7	Sabbie e poi lenti ghiaiose	-	-	15.8
				-	-	-
4	16.7	24.8	Argille e limi argillosi con lenti di Sabbie	S2 - C3	21.30	-
				-	-	-
5	24.8	26.0	Sabbie e/o ghiaie	-	-	-
				-	-	-
6	26.0	32.0	Argille e limi	S2 - C4	28.20	-
				-	-	-
7	32.0	40.0	Argille con lenti limose	S2 - C5	34.20	-
				-	-	-

Pur essendo in quest'area i termini coesivi predominanti, nel sondaggio S2₀₈, ad una quota compresa fra i -14.2 e i -16.7 m dal p.c.(nella CPT3₀₈ fra -1.0 e -3.8 m dal p.c.), si incontrano strati incoerente prevalentemente composti da sabbie o sabbie limose. I cedimenti sono notevoli (80 cm) e la presenza di livelli sabbiosi potrebbe, in caso di sisma, generare limitati fenomeni di liquefazione (IL=0.29), per cui l'uso dei dreni verticali è utile oltre che per accelerare i tempi di consolidazione nei livelli coesivi anche per azzerare la propensione alla liquefazione nei livelli sabbiosi sotto falda.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S2 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			Cu (kPa)	Cu _m Cu _k (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)				
				WL	Wp	PI										
1	0.0	S2 - C1	5.40	19.0	34	23	11	47.0	47.0	43	4.0	4.0	4	31.3	31.3	28.7
	6.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6.4	S2 - C2	11.30	19.4	39	24	15	83.0	83.0	76	1.0	1.0	1	31.3	31.3	28.7
	14.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	14.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	16.7	S2 - C3	21.30	19.8	39	21	18	98.0	98.0	90	5.0	5.0	5	26.1	26.1	24.0
	24.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	24.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	26.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	26.0	S2 - C4	28.20	19.2	57	28	29	134.0	134.0	123	28.0	28.0	26	23.6	23.6	21.7
	32.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	32.0	S2 - C5	34.20	20.2	32	18	14	215.0	215.0	197	6.0	6.0	6	31.3	31.3	28.7
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di -3.9 m dal p.c. nel sondaggio S2₀₈. Per lo strato incoerente (sabbie e ghiaie) compreso fra -14.2 e -16.7 m dal p.c. si riporta l'esito delle Nspt in foro.

Nella tabella viene calcolato prima l'angolo di attrito interno medio del materiale e poi quello caratteristico.

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H _{nspt} (m)	N _{spt}		φ' m φ' k	
		Nominale	MEDIO	(°)	(°)
1	0.0	-	-	-	-
	6.4	-	-	-	-
2	6.4	-	-	-	-
	14.2	-	-	-	-
3	14.2	15.8	27	27.0	35.1 32.2
	16.7	-	-	-	-
4	16.7	-	-	-	-
	24.8	-	-	-	-
5	24.8	-	-	-	-
	26.0	-	-	-	-
6	26.0	-	-	-	-
	32.0	-	-	-	-
7	32.0	-	-	-	-
	40.0	-	-	-	-

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S2 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI										
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v /2 kPa	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v kPa	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	
1	0.0	S2 - C1	5.40	19.0	87.6	128.5	1.5	3701	3701 3591	153.5	4731	4731 4590	219.4	5703	5703 5533
	6.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	6.4	S2 - C2	11.30	19.4	145.2	177.9	1.2	4920	4920 4774	207.6	5576	5576 5410	270.0	6495	6495 6302
	14.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	14.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	16.7	S2 - C3	21.30	19.8	247.7	318.8	1.3	5764	5764 5592	299.2	6063	6063 5883	350.7	6361	6361 6172
	24.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	24.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	26.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	26.0	S2 - C4	28.20	19.2	298.4	198.2	0.7	6074	6074 5893	342.2	6328	6328 6140	386.0	6582	6582 6386
	32.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	32.0	S2 - C5	34.20	20.2	387.8	543.8	1.4	9064	9064 8794	425.7	9359	9359 9081	463.6	9628	9628 9342
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

I parametri di compressibilità rivestono molta importanza in quanto nell'area sono previsti rilevati imponenti con i relativi calcoli dei cedimenti. Per quanto riguarda il modulo edometrico viene utilizzato nei calcoli quello relativo alla pressione geostatica efficace (σ'_v) più una sovrappressione media Δσ_v/2 trasmessa dal rilevato al terreno.

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S2 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE			CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'				
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	σ' _{vo} (kPa)	σ' _{vi} - σ' _{vf} (kPa)	C _v (cm²/s)	k (cm/s)	
1	0.0	S2 - C1	5.40	19.0	87.6	49.03 - 98.07	0.9790 · 10 ⁻⁴	0.265 · 10 ⁻⁸
	6.4	-	-	-	-	-	-	-
2	6.4	S2 - C2	11.30	19.4	145.2	98.07 - 196.13	4.0700 · 10 ⁻⁴	0.827 · 10 ⁻⁸
	14.2	-	-	-	-	-	-	-
3	14.2	-	-	-	-	-	-	-
	16.7	-	-	-	-	-	-	-
4	16.7	S2 - C3	21.30	19.8	247.7	196.13 - 392.27	7.8200 · 10 ⁻⁴	1.357 · 10 ⁻⁸
	24.8	-	-	-	-	-	-	-
5	24.8	-	-	-	-	-	-	-
	26.0	-	-	-	-	-	-	-
6	26.0	S2 - C4	28.20	19.2	298.4	196.13 - 392.27	4.7300 · 10 ⁻⁴	0.779 · 10 ⁻⁸
	32.0	-	-	-	-	-	-	-
7	32.0	S2 - C5	34.20	20.2	387.8	392.27 - 784.53	0.9790 · 10 ⁻⁴	0.108 · 10 ⁻⁸
	40.0	-	-	-	-	-	-	-

3) SOTTOVIA HIROSHIMA [SA₁₂, CPT₁₂]

Nell'area sono previsti solamente diaframmi, il calcolo dei quali viene sviluppato dall'ing. strutturista: nelle pagine seguenti viene quindi fornita la stratigrafia e i parametri efficaci caratteristici del terreno (Xk). Per il calcolo dei diaframmi molta importanza risulta avere la permeabilità, il livello della falda e gli strati sabbiosi.

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-A (ROSSO)

H Falda (m) = 0.5

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	2.7	Argilla limosa di colore nocciola	-	-	-
2	2.7	4.2	Limo Sabbioso color grigio	SA - C1	2.90	-
3	4.2	6.0	Argilla debolmente limosa griga, plastica	SA - C2	5.20	-
4	6.0	9.3	Limo argilloso di color Nocciola	SA - C3	7.80	-
5	9.3	9.9	Sabbia da fine a media di color nocciola	-	-	-
6	9.9	13.3	Argilla debolmente limosa griga, plastica	SA - C4	10.60	-
7	13.3	19.0	Sabbia con abbondante ghiaia	-	-	15.0
8	19.0	22.0	Argilla Limosa di colore grigio scuro	SA - C5	20.40	-
9	22.0	25.0	Argilla Limosa di colore grigio scuro	SA - C6	24.80	-

I termini coesivi sono predominanti anche se qualche livello sabbioso lo si incontra: abbiamo un livello molto sottile fra -9.3 e -9.9 m dal p.c. ed un livello più spesso fra -13.3 3 9.9 m dal p.c.

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			Cu (kPa)	Cu _m Cu _k (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)				
				WL	WP	PI										
1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	2.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	2.7	SA - C1	2.90	17.9	47	21	26	20.0	20.0	18	21.0	21.0	19	24.8	24.8	22.8
3	4.2	SA - C2	5.20	18.8	71	33	38	31.0	31.0	28	34.0	34.0	31	24.8	24.8	22.8
4	6.0	SA - C3	7.80	19.0	50	22	28	46.0	46.0	42	28.0	28.0	26	30.0	30.0	27.5
5	9.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	9.9	SA - C4	10.60	19.1	63	26	37	71.0	71.0	65	47.0	47.0	43	28.7	28.7	26.3
7	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	19.0	SA - C5	20.40	18.7	40	28	12	53.0	53.0	49	-	-	-	-	-	-
9	22.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	22.0	SA - C6	24.80	18.8	45	26	19	43.0	43.0	39	-	-	-	-	-	-
9	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -0.5 m dal p.c. nel sondaggio SA, mentre la profondità degli scavi raggiunge circa -9.0 m dal p.c.

In complesso i livelli incoerenti sembrano abbastanza addensati con Nspt > 50.

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H _{Nspt} (m)	N _{spt}		φ ['] _m φ ['] _k	
		Nominale	MEDIO	(°)	
1	0.0	-	-	-	-
	2.7	-	-	-	-
2	2.7	-	-	-	-
	4.2	-	-	-	-
3	4.2	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-
4	6.0	-	-	-	-
	9.3	-	-	-	-
5	9.3	-	-	-	-
	9.9	-	-	-	-
6	9.9	-	-	-	-
	13.3	-	-	-	-
7	13.3	15.0	56	56.0	41.8 38.4
	19.0	-	-	-	-
8	19.0	-	-	-	-
	22.0	-	-	-	-
9	22.0	-	-	-	-
	25.0	-	-	-	-

I parametri di compressibilità non rivestono molta importanza in quest'area mentre risultano molto importanti i parametri di permeabilità riportati nell'ultima tabella.

STRATO (m)	CAMPIONE			MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI										
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v /2 (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)
1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2.7	SA - C1	2.90	17.9	27.9	185.7	6.7	899	899	872	-	-	-	-
	4.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4.2	SA - C2	5.20	18.8	50.8	275.7	5.4	10210	10210	9906	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	6.0	SA - C3	7.80	19.0	75.2	445.6	5.9	3784	3784	3671	-	-	-	-
	9.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	9.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	9.9	SA - C4	10.60	19.1	101.5	295.0	2.9	4209	4209	4084	-	-	-	-
	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	19.0	SA - C5	20.40	18.7	182.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	22.0	SA - C6	24.80	18.8	223.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-A (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE			CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'			
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _{vi} - σ _{vf} (kPa)	C _v (cm ² /s)	k (cm/s)
1	0.0	-	-	-	-	-	-
	2.7	-	-	-	-	-	-
2	2.7	SA - C1	2.90	17.9	27.9	0.0 - 40.0	0.2070 ·10 ⁻⁴ 0.230 ·10 ⁻⁸
	4.2	-	-	-	-	-	-
3	4.2	SA - C2	5.20	18.8	50.8	50.0 - 100.0	3.6600 ·10 ⁻⁴ 0.358 ·10 ⁻⁸
	6.0	-	-	-	-	-	-
4	6.0	SA - C3	7.80	19.0	75.2	40.0 - 80.0	0.3970 ·10 ⁻⁴ 0.105 ·10 ⁻⁸
	9.3	-	-	-	-	-	-
5	9.3	-	-	-	-	-	-
	9.9	-	-	-	-	-	-
6	9.9	SA - C4	10.60	19.1	101.5	80.0 - 150.0	4.4800 ·10 ⁻⁴ 1.064 ·10 ⁻⁸
	13.3	-	-	-	-	-	-
7	13.3	-	-	-	-	-	-
	19.0	-	-	-	-	-	-
8	19.0	SA - C5	20.40	18.7	182.5	-	-
	22.0	-	-	-	-	-	-
9	22.0	SA - C6	24.80	18.8	223.2	-	-
	25.0	-	-	-	-	-	-

4) SVINCOLO RETE 2 [S3₀₈, CPT5₀₈]

Nell'area sono previsti diaframmi, il calcolo dei quali viene sviluppato dall'ing. strutturista: nelle pagine seguenti viene quindi fornita la stratigrafia e i parametri efficaci caratteristici del terreno (Xk). Per il calcolo dei diaframmi molta importanza risulta avere la permeabilità, il livello della falda e la presenza di eventuali strati sabbiosi.

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

H Falda (m) = 2.2

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	6.0	Argilla limosa nocciola passante ad argilla grigia	S3 - C1	4.20	-
				-	-	-
2	6.0	10.8	Argille grigia plastica	S3 - C2	7.30	-
				-	-	-
3	10.8	13.3	Sabbia grigia debolmente limosa	-	-	-
				-	-	-
4	13.3	16.0	Argilla plastica e limo argilloso	S3 - C3	14.30	-
				-	-	-
5	16.0	24.5	Argilla Grigia Consistente	S3 - C4	20.30	-
				-	-	-
6	24.5	30.0	Sabbia fino a 26.4 m poi ghiaie	-	-	-
				-	-	-
7	30.0	35.0	Argilla Grigia Consistente	S3 - C5	30.60	-
				-	-	-
8	35.0	40.0	Argilla Grigia Consistente	S3 - C6	36.30	-
				-	-	-

I termini coesivi sono predominanti anche se qualche livello sabbioso lo si può intercettare dopo i 10 m di profondità: abbiamo un livello abbastanza spesso fra -10.0 e -13.3 m dal p.c. ed un livello ancora più spesso fra -24.5 e 30.0 m dal p.c.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	ATTERBERG			C _u (kPa)	C _u C _u k		C' (kPa)	C' _m C' _k		φ' (°)	φ' _m φ' _k		
				W _L	W _P	PI		(kPa)	(kPa)		(kPa)	(kPa)		(°)	(°)	
1	0.0	S3 - C1	4.20	17.9	51	30	21	27.0	27.0	25	0.0	0.0	0	28.7	28.7	26.3
	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6.0	S3 - C2	7.30	18.7	67	29	38	29.0	29.0	27	4.0	4.0	4	19.9	19.9	18.3
	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	13.3	S3 - C3	14.30	20.1	35	21	14	80.0	80.0	73	4.0	4.0	4	30.0	30.0	27.5
	16.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	16.0	S3 - C4	20.30	19.2	59	30	29	80.0	80.0	73	7.0	7.0	6	23.6	23.6	21.7
	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	30.0	S3 - C5	30.60	17.9	70	35	35	99.0	99.0	91	23.0	23.0	21	21.1	21.1	19.4
	35.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	35.0	S3 - C6	36.30	19.6	56	30	26	137.0	137.0	126	17.0	17.0	16	22.4	22.4	20.6
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -2.2 m dal p.c. nel sondaggio S3, mentre la profondità degli scavi raggiunge circa -9.6 m dal p.c.

Anche se non sono state eseguite apposite prove Nspt in foro, in complesso i livelli incoerenti sembrano abbastanza addensati.

I parametri di compressibilità non rivestono molta importanza per quest'opera mentre risultano molto importanti i parametri di permeabilità riportati nell'ultima tabella. I parametri di compressibilità del sondaggio S3 vengono utilizzati per le opere previste lungo l'asse principale del tracciato con rilevati di altezza di circa 5 m.

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE			MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI														
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v /2 (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)				
1	0.0	S3 - C1	4.20	17.9	55.2	197.0	3.6	2056	2056	1995	100.0	2740	2740	2658	144.9	3096	3096	3004
	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6.0	S3 - C2	7.30	18.7	85.5	183.6	2.1	3353	3353	3253	129.8	3638	3638	3530	174.1	3995	3995	3876
	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	13.3	S3 - C3	14.30	20.1	166.4	92.1	0.6	3166	3166	3072	207.6	3587	3587	3480	248.7	3894	3894	3778
	16.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	16.0	S3 - C4	20.30	19.2	208.8	221.0	1.1	6967	6967	6760	245.8	6857	6857	6653	282.0	6746	6746	6545
	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	30.0	S3 - C5	30.60	17.9	263.7	332.6	1.3	7429	7429	7208	293.4	8380	8380	8131	323.1	8602	8602	8346
	35.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	35.0	S3 - C6	36.30	19.6	370.5	379.0	1.0	8835	8835	8572	396.5	9154	9154	8882	422.6	9350	9350	9072
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE			CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'				
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ' _{vi} - σ' _{vf} (kPa)	C _v (cm ² /s)	k (cm/s)	
1	0.0	S3 - C1	4.20	17.9	55.2	49.03 - 98.07	0.3430 · 10 ⁻⁴	0.131 · 10 ⁻⁸
	6.0	-	-	-	-	-	-	-
2	6.0	S3 - C2	7.30	18.7	85.5	49.03 - 98.07	2.5400 · 10 ⁻⁴	0.759 · 10 ⁻⁸
	10.8	-	-	-	-	-	-	-
3	10.8	-	-	-	-	-	-	-
	13.3	-	-	-	-	-	-	-
4	13.3	S3 - C3	14.30	20.1	166.4	98.07 - 196.13	13.9000 · 10 ⁻⁴	6.860 · 10 ⁻⁸
	16.0	-	-	-	-	-	-	-
5	16.0	S3 - C4	20.30	19.2	208.8	196.23 - 588.39	3.2300 · 10 ⁻⁴	0.564 · 10 ⁻⁸
	24.5	-	-	-	-	-	-	-
6	24.5	-	-	-	-	-	-	-
	30.0	-	-	-	-	-	-	-
7	30.0	S3 - C5	30.60	17.9	263.7	196.23 - 588.39	1.1900 · 10 ⁻⁴	0.181 · 10 ⁻⁸
	35.0	-	-	-	-	-	-	-
8	35.0	S3 - C6	36.30	19.6	370.5	196.23 - 588.39	2.6700 · 10 ⁻⁴	0.368 · 10 ⁻⁸
	40.0	-	-	-	-	-	-	-

5) SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE [S3₀₈, CPT5₀₈]

Nell'area sono previsti rilevati di altezza fino a 5 metri dal piano campagna. Gli strati sono ancora prevalentemente coesivi, quindi si sono sviluppati calcoli di stabilità e calcoli dei cedimenti con i relativi tempi.

I cedimenti sono notevoli e la presenza di livelli sabbioso non sembra tuttavia sufficiente ad innescare, in caso di sisma, locali fenomeni di liquefazione (I.L.=0).

Anche quest'area mostra caratteristiche meccaniche modeste per quanto riguarda i terreni più superficiali per cui, vista l'altezza dei rilevati, si impone l'uso delle geogriglie e/o dei rilevati alleggeriti.

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

H Falda (m) = 2.2

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	6.0	Argilla limosa nocciola passante ad argilla grigia	S3 - C1	4.20	-
				-	-	-
2	6.0	10.8	Argille grigia plastica	S3 - C2	7.30	-
				-	-	-
3	10.8	13.3	Sabbia grigia debolmente limosa	-	-	-
				-	-	-
4	13.3	16.0	Argilla plastica e limo argilloso	S3 - C3	14.30	-
				-	-	-
5	16.0	24.5	Argilla Grigia Consistente	S3 - C4	20.30	-
				-	-	-
6	24.5	30.0	Sabbia fino a 26.4 m poi ghiaie	-	-	-
				-	-	-
7	30.0	35.0	Argilla Grigia Consistente	S3 - C5	30.60	-
				-	-	-
8	35.0	40.0	Argilla Grigia Consistente	S3 - C6	36.30	-
				-	-	-

I termini coesivi sono predominanti con qualche livello sabbioso e/o limoso. Esiste un livello incoerente (sabbie e limi) fra i -10.8 e i - 13.3 m dal p.c.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	ATTERBERG			C _u (kPa)	C _{um} C _{uk} (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)				
				W _L	W _P	PI										
1	0.0	S3 - C1	4.20	17.9	51	30	21	27.0	27.0	25	0.0	0.0	0	28.7	28.7	26.3
	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6.0	S3 - C2	7.30	18.7	67	29	38	29.0	29.0	27	4.0	4.0	4	19.9	19.9	18.3
	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	13.3	S3 - C3	14.30	20.1	35	21	14	80.0	80.0	73	4.0	4.0	4	30.0	30.0	27.5
	16.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	16.0	S3 - C4	20.30	19.2	59	30	29	80.0	80.0	73	7.0	7.0	6	23.6	23.6	21.7
	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	30.0	S3 - C5	30.60	17.9	70	35	35	99.0	99.0	91	23.0	23.0	21	21.1	21.1	19.4
	35.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	35.0	S3 - C6	36.30	19.6	56	30	26	137.0	137.0	126	17.0	17.0	16	22.4	22.4	20.6
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di -2.2 m dal p.c. nel sondaggio S2₀₈.

Nelle successive 2 tabelle vengono riportati i parametri di compressibilità, i coefficienti di consolidazione e la permeabilità K.

I parametri di compressibilità rivestono molta importanza in quest'area, in quanto sono previsti rilevati importanti con i relativi calcoli dei cedimenti.

Per quanto riguarda il modulo edometrico viene utilizzato nei calcoli quello relativo alla pressione geostatica efficace più una sovrappressione media $\Delta\sigma_v/2$ trasmessa al terreno dal rilevato stradale (ad esempio, come modulo edometrico caratteristico del primo strato di terreno compreso fra 0 e 6 m dal p.c., si è preso quello calcolato alla pressione $(\sigma'_{v_0} + \Delta\sigma_v/2)$ che corrisponde ad un modulo edometrico $E_{dk} = 2658$ kPa).

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI												
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v /2 (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)			
1	0.0 6.0	S3 - C1 -	4.20 -	17.9 -	55.2 -	197.0 -	3.6 -	2056 2056	1995	100.0 -	2740 -	2740	2658	144.9 -	3096 -	3096	3004
2	6.0 10.8	S3 - C2 -	7.30 -	18.7 -	85.5 -	183.6 -	2.1 -	3353 3353	3253	129.8 -	3638 -	3638	3530	174.1 -	3995 -	3995	3876
3	10.8 13.3	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	-	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	-
4	13.3 16.0	S3 - C3 -	14.30 -	20.1 -	166.4 -	92.1 -	0.6 -	3166 3166	3072	207.6 -	3587 -	3587	3480	248.7 -	3894 -	3894	3778
5	16.0 24.5	S3 - C4 -	20.30 -	19.2 -	208.8 -	221.0 -	1.1 -	6967 6967	6760	245.8 -	6857 -	6857	6653	282.0 -	6746 -	6746	6545
6	24.5 30.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	-	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	-
7	30.0 35.0	S3 - C5 -	30.60 -	17.9 -	263.7 -	332.6 -	1.3 -	7429 7429	7208	293.4 -	8380 -	8380	8131	323.1 -	8602 -	8602	8346
8	35.0 40.0	S3 - C6 -	36.30 -	19.6 -	370.5 -	379.0 -	1.0 -	8835 8835	8572	396.5 -	9154 -	9154	8882	422.6 -	9350 -	9350	9072

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S3 (BLU)

STRATO (m)	CAMPIONE				CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'			
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _{vi} - σ _{vf} (kPa)	C _v (cm²/s)	k (cm/s)	
1	0.0 6.0	S3 - C1 -	4.20 -	17.9 -	55.2 -	49.03 - 98.07 -	0.3430 · 10 ⁻⁴ -	0.131 · 10 ⁻⁸ -
2	6.0 10.8	S3 - C2 -	7.30 -	18.7 -	85.5 -	49.03 - 98.07 -	2.5400 · 10 ⁻⁴ -	0.759 · 10 ⁻⁸ -
3	10.8 13.3	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
4	13.3 16.0	S3 - C3 -	14.30 -	20.1 -	166.4 -	98.07 - 196.13 -	13.9000 · 10 ⁻⁴ -	6.860 · 10 ⁻⁸ -
5	16.0 24.5	S3 - C4 -	20.30 -	19.2 -	208.8 -	196.23 - 588.39 -	3.2300 · 10 ⁻⁴ -	0.564 · 10 ⁻⁸ -
6	24.5 30.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
7	30.0 35.0	S3 - C5 -	30.60 -	17.9 -	263.7 -	196.23 - 588.39 -	1.1900 · 10 ⁻⁴ -	0.181 · 10 ⁻⁸ -
8	35.0 40.0	S3 - C6 -	36.30 -	19.6 -	370.5 -	196.23 - 588.39 -	2.6700 · 10 ⁻⁴ -	0.368 · 10 ⁻⁸ -

6) CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI [SD₁₂, CPT7₀₉]

Nell'area sono previsti rilevati di altezza fino a 8 m e quindi si svilupperanno calcoli di stabilità e calcoli dei cedimenti e relativi tempi.

Anche quest'area mostra caratteristiche meccaniche modeste per quanto riguarda i terreni più superficiali per cui, vista l'altezza dei rilevati, si impone l'uso delle geogriglie e/o dei rilevati alleggeriti (vedi paragrafo seguente).

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-D (ROSSO)

H Falda (m) = 2.8

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	3.8	Limo Argilloso debolmente sabbioso	SD-C1	2.80	-
2	3.8	10.0	Argilla debolmente limosa	SD-C2	5.30	-
3	10.0	12.9	Argilla debolmente limosa, da 11.90 limo sabbioso	SD-C3	7.70	-
4	12.9	17.1	Ghiaia grossolana in abbondante matrice sabbiosa	SD-C4	10.10	-
5	17.1	19.1	Argilla debolmente limosa di colore grigio	-	-	-
6	19.1	23.7	Ghiaia grossolana in abbondante matrice sabbiosa	SD-C5	17.50	-
7	23.7	30.5	Alternanze di argille limose e sabbie	-	-	-
8	30.5	39.5	Argilla debolmente limosa di colore grigio	SD-C6	23.90	-
9	39.5	40.0	Ghiaia media in matrice sabbiosa e limosa	SD-C7	30.70	-
				SD-C8	35.20	-
				-	-	39.7
				-	-	-

I termini coesivi sono ancora predominanti ma nel sondaggio SD₁₂ fra -12.9 e -17.1 e fra -19.1 e 23.7 e nella prova CPT07 fra -2 e -5.6 m dal p.c. sono presenti spessi livelli incoerente costituiti da sabbie e/o sabbie con ghiaie. La presenza di livelli incoerenti non sembra tuttavia potere dar luogo fenomeni di liquefazione (I.L.=0).

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-D (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			C _u (kPa)	C _{um} C _{uk} (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ° (°)	φ° _m φ° _k (°)				
				W _L	W _p	Pl										
1	0.0	SD-C1	2.80	19.5	56	27	29	31.0	31.0	28	9.0	9.0	8	24.8	24.8	22.8
	3.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3.8	SD-C2	5.30	19.5	49	27	22	56.0	53.0	49	12.0	29.0	27	26.1	24.3	22.3
	10.0	SD-C3	7.70	18.8	64	31	33	50.0	-	-	46.0	-	-	22.4	-	-
3	10.0	SD-C4	10.10	17.7	56	28	28	40.0	40.0	37	6.0	6.0	6	24.8	24.8	22.8
	12.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	17.1	SD-C5	17.50	19.0	51	26	25	43.7	43.7	40	-	-	-	-	-	-
	19.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	19.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	23.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	23.7	SD-C6	23.90	19.7	64	28	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	30.5	SD-C7	30.70	18.5	68	30	38	82.8	73.9	68	-	-	-	-	-	-
	39.5	SD-C8	35.20	19.1	40	25	15	65.0	-	-	-	-	-	-	-	-
9	39.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -2.8 m dal p.c. nel sondaggio SD₁₂ e a -2.5 m dal p.c. nella prova CPT₇₀₉

I parametri di compressibilità rivestono molta importanza in quest'area, in quanto sono previsti rilevati importanti con i relativi calcoli dei cedimenti. Per quanto riguarda il modulo edometrico viene utilizzato nei calcoli quello relativo alla pressione geostatica efficace più una sovrappressione media $\Delta\sigma_v/2$ impressa dal rilevato.

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-D (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI													
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ _{vo} +Δσ _v /2 (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ _{vo} +Δσ _v (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)				
1	0.0 3.8	SD-C1 -	2.80 -	19.5 -	54.6 -	160.2 -	2.9 -	4641 4641	4503	126.5 -	4611 -	4611	4474	198.5 -	5375 -	5375	5215	
2	3.8 10.0	SD-C2 SD-C3	5.30 7.70	19.5 18.8	78.4 95.8	240.5 265.6	3.1 2.8	4477 4120	4299	4171	149.9 166.5	5096 5047	5072	4921	221.5 237.2	5463 6061	5762	5591
3	10.0 12.9	SD-C4 -	10.10 -	17.7 -	105.8 -	69.5 -	0.7 -	1705 -	1705	1654	175.2 -	2495 -	2495	2421	244.6 -	3363 -	3363	3263
4	12.9 17.1	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
5	17.1 19.1	SD-C5 -	17.50 -	19.0 -	185.5 -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
6	19.1 23.7	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
7	23.7 30.5	SD-C6 -	23.90 -	19.7 -	259.8 -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
8	30.5 39.5	SD-C7 SD-C8	30.70 35.20	18.5 19.1	289.0 348.3	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
9	39.5 40.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-D (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'			
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ _{vo} (kPa)	σ _{vi} - σ _{vf} (kPa)	C _v (cm ² /s)	k (cm/s)	
1	0.0 3.8	SD-C1 -	2.80 -	19.5 -	54.6 -	50 - 100	3.1700 · 10 ⁻⁴	0.683 · 10 ⁻⁸
2	3.8 10.0	SD-C2 SD-C3	5.30 7.70	19.5 18.8	78.4 95.8	50 - 100	1.9700 · 10 ⁻⁴	0.440 · 10 ⁻⁸
3	10.0 12.9	SD-C4 -	10.10 -	17.7 -	105.8 -	100 - 200	8.8900 · 10 ⁻⁴	2.158 · 10 ⁻⁸
4	12.9 17.1	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
5	17.1 19.1	SD-C5 -	17.50 -	19.0 -	185.5 -	- -	- -	- -
6	19.1 23.7	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
7	23.7 30.5	SD-C6 -	23.90 -	19.7 -	259.8 -	- -	- -	- -
8	30.5 39.5	SD-C7 SD-C8	30.70 35.20	18.5 19.1	289.0 348.3	- -	- -	- -
9	39.5 40.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -

7) SOTTOPASSO DI VIA FERRARONI ALLA FFSS [SB₁₂]

Nell'area sono previsti diaframmi il calcolo dei quali viene sviluppato dall'ing. strutturista: nelle pagine seguenti viene quindi fornita la stratigrafia e i parametri efficaci caratteristici del terreno (Xk).

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-B - ROSSO

H Falda (m) = 3.2

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	
1	0.0	4.5	Limo Argilloso con sabbia	SB - C1	2.40	-
				-	-	-
2	4.5	7.0	Argilla Limosa Grigia con livelli di sabbie	SB - C2	5.20	-
				-	-	-
3	7.0	10.1	Argilla Limosa Grigia con livelli di sabbie	SB - C3	7.70	-
				-	-	-
4	10.1	14.3	Sabbia marrone nocciola con presenza di livelli argillosi	-	-	10.1
				-	-	-
5	14.3	18.2	Sabbie e/o ghiaie	-	-	15.0
				-	-	-
6	18.2	18.8	Limi sabbiosi e sabbie	-	-	-
				-	-	-
7	18.8	21.0	Ghiaia in matriche sabbiosa	-	-	20.1
				-	-	-
8	21.0	25.0	Argilla Grigia-Blu molto consistente	SB - C4	24.80	-
				-	-	-

In questo sondaggio i termini coesivi, per i primi 10 m dal p.c., sono predominanti. Alle argille, anche nei livelli superiori si intercalano sottili strati di sabbie e limi. Dalla profondità di circa 10 m dal p.c. i livelli incoerenti diventano predominanti con strati di ghiaie, sabbie e limi sabbiosi.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-B - ROSSO

STRATO (m)	CAMPIONE			ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			Cu (kPa)	Cu _m Cu _k (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)			
				W _L	W _p	Pl									
1	0.0	2.40	19.5	43	26	17	31.0	31.0	28	28.0	28.0	26	23.6	23.6	21.7
	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	4.5	5.20	19.3	35	22	13	49.0	49.0	45	1.0	1.0	1	31.4	31.4	28.8
	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7.0	7.70	19.3	61	31	30	86.0	86.0	79	3.0	3.0	3	28.7	28.7	26.3
	10.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	10.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	14.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	18.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	18.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	21.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	21.0	24.80	18.8	59	28	31	91.2	91.2	84	-	-	-	-	-	-
	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -3.2 m dal p.c. nel sondaggio a carotaggio continuo SB₁₂.

In complesso i livelli incoerenti sembrano abbastanza addensati con N_{spt} > 50.

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H _{NSPT} (m)	N _{spt}		φ _m φ _k	
		Nominale	MEDIO	(°)	
1	0.0	-	-	-	-
	4.5	-	-	-	-
2	4.5	-	-	-	-
	7.0	-	-	-	-
3	7.0	-	-	-	-
	10.1	-	-	-	-
4	10.1	10.1	84	84.0	45.0 41.3
	14.3	-	-	-	-
5	14.3	15.0	52	52.0	41.1 37.7
	18.2	-	-	-	-
6	18.2	-	-	-	-
	18.8	-	-	-	-
7	18.8	20.1	61	61.0	42.7 39.2
	21.0	-	-	-	-
8	21.0	-	-	-	-
	25.0	-	-	-	-

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-B - ROSSO

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	σ _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ _{vo} +Δσ _v /2 kPa	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ _{vo} +Δσ _v kPa	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)		
1	0.0	SB - C1	2.40	19.5	46.8	135.2	2.9	3543	3543	3438	-	-	-	-	-	
	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	4.5	SB - C2	5.20	19.3	80.4	108.3	1.3	3086	3086	2994	-	-	-	-	-	
	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3	7.0	SB - C3	7.70	19.3	103.6	311.5	3.0	10326	10326	10019	-	-	-	-	-	
	10.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
4	10.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	14.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
5	14.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	18.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
6	18.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	18.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
7	18.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	21.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
8	21.0	SB - C4	24.80	18.8	250.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-B - ROSSO

STRATO (m)	CAMPIONE				CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'			
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	σ _{vo} (kPa)	σ _{vi} - σ _{vf} (kPa)	C _v (cm²/s)	k (cm/s)	
1	0.0	SB - C1	2.40	19.5	46.8	50 - 100	9.4900 · 10 ⁻⁴	2.679 · 10 ⁻⁸
	4.5	-	-	-	-	-	- · 10 ⁻⁴	- · 10 ⁻⁸
2	4.5	SB - C2	5.20	19.3	80.4	50 - 100	3.0600 · 10 ⁻⁴	0.992 · 10 ⁻⁸
	7.0	-	-	-	-	-	- · 10 ⁻⁴	- · 10 ⁻⁸
3	7.0	SB - C3	7.70	19.3	103.6	100 - 200	4.4600 · 10 ⁻⁴	0.432 · 10 ⁻⁸
	10.1	-	-	-	-	-	-	-
4	10.1	-	-	-	-	-	-	-
	14.3	-	-	-	-	-	-	-
5	14.3	-	-	-	-	-	-	-
	18.2	-	-	-	-	-	-	-
6	18.2	-	-	-	-	-	-	-
	18.8	-	-	-	-	-	-	-
7	18.8	-	-	-	-	-	-	-
	21.0	-	-	-	-	-	-	-
8	21.0	SB - C4	24.80	18.8	250.2	-	-	-
	25.0	-	-	-	-	-	-	-

8) SOTTOVIA CARLO MARX [SE₁₂]

Nell'area sono previsti diaframmi il calcolo dei quali viene sviluppato dall'ing. strutturista: nelle pagine seguenti viene quindi fornita la stratigrafia e i parametri efficaci caratteristici del terreno (Xk).

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

H Falda (m) = 2.5

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	5.0	Limo Argilloso debolmente sabbioso	SE - C1	2.70	-
2	5.0	6.0	Sabbia media color nocciola	SE - C2	5.20	-
3	6.0	7.0	Limo sabbioso umido	-	-	-
4	7.0	10.0	Argilla debolmente limosa di color grigio-azzurro	SE - C3	7.20	-
5	10.0	11.5	Sabbia limosa color nocciola	SE - C4	10.20	-
6	11.5	19.8	Argilla limosa color grigio	SE - C5	15.30	-
7	19.8	23.0	Ghiaia in matriche sabbiosa	-	-	20.2
8	23.0	25.0	Ghiaia in matriche sabbiosa	-	-	24.5

I termini coesivi sono predominanti fino a quasi -20 m dal p.c. se si eccettua uno strato limo sabbioso fra -6 e -7 m dal p.c. Da -19.8 m dal p.c. sono predominanti le ghiaie.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO											
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			C _u			C'			φ'			
				W _L	W _p	PI	(kPa)	C _{um}	C _{uk}	(kPa)	C' _m	C' _k	(°)	φ' _m	φ' _k	
1	0.0 5.0	SE - C1 -	2.70 -	19.2 -	44 -	25 -	19 -	43.0 -	43.0 -	39 -	3.0 -	3.0 -	3 -	31.0 -	31.0 -	28.5 -
2	5.0 6.0	SE - C2 -	5.20 -	18.8 -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
3	6.0 7.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
4	7.0 10.0	SE - C3 -	7.20 -	18.6 -	45 -	25 -	20 -	65.0 -	65.0 -	60 -	3.0 -	3.0 -	3 -	30.0 -	30.0 -	27.5 -
5	10.0 11.5	SE - C4 -	10.20 -	19.8 -	46 -	25 -	21 -	67.0 -	67.0 -	61 -	14.0 -	14.0 -	13 -	24.8 -	24.8 -	22.8 -
6	11.5 19.8	SE - C5 -	15.30 -	18.6 -	49 -	23 -	26 -	22.5 -	22.5 -	21 -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
7	19.8 23.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
8	23.0 25.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -2.5 m dal p.c.

La profondità degli scavi in quest'area raggiunge circa -8.5 m mentre la stabilità dei fronti di scavo è assicurata da paratie di diaframmi.

I livelli incoerenti costituiti generalmente da ghiaie in matrice limosa e sabbiosa, che si incontrano ad una ventina di metri di profondità, sono sempre abbastanza addensati con Nspt sempre maggiori di 50 colpi.

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H (m)	N _{spt}		φ ['] _m φ ['] _k	
		Nominale	MEDIO	(°)	
1	0.0	-	-	-	-
	5.0	-	-	-	-
2	5.0	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-
3	6.0	-	-	-	-
	7.0	-	-	-	-
4	7.0	-	-	-	-
	10.0	-	-	-	-
5	10.0	-	-	-	-
	11.5	-	-	-	-
6	11.5	-	-	-	-
	19.8	-	-	-	-
7	19.8	20.2	51	51.0	40.9 37.5
	23.0	-	-	-	-
8	23.0	24.5	100	100.0	45.0 41.3
	25.0	-	-	-	-

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO E INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI									
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v /2 (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo} +Δσ _v (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)
1	0.0	SE - C1	2.70	19.2	49.8	177.7	3.6	3021	3021	2931	-	-	-	-
	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	5.0	SE - C2	5.20	18.8	70.8	102.5	1.4	2388	2388	2317	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	7.0	SE - C3	7.20	18.6	86.9	304.7	3.5	4203	4203	4078	-	-	-	-
	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	10.0	SE - C4	10.20	19.8	125.0	111.8	0.9	3922	3922	3805	-	-	-	-
	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	11.5	SE - C5	15.30	18.6	156.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	23.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	23.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'			
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ' _{vi} - σ' _{vf} (kPa)	C _v (cm ² /s)	k (cm/s)	
1	0.0	SE - C1	2.70	19.2	49.8	50 - 100	9.4900 · 10 ⁻⁴	3.141 · 10 ⁻⁸
	5.0	-	-	-	-	-	- · 10 ⁻⁴	- · 10 ⁻⁸
2	5.0	SE - C2	5.20	18.8	70.8	50 - 100	3.0600 · 10 ⁻⁴	1.281 · 10 ⁻⁸
	6.0	-	-	-	-	-	- · 10 ⁻⁴	- · 10 ⁻⁸
3	6.0	-	-	-	-	-	-	-
	7.0	-	-	-	-	-	-	-
4	7.0	SE - C3	7.20	18.6	86.9	50 - 100	10.7000 · 10 ⁻⁴	2.546 · 10 ⁻⁸
	10.0	-	-	-	-	-	- · 10 ⁻⁴	- · 10 ⁻⁸
5	10.0	SE - C4	10.20	19.8	125.0	100 - 200	11.9000 · 10 ⁻⁴	3.034 · 10 ⁻⁸
	11.5	-	-	-	-	-	- · 10 ⁻⁴	- · 10 ⁻⁸
6	11.5	SE - C5	15.30	18.6	156.6	-	-	-
	19.8	-	-	-	-	-	-	-
7	19.8	-	-	-	-	-	-	-
	23.0	-	-	-	-	-	-	-
8	23.0	-	-	-	-	-	-	-
	25.0	-	-	-	-	-	-	-

9) PONTE SUL TORRENTE MODOLENA [SE₁₂, CPT_{2,12}]

Nell'area sono previsti solo diaframmi il calcolo dei quali viene sviluppato dall'ing. strutturista: nelle pagine seguenti viene quindi fornita la stratigrafia e i parametri efficaci caratteristici del terreno (Xk).

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

H Falda (m) = 2.5

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	5.0	Limo Argilloso debolmente sabbioso	SE - C1	2.70	-
2	5.0	6.0	Sabbia media color nocciola	SE - C2	5.20	-
3	6.0	7.0	Limo sabbioso umido	-	-	-
4	7.0	10.0	Argilla debolmente limosa di color grigio-azzurro	SE - C3	7.20	-
5	10.0	11.5	Sabbia limosa color nocciola	SE - C4	10.20	-
6	11.5	19.8	Argilla limosa color grigio	SE - C5	15.30	-
7	19.8	23.0	Ghiaia in matrice sabbiosa	-	-	20.2
8	23.0	25.0	Ghiaia in matrice sabbiosa	-	-	24.5

I termini coesivi sono predominanti fino a quasi -20 m dal p.c. se si eccettua uno strato limo sabbioso fra -6 e -7 m dal p.c. Da -19.8 m dal p.c. sono predominanti le ghiaie.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO									
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	ATTERBERG			C _u (kPa)	C _{um} C _{uk} (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)		
				W _L	W _P	PI								
1	0.0 5.0	SE - C1 -	2.70 -	19.2 -	44 -	25 -	19 -	43.0 -	43.0 39	3.0 -	3.0 3	31.0 -	31.0 28.5	
2	5.0 6.0	SE - C2 -	5.20 -	18.8 -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	
3	6.0 7.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	
4	7.0 10.0	SE - C3 -	7.20 -	18.6 -	45 -	25 -	20 -	65.0 -	65.0 60	3.0 -	3.0 3	30.0 -	30.0 27.5	
5	10.0 11.5	SE - C4 -	10.20 -	19.8 -	46 -	25 -	21 -	67.0 -	67.0 61	14.0 -	14.0 13	24.8 -	24.8 22.8	
6	11.5 19.8	SE - C5 -	15.30 -	18.6 -	49 -	23 -	26 -	22.5 -	22.5 21	- -	- -	- -	- -	
7	19.8 23.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	
8	23.0 25.0	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -2.5 m dal p.c.

I livelli incoerenti costituiti generalmente da ghiaie in matrice limosa e sabbiosa, che si incontrano ad una ventina di metri di profondità, sono sempre abbastanza addensati con Nspt sempre maggiori di 50 colpi.

RELAZIONE GEOTECNICA

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H (m)	N _{spt}		φ ['] _m φ ['] _k	
		Nominale	MEDIO	(°)	
1	0.0	-	-	-	-
	5.0	-	-	-	-
2	5.0	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-
3	6.0	-	-	-	-
	7.0	-	-	-	-
4	7.0	-	-	-	-
	10.0	-	-	-	-
5	10.0	-	-	-	-
	11.5	-	-	-	-
6	11.5	-	-	-	-
	19.8	-	-	-	-
7	19.8	20.2	51	51.0	40.9 37.5
	23.0	-	-	-	-
8	23.0	24.5	100	100.0	45.0 41.3
	25.0	-	-	-	-

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO E INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI									
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ ['] _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ ['] _{vo} +Δσ _v /2 (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ ['] _{vo} +Δσ _v (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)
1	0.0	SE - C1	2.70	19.2	49.8	177.7	3.6	3021	3021	2931	-	-	-	-
	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	5.0	SE - C2	5.20	18.8	70.8	102.5	1.4	2388	2388	2317	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	7.0	SE - C3	7.20	18.6	86.9	304.7	3.5	4203	4203	4078	-	-	-	-
	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	10.0	SE - C4	10.20	19.8	125.0	111.8	0.9	3922	3922	3805	-	-	-	-
	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	11.5	SE - C5	15.30	18.6	156.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	23.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	23.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE E PERMEABILITA'

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-E (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				CONSOLIDAZIONE - PERMEABILITA'			
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ ['] _{vo} (kPa)	σ _{vi} - σ _{vf} (kPa)	C _v (cm ² /s)	k (cm/s)	
1	0.0	SE - C1	2.70	19.2	49.8	50 - 100	9.4900 · 10 ⁻⁴	3.141 · 10 ⁻⁸
	5.0	-	-	-	-	-	-	-
2	5.0	SE - C2	5.20	18.8	70.8	50 - 100	3.0600 · 10 ⁻⁴	1.281 · 10 ⁻⁸
	6.0	-	-	-	-	-	-	-
3	6.0	-	-	-	-	-	-	-
	7.0	-	-	-	-	-	-	-
4	7.0	SE - C3	7.20	18.6	86.9	50 - 100	10.7000 · 10 ⁻⁴	2.546 · 10 ⁻⁸
	10.0	-	-	-	-	-	-	-
5	10.0	SE - C4	10.20	19.8	125.0	100 - 200	11.9000 · 10 ⁻⁴	3.034 · 10 ⁻⁸
	11.5	-	-	-	-	-	-	-
6	11.5	SE - C5	15.30	18.6	156.6	-	-	-
	19.8	-	-	-	-	-	-	-
7	19.8	-	-	-	-	-	-	-
	23.0	-	-	-	-	-	-	-
8	23.0	-	-	-	-	-	-	-
	25.0	-	-	-	-	-	-	-

10) PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO [S7₀₉,S8₀₉]

Nell'area sono previste rilevati di altezza fino a 7 metri dal piano campagna: quindi si svilupperanno calcoli di stabilità ed i calcoli dei cedimenti con i relativi tempi.

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-7 (ROSSO)

H Falda (m) = 4.0

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	5.5	Argilla di color nocciola - Limo argilloso	S7 - C1	2.50	-
				-	-	-
2	5.5	12.9	Sabbia fine di color nocciola passante a limo e argilla	S7 - C2	10.30	-
				-	-	-
3	12.9	17.5	Limo sabbioso umido	-	-	14.8
				-	-	-
4	17.5	18.5	Argilla debolmente limosa di color grigio-azzurro	-	-	18.0
				-	-	-
5	18.5	26.3	Sabbia limosa color nocciola	-	-	20.2
				-	-	23.7
6	26.3	30.0	Argilla limosa color grigio	S7 - C4	27.20	-
				-	-	-
7	30.0	33.0	Argilla limosa color grigio	S7 - C5	31.20	-
				-	-	-
8	33.0	40.0	Ghiaia in matriche sabbiosa	-	-	35.4
				-	-	-

In questa area i termini coesivi sono predominanti solo in superficie. Nel sondaggio S7₀₈ a partire da -12.9 dal p.c. si incontra prima uno strato sabbioso, quindi un livello limoso ed argilloso ed infine uno strato sabbioso limoso.

la presenza di livelli sabbiosi potrebbe, in caso di sisma, generare limitati e localizzati fenomeni di liquefazione (I.L.=0.52), per cui l'uso dei dreni verticali risulta utile, oltre che per accelerare i tempi di consolidazione nei livelli coesivi, anche per azzerare la propensione alla liquefazione nei livelli sabbiosi sotto falda.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-7 (ROSSO)

STRATO (m)		CAMPIONE			ANALISI DI LABORATORIO											
		CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	ATTERBERG			Cu (kPa)	Cu _m Cu _k (kPa)	C' (kPa)	C' _m C' _k (kPa)	φ' (°)	φ' _m φ' _k (°)			
					W _L	W _p	PI									
1	0.0 5.5	S7 - C1 -	2.50 -	18.9 -	-	-	-	36.0	36.0	33	24.0	24.0	22	22.3	22.3	20.5
2	5.5 12.9	S7 - C2 -	10.30 -	18.6 -	-	-	-	70.0	70.0	64	18.0	18.0	17	26.1	26.1	24.0
3	12.9 17.5	- -	- -	- -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	17.5 18.5	- -	- -	- -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	18.5 26.3	- -	- -	- -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	26.3 30.0	S7 - C4 -	27.20 -	19.4 -	-	-	-	184.0	184.0	169	16.0	16.0	15	31.3	31.3	28.7
7	30.0 33.0	S7 - C5 -	31.20 -	19.5 -	-	-	-	192.0	192.0	176	36.0	36.0	33	36.9	36.9	33.9
8	33.0 40.0	- -	- -	- -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -4.0 m dal p.c. nel sondaggio S7₀₈. Non si hanno scavi in quest'area.

Dalle prove N_{spt} eseguite in foro non sembra che i terreni incoerenti siano particolarmente addensati:

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H (m)	N _{spt}	N _{spt}	φ' _m φ' _k	φ' _k (°)
		Nominale	MEDIO		
1	0.0	-	-	-	-
	5.5	-	-	-	-
2	5.5	-	-	-	-
	12.9	-	-	-	-
3	12.9	14.8	45	45.0	39.6 36.4
	17.5	-	-	-	-
4	17.5	18.0	1	1.0	20.0 18.4
	18.5	-	-	-	-
5	18.5	20.2	47	42.0	39.0 35.8
	26.3	23.7	37	-	-
6	26.3	-	-	-	-
	30.0	-	-	-	-
7	30.0	-	-	-	-
	33.0	-	-	-	-
8	33.0	35.4	99	99.0	45.0 41.3
	40.0	-	-	-	-

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' DA PROVE EDOMETRICHE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-7 (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				MODULO EDOMETRICO PER GLI INTERVALLI TENSIONALI SIGNIFICATIVI										
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	σ _p (kPa)	OCR	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo+Δσ_v/2} (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	σ' _{vo+Δσ_v} (kPa)	Ed (kPa)	Ed _m Ed _k (kPa)	
1	0.0	S7 - C1	2.50	18.9	47.3	247.8	5.2	5810	5810	5637	-	-	-	-	
	5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	5.5	S7 - C2	10.30	18.6	128.6	179.6	1.4	4432	4432	4300	-	-	-	-	
	12.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3	12.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
4	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	18.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
5	18.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	26.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
6	26.3	S7 - C4	27.20	19.4	295.7	354.2	1.2	7580	7580	7354	-	-	-	-	
	30.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
7	30.0	S7 - C5	31.20	19.5	336.4	384.9	1.1	7866	7866	7632	-	-	-	-	
	33.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
8	33.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	40.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

11) SOTTOVIA FFSS MILANO-BOLOGNA [S8₀₉, CPT13₀₉]

Nell'area sono previsti solo diaframmi il calcolo dei quali viene sviluppato dall'ing. strutturista: nelle pagine seguenti viene quindi fornita la stratigrafia e i parametri efficaci caratteristici del terreno (Xk).

STRATIGRAFIA AREA DI INDAGINE

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-8 (ROSSO)

H Falda (m) = 4.0

STRATO (m)			DESCRIZIONE LITOLOGIA DELLO STRATO	CAMPIONE		Nspt
				Codice	Profondità(m)	Profondità(m)
1	0.0	4.5	Argilla di color nocciola - Limo argilloso	S8 - C1	2.70	-
				-	-	-
2	4.5	6.5	Argilla di color grigio di media consistenza	S8 - C2	5.20	-
				-	-	-
3	6.5	11.3	Argilla di color grigio di medio-bassa consistenza	S8 - C3	7.30	-
				-	-	-
4	11.3	15.0	Ghiaietto in matrice sabbiosa	-	-	13.2
				-	-	-
5	15.0	15.8	Sabbia limosa color nocciola	-	-	-
				-	-	-
6	15.8	17.9	Sabbia medio fine	-	-	17.7
				-	-	-
7	17.9	20.0	Ghiaietto in matrice sabbiosa	-	-	19.0
				-	-	-

I termini coesivi sono predominanti fino a quasi -11.3 m dal p.c. Da -11.3 m dal p.c. si alternano strati limosi e limo-sabbiosi con potenti strati ghiaiosi.

PARAMETRI MECCANICI CARATTERISTICI

PROVE DI RIFERIMENTO: SONDAGGIO S-8 (ROSSO)

STRATO (m)	CAMPIONE				ANALISI DI LABORATORIO										
	CODICE	H _{camp} (m)	γ (kN/m³)	ATTERBERG			Cu (kPa)	Cu _m Cu _k		C' (kPa)	C' _m C' _k		φ' (°)	φ' _m φ' _k	
				W _L	W _p	PI		(kPa)	(kPa)		(kPa)	(kPa)		(°)	(°)
1	0.0	S8 - C1	2.70	19.3	37	23	14	31.0	31.0	28	12.0	11	28.7	28.7	26.3
	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	4.5	S8 - C2	5.20	19.1	37	24	13	50.0	50.0	46	42.0	39	27.4	27.4	25.1
	6.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	6.5	S8 - C3	7.30	18.5	53	31	22	45.0	45.0	41	24.0	22	26.1	26.1	24.0
	11.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	11.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	15.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	17.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La falda è stata rinvenuta ad una profondità di circa -4.0 m dal p.c.

I livelli incoerenti costituiti generalmente da ghiaie in matrice limosa e sabbiosa, che si incontrano ad una decina di metri di profondità, non sembrano sempre molto addensati ma si alternano livelli con Nspt anche molto bassi.

Sondaggio S8 Prove Nspt

NSPT IN FORO					
STRATO (m)	H _{Nspt} (m)	N _{spt}	N _{spt}	φ' m φ' k	
		Nominale	MEDIO	(°)	
1	0.0	-	-	-	-
	4.5	-	-	-	-
2	4.5	-	-	-	-
	6.5	-	-	-	-
3	6.5	-	-	-	-
	11.3	-	-	-	-
4	11.3	13.2	54	54.0	41.5 38.1
	15.0	-	-	-	-
5	15.0	-	-	-	-
	15.8	-	-	-	-
6	15.8	17.7	3	3.0	21.7 19.9
	17.9	-	-	-	-
7	17.9	19.0	41	41.0	38.7 35.5
	20.0	-	-	-	-

6. VERIFICHE DI STABILITA'

Per le verifiche di stabilità dei rilevati è stata utilizzata una procedura di calcolo automatico MACSTARSW della Maccaferri.

Il programma consente la verifica della stabilità con opere di sostegno quali gabbioni, terre rinforzate, geogriglie, cioè con strutture atte al contenimento o alla stabilizzazione di scarpate, mediante la presenza di elementi di rinforzo capaci di assorbire sforzi di trazione.

Peraltro è possibile eseguire verifiche di stabilità in assenza di rinforzi od opere di sostegno secondo i metodi classici dell'equilibrio limite.

Il programma utilizzato è concepito in modo esplicito per l'analisi dell'equilibrio rotazionale di rilevati multistrati.

Possono essere considerati numerosi strati, sia sotto, sia all'intorno dello stesso rilevato, si possono scegliere diverse condizioni di drenaggio e filtrazione delle acque. Si può tenere conto anche del contributo alla stabilità del rilevato d'eventuali geotessili.

Il programma consente inoltre il calcolo dell'accelerazione critica allo scorrimento intesa come quel valore di accelerazione pseudo-statica che rende instabile i pendii naturali e le opere di sostegno assimilabili ad un blocco rigido.

Il programma permette l'input sismico ed è conforme al DM 01/14/2008, secondo il DA1, combinazione 2.

MACSTARS W consente le seguenti tipologie di verifica:

- verifica di stabilità globale
- verifica di stabilità interna per le opere in terra rinforzata.
- verifica di scorrimento interno per le strutture in gabbioni (verifica di scorrimento tra un corso di gabbioni e quello soprastante)
- verifica dell'opera come muro di sostegno
- verifica di scorrimento
- verifica dei cedimenti
- verifica di stabilità superficie assegnata (stabilità globale)

Sono state eseguite numerose verifiche di stabilità dei rilevati a breve e lungo termine con o senza la presenza del sisma, con o senza l'uso delle geogriglie.

Assegnando ai terreni sotto il rilevato i parametri geotecnici che contraddistinguono i vari strati presenti, viste le modeste caratteristiche geotecniche degli stessi, soprattutto per gli strati più superficiali si evidenzia che la superficie critica, ovvero la superficie capace di compromettere completamente la stabilità dell'opera, è spesso individuabile nei rilevati con altezze superiori ai 3.0/3.5 metri.

Nelle pagine seguenti si riporta la sintesi dei calcoli sviluppati nelle aree dove sono previsti i rilevati maggiori (per i dettagli si veda l'allegato C da pag.1 a pag.324).

ZONA 2 – CROSTOLO SPONDA SINISTRA

Fino a 5 metri di altezza i rilevati non mostrano problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie: fino ad una altezza di 6 metri sono sufficienti geogriglie con carico di rottura nominale di 200 kN/m, oltre i 6/6.5 m di altezza bisognerebbe ricorrere a rinforzi maggiori di 200 kN/m. In particolare risultano avere una stabilità critica, soprattutto a breve termine, i rilevati fra la progressiva 0+450 e la progressiva 0+525: in ogni caso si consiglia sempre l'uso delle geogriglie R200 dal Km 0+425 al Km 0+550.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i calcoli eseguite nell'area in oggetto:

ALTEZZA (m)	PARAMETRI	TIPO DI VERIFICA	TIPO DI RINFORZO	γ RILEVATO	F
5.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.595
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.141
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.466
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.328
5.5	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.471
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.063
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.267
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.401
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.112
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.684
6.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.363
		A2+M2+Sis	-	1.8	0.994
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.171
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.353
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.102
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.640
7.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.198
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.015
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.189
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.308
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.461
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.546

Poiché i rilevati arrivano ad altezze massime di circa 6.5 metri ci sembra più che sufficiente una geogriglia di 200 kN/m fra la progressiva 0+425 e la prog. 0+550.

ZONA 5 - SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE

Fino a **3** metri di altezza i rilevati non mostrano problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie.

In particolare risultano avere una stabilità critica, soprattutto a breve termine, i rilevati fra la progressiva **1+100 e la progressiva 1+850**: in questo tratto si consiglia l'uso delle geogriglie.

In caso di sima, per rilevati superiori a 4 m di altezza non sembrano sufficienti le geogriglie con resistenza alla rottura di 200 kN/m (R200), ma bisogna ricorrere a rinforzi con resistenze superiori: in particolare fra il km 1+550 e 1+600 si possono utilizzare rinforzi con 400 kN/m.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i calcoli eseguiti nell'area in oggetto:

ALTEZZA (m)	PARAMETRI	TIPO DI VERIFICA	TIPO DI RINFORZO	γ RILEVATO	F
3	NON DREN	A2+M2+R2	-	1.8	1.651
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.063
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.455
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	2.147
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.461
		A2+M2+Sis	R200	1.8	2.889
4	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.262
		A2+M2+Sis	-	1.8	0.868
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.122
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.677
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.229
		A2+M2+Sis	R200	1.8	2.182
5	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.058
		A2+M2+Sis	R200	1.8	0.893
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.144
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.382
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.743
		A2+M2+Sis	R400	1.8	2.297

ZONA 6 – CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI

Fino a **3.5** metri di altezza i rilevati non mostrano particolari problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie. In particolare, per i rilevati di altezza fra i **3.5** m e i **5.5** m che sono compresi dal Km 3+050 al Km 3+175 e dal km 3+675 al km 3+750, si consiglia l'uso delle geogriglie tipo R200 (200 kN/m).

Per i rilevati di altezza compresa fra i 5.5 e gli 7.0 m, che vanno dal Km 3+175 al km 3+275 e dal km 3+600 al km 3+675, l'uso di un solo strato di geogriglia R200 risulta

insufficiente per cui si consiglia l'uso di un rinforzo con resistenza R= 400 kN/m. Infine per rilevati con h > 7 m che sono concentrati fra il km 3+275 e 3+369 e fra il Km 3+476 e il Km 3+600 viene consigliato l'uso di rinforzi con resistenza alla rottura maggiore o uguale a 600 kN/m.

In alternativa si possono utilizzare strati R200 o R400 sovrapposti o altre tecniche che possano ridurre i carichi sul terreno (rilevati alleggeriti).

Nella tabella sottostante vengono riassunti i calcoli eseguiti nell'area in oggetto:

ALTEZZA (m)	PARAMETRI	TIPO DI VERIFICA	TIPO DI RINFORZO	γ RILEVATO	F
3.5	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.545
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.112
	EFFICAC	A2+M2+R2	-	1.8	2.042
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.489
4.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.370
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.007
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.584
	EFFICAC	A2+M2+R2	-	1.8	1.810
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.363
		A2+M2+Sis	R200	1.8	2.298
5.5	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.106
		A2+M2+Sis	-	1.8	0.852
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.116
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.514
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.201
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.698
6.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.055
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.061
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.345
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.452
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.589
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.934
7.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	0.964
		A2+M2+Sis	R200	1.8	0.937
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.133
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.350
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.418
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.594
8.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	0.897
		A2+M2+Sis	R400	1.8	0.985
		A2+M2+Sis	R600	1.8	1.115
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.271
		A2+M2+Sis	R400	1.8	1.623
		A2+M2+Sis	R600	1.8	1.686

ZONA 10 – PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO

Fino a 4.0 metri di altezza i rilevati non mostrano problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie.

In particolare risultano avere problemi di stabilità, soprattutto a breve termine, i rilevati fra il Km 4+975 e il Km 5+470.

Nella tavola che segue sono stati sviluppati i calcoli con i tipi di rinforzo più appropriati per raggiungere sempre (anche nel caso di sisma e in condizioni a breve termine) un grado di stabilità sufficiente.

Fino ad altezze di 4 m non sono necessari i rinforzi, per altezze comprese fra 4 e 5 m (dal km 4+975 a 5+125 e dal km 5+425 a 5+470) sono sufficienti rinforzi di tipo R200 (200 kN/m), per altezze comprese fra 5 e 6 m (dal km 5+125 a 5+200 e dal km 5+375 a 5+425) sono necessari rinforzi R300 (300 kN/m o maggiori), oltre i 6 m di altezza (dal km 5+200 a 5+375) dovrebbero essere utilizzati rinforzi R500 (o maggiori).

ALTEZZA (m)	PARAMETRI	TIPO DI VERIFICA	TIPO DI RINFORZO	γ RILEVATO	F
4.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.547
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.109
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	2.231
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.728
5.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.305
		A2+M2+Sis	-	1.8	0.927
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.173
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.966
		A2+M2+Sis	-	1.8	1.556
		A2+M2+Sis	R200	1.8	2.155
6.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	1.119
		A2+M2+Sis	R200	1.8	0.986
		A2+M2+Sis	R300	1.8	1.102
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.760
		A2+M2+Sis	R200	1.8	1.837
		A2+M2+Sis	R300	1.8	1.671
7.0	NON DREN.	A2+M2+R2	-	1.8	0.986
		A2+M2+Sis	R300	1.8	0.945
		A2+M2+Sis	R500	1.8	1.158
	EFFICACI	A2+M2+R2	-	1.8	1.608
		A2+M2+Sis	R300	1.8	1.624
		A2+M2+Sis	R500	1.8	1.682

Per il rilevato un coefficiente di sicurezza di 1.1 e quindi in accordo con la normativa vigente (D.M. 14/01/2008), si raggiunge di norma con un angolo d'attrito interno di circa 32° ed una coesione minima di 10 KPa.

Questo valore è tranquillamente ottenuto e superato da materiali costituiti da misti granulari A1-A2-A3 compattati, è invece da verificare in fase costruttiva se si utilizzano viceversa materiali alternativi meno pregiati.

Nel caso che le caratteristiche geotecniche si mantengono su valori più bassi è pos-

sibile comunque ricorrere a nuove geometrie del rilevato (banche intermedie o minore pendenza) oppure ad altre tecnologie costruttive basate sull'impiego di geotessili ecc., capaci di aumentare la resistenza al taglio lungo le superfici di rottura.

I calcoli numerici e la rappresentazione grafica dei calcoli in condizioni a breve termine (normalmente più critiche) e a lungo termine sono negli allegati.

Le conclusioni che si possono trarre dalle analisi di stabilità sui rilevati sono le seguenti:

- 1)) Per i rilevati che mediamente hanno una altezza maggiore di 3.5/4.0 m i terreni che stanno alla base subiscono rotture di tipo rotazionale e il coefficiente di sicurezza è minore di 1.1 (in genere verifiche a breve termine e con sisma); fa eccezione la zona a Ovest del Torrente Crostolo (Zona 2) dove i terreni mostrano caratteristiche meccaniche un po' migliori e la stabilità sembra assicurata fino ad altezze di circa 5 m;
- 2) nelle aree viste nelle pagine precedenti (zone 2, 5, 6 e 10), per raggiungere un grado di stabilità sufficiente bisogna intervenire con l'uso di geotessili con resistenze alla rottura comprese fra 200 kN/ m (R200) e 600 kN/m (R600) od in alternativa con rilevati alleggeriti.

Segue una tabella che riassume i calcoli svolti nelle pagine precedenti con l'uso dei rinforzi e il tipo di rinforzo in funzione della progressiva stradale.

Z	R200	R300	R400	R500	R600
2	da km 0+425 a 0+550	-	-	-	-
5	da km 1+100 a 1+550 da km 1600 a 1+1850	-	da km 1+550 a 1+600	-	-
6	da km 3+050 a 3+175 da km 3+675 a 3+750	-	da km 3+175 a 3+275 da km 3+600 a 3+675	-	da km 3+275 a 3+369 da km 3+476 a 3+600
10	da km 4+975 a 5+125 da km 5+425 a 5+470	da km 5+125 a 5+200 da km 5+375 a 5+425		da km 5+200 a 5+375	

In generale i rilevati verranno realizzati mediante uno scotico superficiale di 0.7 m e localmente con un bonifico di materiale drenante variabile tra i 0.25 e i 0.5 m.

Tale materiale avrà funzione di ripartizione dei carichi e di separazione idraulica del rilevato dal terreno di fondazione.

Per tutti i dettagli sui calcoli di stabilità si veda l'allegato C da pag.1 a pag.460.

7. CALCOLO DEI CEDIMENTI E DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE

Le valutazioni dei cedimenti, indotte dal peso del rilevato, sono state eseguite sia con una vecchia procedura di calcolo della quale si riportano i tabulati in allegato, sia sviluppando il calcolo con un più recente foglio Excel (le tabelle vengono riportate nelle pagine seguenti). Nella vecchia procedura come nei fogli Excel si è seguita la teoria della consolidazione monodimensionale.

Nel programma di calcolo si sono utilizzati due principati tipi di espressioni:

$$(1) \Delta S = (dh \cdot \Delta s_v) \cdot E_m$$

dove Δs_v è la pressione trasmessa dal rilevato, dh lo spessore dello strato considerato ed E_m è il coefficiente di variazione di volume, inverso del modulo edometrico.

$$(2) \Delta S = dh \cdot ((\sigma_v' + \Delta \sigma_v) / (0.435 \cdot Ed)) \cdot \log((\sigma_v' + \Delta \sigma_v) / \sigma_v')$$

dove σ_v' è la pressione verticale efficace, $\Delta \sigma_v$ è la pressione trasmessa dal rilevato ed Ed è il modulo edometrico che è stato ricavato dalle prove di laboratorio in funzione della pressione applicata sullo strato dal sovrastante rilevato.

Anche nel foglio di calcolo si è considerato il cedimento edometrico, che è stato calcolato con la formula (2) sopra riportata che può essere anche scritta come:

$$\Delta H = H_0 \cdot \left[RR \cdot \log \frac{\sigma_p'}{\sigma_{v_0}'} + CR \cdot \log \frac{\sigma_p' + \Delta \sigma_v}{\sigma_{v_0}'} \right]$$

Per la distribuzione della pressione nel suolo di fondazione in funzione della profondità, viene utilizzata la nota equazione di Newmark (Bowles, 1991):

$$q_v = q_0 \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2MN\sqrt{V}}{V + V_1} \cdot \frac{V + 1}{V} + \text{Tan}^{-1} \cdot \left(\frac{2MN\sqrt{V}}{V - V_1} \right) \right]$$

Dove:

$$M = B/z ; \quad N = L/z ; \quad V = M^2 + N^2 + 1 ; \quad V_1 = (MN)^2$$

I dati ricavati dalle prove edometriche sono stati rielaborati in modo statistico come da DM 01/14/2008 (vedi paragrafo 1.5)

I risultati qui raccolti evidenziano che i cedimenti indotti sui terreni, relativi alla zona centrale del rilevato, dove l'abbassamento è maggiore, raggiungono un cedimento massimo, per alcune zone anche di 80/90 centimetri.

Tale cedimento s'intende in corrispondenza dell'altezza massima del rilevato e nella zona centrale dello stesso.

I cedimenti dipendono dell'altezza del rilevato, dalla distanza dall'asse dello stesso e variano a seconda delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei terreni sottostanti; già ai piedi dei rilevati il cedimento è spesso ridotto a pochi centimetri.

Per maggiori dettagli si veda l'allegato C, pag.461 (calcolo dei cedimenti e dei tempi di consolidazione) e le tabelle riportate nelle pagine seguenti.

I valori calcolati tendono comunque ad essere conservativi (sovrastimati) poiché i moduli elastici dei terreni incoerenti, calcolati con le prove di laboratorio sono in genere sensibilmente minori di quelli reali.

I cedimenti, senza accorgimenti particolari, raggiungono un grado di consolidazione del 90% (T₉₀) in tempi molto variabili a seconda dello spessore dello strato argilloso considerato e della sua permeabilità.

ZONA 2 – CROSTOLO SPONDA SINISTRA (H_{max}=7m)

Fino a 6 metri di altezza i rilevati non mostrano problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie.

In particolare risultano avere una stabilità critica, soprattutto a breve termine, i rilevati fra la progressiva 0+450 e la progressiva 0+525: in ogni caso si consiglia l'uso delle geogriglie dal Km 0+425 al Km 0+550.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i calcoli eseguite nell'area in oggetto:

TERRENO		FONDAZIONE		CARICHI	
Prof. Fond.	0.0 m	Lunghezza L	100.0 m	Press iniziale	126 Kn/m ²
Prof. Falda	3.9 m	Larghezza B	43.0 m	Press netta	126 Kn/m ²

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	γ	σ _{v0}	U ₀	σ' _{v0}	OCR	σ' _p	Δσ _v	RR/CR	ΔS1	CED
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(m)	(m)
1.0	0.50	0.50	1.00	19.0	9.5	0.0	9.5	1.0	9.5	126.0	0.0104	0.012	0.012
6.4	3.70	3.70	5.40	19.0	112.1	0.0	112.1	1.4	156.9	125.7	0.1191	0.210	0.222
14.2	10.30	10.30	7.80	19.4	263.4	72.3	191.1	1.2	229.3	121.2	0.1327	0.221	0.443
16.7	15.45	15.45	2.50	19.0	310.9	130.5	180.4	1.0	180.4	113.4	0.0675	0.036	0.479
21.8	19.25	19.25	5.10	19.8	411.9	173.5	238.4	1.3	310.0	106.2	0.1347	0.110	0.589
22.5	22.15	22.15	0.70	19.0	425.2	206.2	219.0	1.0	219.0	100.4	0.0734	0.008	0.597
24.8	23.65	23.65	2.30	19.0	468.9	223.2	245.7	1.0	245.7	97.3	0.0789	0.026	0.623
26.0	25.40	25.40	1.20	19.0	491.7	243.0	248.8	1.0	248.8	93.8	0.0787	0.013	0.636
32.0	29.00	29.00	6.00	19.2	606.9	283.6	323.3	0.7	226.3	86.7	0.1535	0.095	0.731
40.0	36.00	36.00	8.00	20.2	768.5	362.7	405.8	1.4	568.1	74.0	0.1215	0.071	0.802

LEGENDA

H L.S.	Letto dello strato dal piano campagna	OCR	Grado di sovraconsolidamento
H P.F.	Centro dello strato dal piano fondazione	σ'_p	Tensione massima raggiunta dal terreno
H P.C.	Centro dello strato dal piano campagna	$\Delta\sigma_v$	Tensione max indotta dai carichi (Newmark)
Δh	Spessore dello strato	RR	Rapporto di ricomprensione (Terreno sovracons.)
γ	Peso di volume	CR	Rapporto di compressione
σ_v0	Pressione verticale totale del terreno	RR/CR	Rapporto scelto nel calcolo
U_0	Pressione dell'acqua nei pori	ΔS	Cedimento di cons. x ogni singolo strato
σ'_{v0}	Pressione verticale efficace del terreno	CED	Cedimento di consolidamento totale

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	Ed	ΔS	CED	Dren.	Cv	T ₅₀	T ₆₀	T ₇₀	T ₈₀	T ₉₀
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(m)	(m)	S/D	cm ² /s	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)
1.0	0.5	0.50	1.00	30000	0.012	0.012	-	-					
6.4	3.7	3.70	5.40	4590	0.210	0.222	D	9.79E-05	10.8	15.7	22.1	31.0	46.4
14.2	10.3	10.30	7.80	5410	0.221	0.443	D	4.07E-04					
16.7	15.5	15.45	2.00	10000	0.036	0.479	-	-					
21.8	19.3	19.25	5.10	5883	0.110	0.589	D	7.82E-04	0.5	0.8	1.1	1.5	2.2
22.5	22.2	22.15	0.70	10000	0.008	0.597	-	-					
24.8	23.7	23.65	2.30	10000	0.026	0.623	-	-					
26.0	25.4	25.40	1.20	10000	0.013	0.636	-	-					
32.0	29.0	29.00	6.00	6140	0.095	0.731	D	4.73E-04	10.7	15.6	21.9	30.9	46.2
40.0	36.0	36.00	8.00	9081	0.071	0.802	D	9.79E-05					

ZONA 5 - SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE (H_{max}=5m)

Fino a 4 metri di altezza i rilevati non mostrano problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i calcoli eseguiti nell'area in oggetto:

TERRENO	FONDAZIONE	CARICHI
Prof. Fond. 0.0 m	Lunghezza L 100.0 m	Press iniziale 90 Kn/m²
Prof. Falda 2.2 m	Larghezza B 42.5 m	Press netta 90 Kn/m²

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	γ	σ_v0	U_0	σ'_{v0}	OCR	σ'_p	$\Delta\sigma_v$	RR/CR	$\Delta S1$	CED
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(m)	(m)
1.0	0.50	0.50	1.00	19.0	9.5	0.0	9.5	1.0	9.5	90.0	0.0076	0.008	0.008
6.0	3.50	3.50	5.00	19.7	108.0	14.7	93.3	3.5	326.6	89.8	0.1584	0.232	0.240
10.8	8.40	8.40	4.80	18.7	197.8	70.1	127.7	2.1	268.2	87.9	0.1404	0.153	0.393
13.3	12.05	12.05	2.50	19.0	245.3	111.3	134.0	1.0	134.0	84.8	0.0503	0.027	0.420
16.0	14.65	14.65	2.70	20.1	299.5	140.7	158.8	0.6	95.3	81.8	0.1590	0.077	0.497
24.5	20.25	20.25	8.50	19.2	462.7	204.0	258.8	1.1	284.6	74.1	0.1150	0.107	0.604
30.0	27.25	27.25	5.50	17.9	561.2	283.1	278.1	1.3	361.5	64.0	0.0786	0.039	0.643
35.0	32.50	32.50	5.00	19.0	656.2	342.4	313.8	1.0	313.8	56.8	0.1048	0.038	0.681
40.0	37.50	37.50	5.00	19.6	754.2	398.9	355.3	1.0	355.3	50.7	0.1051	0.030	0.711

LEGENDA

H L.S.	Letto dello strato dal piano campagna	OCR	Grado di sovraconsolidamento
H P.F.	Centro dello strato dal piano fondazione	σ'_p	Tensione massima raggiunta dal terreno
H P.C.	Centro dello strato dal piano campagna	$\Delta\sigma_v$	Tensione max indotta dai carichi (Newmark)
Δh	Spessore dello strato	RR	Rapporto di ricomprensione (Terreno sovracons.)
γ	Peso di volume	CR	Rapporto di compressione
σ_v0	Pressione verticale totale del terreno	RR/CR	Rapporto scelto nel calcolo
U_0	Pressione dell'acqua nei pori	ΔS	Cedimento di cons. x ogni singolo strato
σ'_{v0}	Pressione verticale efficace del terreno	CED	Cedimento di consolidamento totale

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	Ed	ΔS	CED	Dren.	Cv	T ₅₀	T ₆₀	T ₇₀	T ₈₀	T ₉₀
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(m)	(m)	S/D	cm ² /s	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)
1.0	0.50	0.50	1.00	30000	0.008	0.008	-	-					
6.0	3.50	3.50	5.00	2658	0.232	0.240	D	0.34E-4	10.4	15.2	21.3	30.0	44.8
10.8	8.40	8.40	4.80	3530	0.153	0.393	D	2.54E-4					
13.3	12.05	12.05	2.50	10000	0.027	0.420	-	-					
16.0	14.65	14.65	2.70	3480	0.077	0.497	-	13.9E-4					
24.5	20.25	20.25	8.50	6653	0.107	0.604	D	3.23E-4	3.5	5.1	7.1	10.1	15.0
30.0	27.25	27.25	5.50	10000	0.039	0.643	-	-					
35.0	32.50	32.50	5.00	8131	0.038	0.681	D	1.19E-4	8.1	11.8	16.6	23.3	34.8
40.0	37.50	37.50	5.00	8882	0.030	0.711	D	2.67E-4					

ZONA 6 – CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI (H_{max}=8m)

Fino a 4.5 metri di altezza i rilevati non mostrano particolari problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata solo con l'uso delle geogriglie e/o con rilevati alleggeriti.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i calcoli eseguiti nell'area in oggetto:

TERRENO	FONDAZIONE	CARICHI
Prof. Fond. 0.0 m	Lunghezza L 100.0 m	Press iniziale 144 Kn/m²
Prof. Falda 2.8 m	Larghezza B 43.0 m	Press netta 144 Kn/m²

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	γ	σ_{v0}	U_0	σ'_{v0}	OCR	σ'_p	$\Delta\sigma_v$	RR/CR	$\Delta S1$	CED
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(m)	(m)
1.0	0.50	0.50	1.00	19.0	9.5	0.0	9.5	1.0	9.5	144.0	0.0118	0.014	0.014
3.8	2.40	2.40	2.80	19.0	62.7	0.0	62.7	3.0	188.1	143.9	0.1062	0.154	0.168
10.0	6.90	6.90	6.20	19.0	180.5	46.3	134.2	2.9	389.1	142.1	0.1291	0.251	0.419
12.9	11.45	11.45	2.90	19.0	235.6	97.7	137.9	2.6	358.4	136.9	0.2609	0.227	0.646
17.1	15.00	15.00	4.20	19.0	315.4	137.9	177.5	0.6	106.5	130.5	0.0236	0.024	0.670
19.1	18.10	18.10	2.00	18.0	351.4	172.9	178.5	1.0	178.5	124.0	0.0695	0.032	0.701
23.7	21.40	21.40	4.60	18.0	434.2	210.2	224.0	1.0	224.0	116.4	0.0261	0.022	0.723
30.5	27.10	27.10	6.80	18.0	556.6	274.6	282.0	1.0	282.0	103.3	0.0886	0.082	0.805
39.5	35.00	35.00	9.00	18.0	718.6	363.9	354.7	1.0	354.7	86.5	0.1014	0.087	0.891

LEGENDA

H L.S.	Letto dello strato dal piano campagna	OCR	Grado di sovraconsolidamento
H P.F.	Centro dello strato dal piano fondazione	σ'_p	Tensione massima raggiunta dal terreno
H P.C.	Centro dello strato dal piano campagna	$\Delta\sigma_v$	Tensione max indotta dai carichi (Newmark)
Δh	Spessore dello strato	RR	Rapporto di ricomprensione (Terreno sovracons.)
γ	Peso di volume	CR	Rapporto di compressione
σ_v0	Pressione verticale totale del terreno	RR/CR	Rapporto scelto nel calcolo
U_0	Pressione dell'acqua nei pori	ΔS	Cedimento di cons. x ogni singolo strato
σ'_{v0}	Pressione verticale efficace del terreno	CED	Cedimento di consolidamento totale

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	Ed	ΔS	CED	Dren.	Cv	T ₅₀	T ₆₀	T ₇₀	T ₈₀	T ₉₀
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(m)	(m)	S/D	cm ² /s	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)
1.0	0.50	0.50	1.00	30000	0.014	0.014	-	-					
3.8	2.40	2.40	2.80	4474	0.154	0.168	D	3.17E-4	6.1	8.9	12.5	17.6	26.4
10.0	6.90	6.90	6.20	4921	0.251	0.419	D	5.43E-4					
12.9	11.45	11.45	2.90	2421	0.227	0.646	D	2.23E-4					
17.1	15.00	15.00	4.20	30000	0.024	0.670	-	-					
19.1	18.10	18.10	2.00	10000	0.032	0.701	-	-					
23.7	21.40	21.40	4.60	30000	0.022	0.723	-	-					
30.5	27.10	27.10	6.80	10000	0.082	0.805	-	-					
39.5	35.00	35.00	9.00	10000	0.087	0.891	-	-					

ZONA 10 – PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO (H_{max}=7m)

Fino a 4.5/5.0 metri di altezza i rilevati non mostrano problemi di stabilità mentre per altezze superiori la stabilità viene assicurata con l'uso delle geogriglie.

In particolare risultano avere problemi di stabilità, soprattutto a breve termine, i rilevati fra il Km 5+075 e il Km 5+450: in questo tratto si consiglia l'uso delle geogriglie.

TERRENO	FONDAZIONE	CARICHI
Prof. Fond. 0.0 m	Lunghezza L 100.0 m	Press iniziale 126 Kn/m²
Prof. Falda 4.0 m	Larghezza B 43.0 m	Press netta 126 Kn/m²

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	γ	σ_v0	U_0	σ'_{v0}	OCR	σ'_p	$\Delta\sigma_v$	RR/CR	$\Delta S1$	CED
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(kN/m ²)	(kN/m ²)	-	(m)	(m)
1.0	0.50	0.50	1.00	18.0	9.0	0.0	9.0	1.0	9.0	126.0	0.0103	0.012	0.012
5.5	3.25	3.25	4.50	19.0	94.5	0.0	94.5	5.2	491.4	125.8	0.0898	0.149	0.161
12.9	9.20	9.20	7.40	19.0	235.1	58.8	176.3	1.4	246.9	122.4	0.1597	0.271	0.431
17.5	15.20	15.20	4.60	18.0	317.9	126.6	191.3	1.0	191.3	113.9	0.0234	0.022	0.453
18.5	18.00	18.00	1.00	18.0	335.9	158.2	177.7	1.0	177.7	108.7	0.0658	0.014	0.467
26.3	22.40	22.40	7.80	18.0	476.3	207.9	268.4	1.0	268.4	99.9	0.0282	0.030	0.497
30.0	28.15	28.15	3.70	19.0	546.6	272.9	273.7	1.2	328.4	88.3	0.1132	0.051	0.548
33.0	31.50	31.50	3.00	19.0	603.6	310.8	292.9	1.1	322.1	82.0	0.1129	0.036	0.584
40.0	36.50	36.50	7.00	18.0	729.6	367.3	362.4	1.0	362.4	73.2	0.1001	0.056	0.640

RELAZIONE GEOTECNICA

LEGENDA

H L.S.	Letto dello strato dal piano campagna	OCR	Grado di sovraconsolidamento
H P.F.	Centro dello strato dal piano fondazione	σ'_p	Tensione massima raggiunta dal terreno
H P.C.	Centro dello strato dal piano campagna	$\Delta\sigma_v$	Tensione max indotta dai carichi (Newmark)
Δh	Spessore dello strato	RR	Rapporto di ricomprensione (Terreno sovracons.)
γ	Peso di volume	CR	Rapporto di compressione
$\sigma_v 0$	Pressione verticale totale del terreno	RR/CR	Rapporto scelto nel calcolo
U_0	Pressione dell'acqua nei pori	ΔS	Cedimento di cons. x ogni singolo strato
σ'_{v0}	Pressione verticale efficace del terreno	CED	Cedimento di consolidamento totale

H L.S.	H P.F.	H P.C.	Δh	Ed	ΔS	CED	Dren.	Cv	T ₅₀	T ₆₀	T ₇₀	T ₈₀	T ₉₀
(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(m)	(m)	S/D	cm ² /s	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)	(anni)
1.0	0.50	0.50	1.00	30000	0.012	0.012	-	-					
5.5	3.25	3.25	4.50	5637	0.149	0.161	D	5.00E-04	4.4	6.4	9.0	12.7	19.0
12.9	9.20	9.20	7.40	4300	0.271	0.431	D	5.00E-04					
17.5	15.20	15.20	4.60	30000	0.022	0.453	-	-					
18.5	18.00	18.00	1.00	10000	0.014	0.467	-	-					
26.3	22.40	22.40	7.80	30000	0.030	0.497	-	-					
30.0	28.15	28.15	3.70	7354	0.051	0.548	D	0.0005	1.4	2.0	2.9	4.0	6.0
33.0	31.50	31.50	3.00	7632	0.036	0.584	D	0.0005					
40.0	36.50	36.50	7.00	10000	0.056	0.640	-	-					

Per tutti i dettagli sui calcoli dei cedimenti si veda l'allegato C da pag.461 a pag.507.

8. CONSOLIDAZIONE CON DRENI VERTICALI

Visto il lungo decorso dei cedimenti nel tempo si è preso in considerazione di accelerare i tempi di consolidazione attraverso l'uso dei dreni verticali.

Affinché l'uso degli stessi comporti una sensibile diminuzione dei tempi di consolidazione si dovrebbero adottare le seguenti caratteristiche medie.

Lunghezza dreno = 15 m
 Interasse = 1.5 - 2 m
 Trasmissività = 0.3E-06 mq/sec

La quasi totalità del cedimento (90%) che normalmente si svilupperebbe nell'arco di diversi anni (vedi calcolo dei cedimenti) viene così accelerato in modo da raggiungere il consolidamento nell'arco di pochi mesi.

Durante il calcolo si è tenuto in considerazione una lunghezza dei dreni di 15 metri ed un interasse fra essi variabile fra 1.5 e 2.0 m.

Per di dettagli si veda l'allegato C da pag.508 a pag.517.

ZONA 2 – CROSTOLO SPONDA SINISTRA ($H_{max}=7m$)

Calcolo effettuato sugli strati 2-3 (da -1 a -14.1 m dal p.c.) del corrispondente calcolo dei cedimenti e tempi di consolidamento del paragrafo 1.7

TEMPI DI CONSOLIDAZIONE CON DRENI VERTICALI

Grado di cons	Tempo(mesi) senza dreni	Tempo(mesi) con dreni
5	5.9	0.0
10	11.8	0.9
15	18.4	1.4
20	25.0	1.9
25	35.5	2.4
30	46.0	3.0
35	62.5	3.6
40	78.9	4.3
45	105.2	5.0
50	131.6	5.8
55	157.9	6.7
60	184.2	7.7
65	223.6	8.8
70	263.1	10.1
75	319.0	11.6
80	374.9	13.5
85	467.0	15.9
90	559.1	19.3

Legenda:

CONSOLIDAZIONE DI TERZAGHI
 (Tempi senza dreni)

$$t = (T_v/C_v) * H^2 \text{ dove } T_v = \text{Fatt. temp.}$$

$$H = \text{Spes. Strat.}$$

CONSOLIDAZIONE DI BARRON
 (Tempi con dreni)

$$t = (-\text{LOG}(1 - U) * D_e^2 * F) / (8 * C_h)$$

dove $F = f(D_e, D_r, L, K_h, Q_w, K_r, D_w)$

$C_v = 0.252E-07$ (Coeff di cons vert)
 $C_h = 0.126E-06$ (Coeff di cons oriz)
 $K_v = 0.500E-10$ (Permeabilità vert)
 $K_h = 0.250E-09$ (Permeabilità oriz)
 $L = 15 \text{ m}$ (Drenaggio verticale)
 $D = 2.00 \text{ m}$ (Dist. fra i dreni)

ZONA 5 - SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIPALE ($H_{max}=5m$)

Calcolo effettuato sugli strati 2-3 (da -1 a -10.8 m dal p.c.) del corrispondente calcolo dei cedimenti e tempi di consolidamento del paragrafo 1.7

TEMPI DI CONSOLIDAZIONE CON DRENI VERTICALI

Grado di cons	Tempo(mesi) senza dreni	Tempo(mesi) con dreni
5	5.7	0.0
10	11.4	0.8
15	17.8	1.3
20	24.1	1.7
25	34.3	2.2
30	44.4	2.8
35	60.3	3.3
40	76.1	4.0
45	101.5	4.6
50	126.9	5.4
55	152.3	6.2
60	177.6	7.1
65	215.7	8.1
70	253.8	9.3
75	307.7	10.7
80	361.6	12.5
85	450.5	14.7
90	539.3	17.8

Legenda:

CONSOLIDAZIONE DI TERZAGHI
(Tempi senza dreni)

$$t = (T_v/C_v) * H^2 \text{ dove } T_v = \text{Fatt. temp.} \\ H = \text{Spes. Strat.}$$

CONSOLIDAZIONE DI BARRON
(Tempi con dreni)

$$t = (-\text{LOG}(1 - U) * D_e^2 * F) / (8 * C_h) \\ \text{dove } F = f(D_e, D_r, L, K_h, Q_w, K_r, D_w)$$

$C_v = 0.144E-07$ (Coeff di cons vert)
 $C_h = 0.720E-07$ (Coeff di cons oriz)
 $K_v = 0.440E-10$ (Permeabilità vert)
 $K_h = 0.220E-09$ (Permeabilità oriz)
 $L = 15$ m (Drenaggio verticale)
 $D = 1.50$ m (Dist. fra i dreni)

ZONA 6 – CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI ($H_{max}=8m$)

Calcolo effettuato sugli strati 2-3-4 (da -1 a -12.9 m dal p.c.) del corrispondente calcolo dei cedimenti e tempi di consolidamento del paragrafo 1.7

TEMPI DI CONSOLIDAZIONE CON DRENI VERTICALI

Grado di cons	Tempo(mesi) senza dreni	Tempo(mesi) con dreni
5	3.4	0.0
10	6.7	0.6
15	10.4	0.9
20	14.2	1.3
25	20.2	1.6
30	26.1	2.0
35	35.5	2.5
40	44.8	2.9
45	59.7	3.4
50	74.6	3.9
55	89.6	4.5
60	104.5	5.2
65	126.9	6.0
70	149.3	6.9
75	181.0	7.9
80	212.7	9.2
85	264.9	10.8
90	317.2	13.1

Legenda:

CONSOLIDAZIONE DI TERZAGHI
(Tempi senza dreni)

$$t = (T_v/C_v) * H^2 \text{ dove } T_v = \text{Fatt. temp.} \\ H = \text{Spes. Strat.}$$

CONSOLIDAZIONE DI BARRON
(Tempi con dreni)

$$t = (-\text{LOG}(1 - U) * D_e^2 * F) / (8 * C_h) \\ \text{dove } F = f(D_e, D_r, L, K_h, Q_w, K_r, D_w)$$

$C_v = 0.361E-07$ (Coeff di cons vert)
 $C_h = 0.180E-06$ (Coeff di cons oriz)
 $K_v = 0.114E-09$ (Permeabilità vert)
 $K_h = 0.570E-09$ (Permeabilità oriz)
 $L = 15$ m (Drenaggio verticale)
 $D = 2.00$ m (Dist. fra i dreni)

ZONA 10 – PONTE SUL TORRENTE QUARESIMO ($H_{max}=7m$)

Calcolo effettuato sugli strati 2-3 (da -1 a -12.9 m dal p.c.) del corrispondente calcolo dei cedimenti e tempi di consolidamento del paragrafo 1.7

TEMPI DI CONSOLIDAZIONE CON DRENI VERTICALI

Grado di cons	Tempo(mesi) senza dreni	Tempo(mesi) con dreni
5	2.4	0.0
10	4.8	0.4
15	7.5	0.7
20	10.2	0.9
25	14.5	1.2
30	18.9	1.5
35	25.6	1.8
40	32.3	2.1
45	43.1	2.5
50	53.9	2.9
55	64.7	3.3
60	75.4	3.8
65	91.6	4.3
70	107.8	5.0
75	130.7	5.7
80	153.6	6.7
85	191.3	7.9
90	229.0	9.5

Legenda:

CONSOLIDAZIONE DI TERZAGHI
(Tempi senza dreni)

$$t = (T_v/C_v) * H^2 \text{ dove } T_v = \text{Fatt. temp.}$$

$$H = \text{Spes. Strat.}$$

CONSOLIDAZIONE DI BARRON
(Tempi con dreni)

$$t = (-\text{LOG}(1 - U) * D_e^2 * F) / (8 * C_h)$$

dove $F = f(D_e, D_r, L, K_h, Q_w, K_r, D_w)$

$C_v = 0.500E-07$ (Coeff di cons vert)

$C_h = 0.250E-06$ (Coeff di cons oriz)

$K_v = 0.100E-09$ (Permeabilità vert)

$K_h = 0.500E-09$ (Permeabilità oriz)

$L = 15 \text{ m}$ (Drenaggio verticale)

$D = 2.00 \text{ m}$ (Dist. fra i dreni)

In sintesi si sono ottenuti i seguenti risultati:

ZONA DEL TRACCIATO	STRATI VERIFICATI	MESI SENZA DRENI (90% CONS)	LUNGH. DRENO (m)	INTERASSE (m)	MESI CON DRENI (90% CONS)
2 – CROSTOLO SPONDA SX	2-3	539.3	15	2.0	17.8
5 – SVINCOLO RETE 2 ASSE PRINCIP.	2-3	559.1	15	1.5	19.3
6 – CAVALCAVIA SU VIA FERRARONI	2-3-4	317.2	15	2.0	13.1
10 – PONTE SUL T. QUARESIMO	2-3	229.0	15	2.0	9.5

Concludendo sarebbe opportuno l'uso dei dreni verticali per le seguenti aree:

ZONA	DRENI VERTICALI
2	da km 0+450 a 0+550
5	da km 1+100 a 1+850
6	da km 3+050 a 3+369 - da km 3+476 a 3+750
10	Da km 4+975 a 5+470

9. CALCOLO DELLA PORTANZA DEL PALO SINGOLO

9.1 Formule Utilizzate nel Calcolo dei Pali

La capacità portante di un palo trivellato può essere calcolata usando i parametri meccanici ottenuti dai dati delle prove penetrometriche statiche e/o dalle prove di laboratorio. Negli elaborati (doc.2.3) sono stati adoperati i dati di laboratorio per quanto riguarda gli strati più coesivi, i dati ricavabili dalle prove in sito per quanto riguarda gli strati incoerenti (prove SPT).

Nel seguito verranno descritti i criteri di dimensionamento relativi ai pali di grande diametro facendo riferimento a quanto previsto da: »Raccomandazioni sui pali di fondazione» a cura della commissione A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana), Dicembre 1984.

La capacità portante di un palo si ottiene da due contributi:

$$Q_{tot} = Q_p + Q_l$$

Dove:

Q_p = portanza critica della punta.

Q_l = portanza limite laterale

1) Portanza alla base per terreni non coesivi (ghiaie e sabbie)

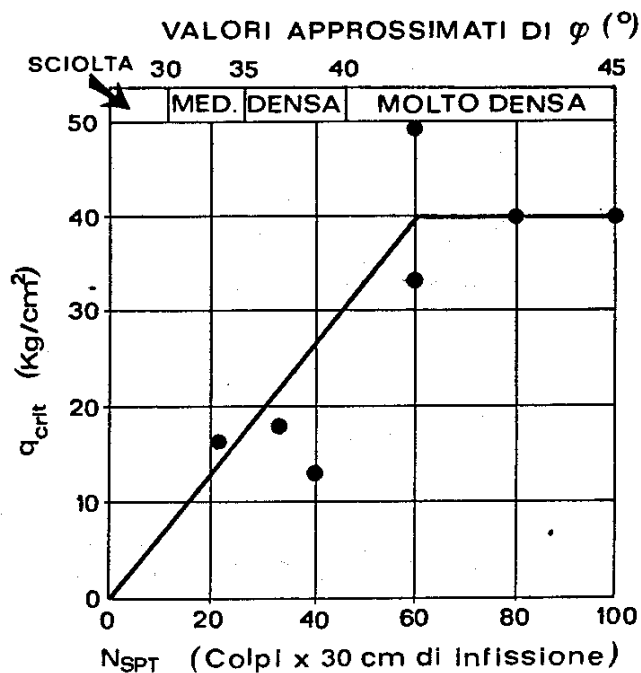
A) Reese e Writh (1977)

$$Q_p = A q_{cr}$$

A = Area di base del palo

$q_{cr} = 67 \cdot N_{SPT}$ (espressa in T/m² e valida per $Q_{cr} < 400$ T/mq)

N_{SPT} = Numero di colpi per piede con lo Standard Penetration Test.



(REESE E WRIGHT, 1977)

B) Berezantzev (1970)

$$Q_p = A \cdot q_{cr}$$

Con:

A = area di base del palo

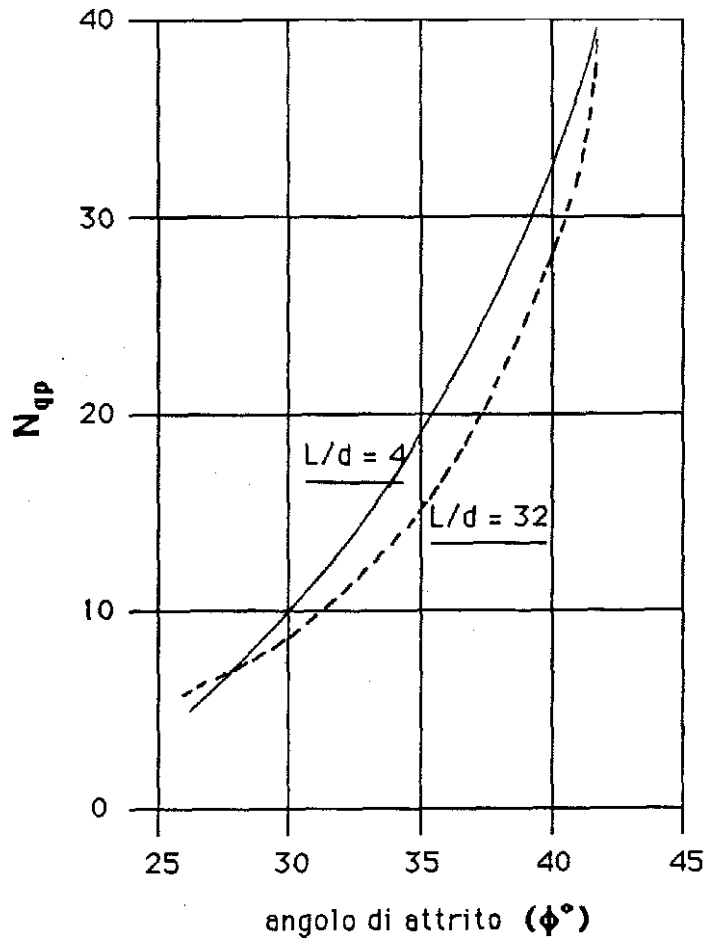
$q_{cr} = N_{qp} \cdot \sigma'_{vo}$

N_{qp} = fattore adimensionale di capacità portante (Berezantzev)

σ'_{vo} = pressione verticale efficace alla base del palo.

La relazione che esplicita il legame fra N_{qp} e l'angolo d'attrito interno (ϕ) del terreno è illustrata nella figura successiva ed è espressa in forma analitica dalla seguente equazione (Berezantzev):

$$N_{qp} = 0.48 e^{[4.97 \cdot \tan(\phi')]}$$



Per la portanza del palo alla punta va sottolineato che essa varia in modo sensibile a seconda del coefficiente adimensionale N_{qp} che è a sua volta molto diverso a seconda degli autori e delle varie teorie.

E quindi consigliabile controllare con attenzione il contributo della portanza alla punta sulla portanza globale.

2) Portanza laterale limite in terreni non coesivi (ghiaie e sabbie)

$$Ql = Al \sum_{i=1}^n [\Delta h_i \cdot \sigma'_{vi} \cdot K \cdot \tan(\delta_i)]$$

Dove:

Al = Area laterale del palo $\cdot \Delta h_i$

Δh_i = altezza del concio i-esimo

σ'_{vi} = tensione verticale efficace sullo strato i-esimo

K = Rapporto fra la pressione orizzontale efficace e quella verticale.

δ_i = angolo di attrito-terra palo nello strato i-esimo ($\delta_i = \phi_i \cdot 0.8$)

ϕ_i = angolo di attrito interno dello strato i-esimo

Per il parametro K viene utilizzata la seguente relazione di Brinch Hansen:

$$K = 1/7 \cdot K_p / [1 - K_o \cdot \tan(\delta_i)]$$

Con:

$K_p = (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi')$

$K_o = (1 - \sin \phi')$

Nota: spesso $K \cdot \tan(\delta_i)$ viene trattato come un parametro unico (vedi A_f in Cestelli Guidi, 6° edizione, 1980), in ogni caso il prodotto fra la pressione orizzontale efficace proporzionale alla litostatica (K) ed il coefficiente che esprime la resistenza tangenziale $\tan(\delta_i)$ è compreso fra 0.16-0.71.

3) Portanza alla base per terreni coesivi (Limi e Argille)

$$Qp = (Cu \cdot N_c + \sigma_{vo}) A$$

Con:

A = area di base del palo

Cu = coesione non drenata

N_c = fattore di capacità portante (=9)

σ_{vo} = pressione verticale efficace alla base del palo.

4) Portanza laterale limite in terreni coesivi (Limi e Argille)

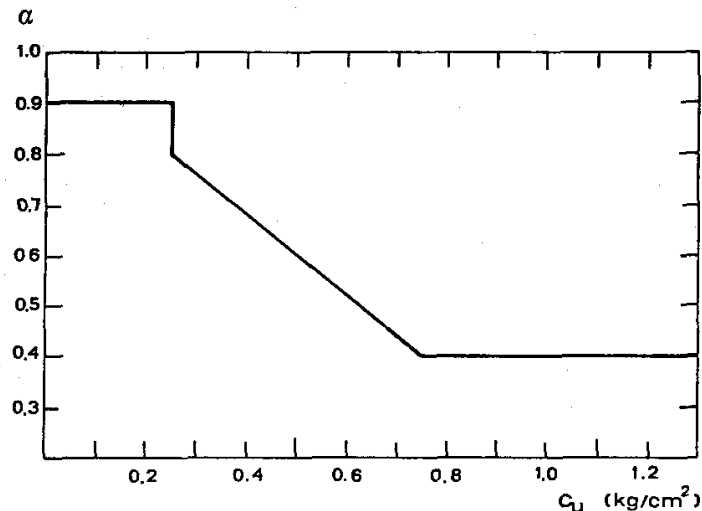
$$Ql = Al \sum_{i=1}^n [\Delta h_i \cdot Cu_i \cdot \alpha]$$

Al = area laterale del palo.

α = coefficiente adimensionale dipendente da Cu ($0.4 \div 0.9$) vedi fig. sotto

Cu_i = coesione non drenata dello strato i -esimo.

Δh_i = altezza del concio i -esimo



Quindi dal punto di vista analitico possiamo scrivere:

$$0.00 < Cu < 0.25 \quad \rightarrow \quad \alpha = 0.9$$

$$0.25 < Cu < 0.75 \quad \rightarrow \quad \alpha = (1 - 0.8 \cdot Cu)$$

$$0.75 < Cu < 1.30 \quad \rightarrow \quad \alpha = 0.4$$

Per la portanza del palo alla punta va sottolineato che essa varia in modo sensibile a seconda del coefficiente adimensionale Nq che è a sua volta molto diverso a seconda degli autori e delle varie teorie. E quindi consigliabile controllare con attenzione il contributo della portanza alla punta sulla portanza globale.

Dallo studio stratigrafico, dai parametri geotecnici ricavati dai sondaggi (prove di laboratorio), dalle prove penetrometriche statiche e tenendo conto dei carichi trasmessi dalle opere d'arte è emersa l'esigenza di calcolare la portanza per diversi valori di r (raggio del palo). I calcoli permettono inoltre di stimare la portanza del palo per una lunghezza variabile dello stesso.

9.2 Formule Utilizzate nel Calcolo dei Monoliti

Per il calcolo della portanza del monolite si sono utilizzate le medesime formule utilizzate nella portanza dei pali con la sola avvertenza di trascurare il contributo di portanza laterale dell'area comune al contatto fra due monoliti.

9.3 Verifiche agli Stati Limite

Analogamente alle fondazioni superficiali, anche per i pali, nelle verifiche agli stati limite ultimi sono ammessi due distinti e alternativi approcci progettuali.

Nel primo approccio progettuale devono essere considerate due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, la prima generalmente riferibile alle verifiche strutturali (STR), la seconda alle verifiche geotecniche (GEO).

Il secondo approccio progettuale prevede un'unica combinazione di gruppi di coefficienti parziali.

Nelle verifiche per il dimensionamento geotecnico (GEO), in tutti gli approcci progettuali la resistenza di progetto dei pali si ottiene dividendo il valore caratteristico della resistenza per un coefficiente, γ_R , diverso in ogni combinazione.

Inoltre, nell'ambito di ciascuna combinazione, i coefficienti γ_R sono diversificati rispetto alle modalità costruttive dei pali e ai contributi di resistenza lungo il fusto e alla base.

3.2.1 Resistenza dei pali soggetti a carichi assiali

Il valore di progetto R_d della resistenza si ottiene a partire dal valore caratteristico R_k applicando i coefficienti parziali γ_R della sottostante (Tab. 6.4.II).

Tabella 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	γ_b	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale (*)	γ_t	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25

(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

La resistenza caratteristica R_k del palo singolo viene dedotta da metodi di calcolo analitici, dove R_k è calcolata a partire dai valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Il valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ (o $R_{t,k}$) è dato dal minore dei valori ottenuti applicando alle resistenze calcolate $R_{c,cal}$ ($R_{t,cal}$) i fattori di correlazione γ_R riportati nella Tab. 6.4.IV, in funzione del numero n di verticali di indagine:

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Per il calcolo della resistenza verticale si utilizza il metodo classico per pali di medio-grande diametro (Berezantzev).

Segue una tabella riassuntiva, del calcolo della resistenza del palo singolo, con-

siderando una sola verticale in corrispondenza del sondaggio considerato, ma considerando entrambi gli approcci progettuale: DA1—COMB 1, 2 e DA2.

Si dovrà prestare attenzione all’Approccio 1 e alla Combinazione 2 (A2+M1+R2) perché è la condizione più conservativa dal punto di vista geologico (GEO). Infine l’approccio 2 (A1+ M1+R3) è di norma quello più utilizzato dagli strutturisti.

Naturalmente la resistenza del palo è funzione della lunghezza e del diametro, che è stato assunto pari a: $\phi=1000$ mm e $\phi=1200$ mm.

Segue una tabella riassuntiva dei calcoli svolti nelle seguenti zone:

- ZONA 1 – Crostolo Sponda DX: Calcolo dei pali e dei diaframmi(monoliti)
- ZONA 6 – Cavalcavia su Via Ferraroni: Calcolo dei pali
- ZONA 9 – Ponte sul T. Modolena: Calcolo dei diaframmi (moniliti)
- ZONA 10 – Ponte sul T. Quaresimo: Calcolo dei diaframmi (moniliti)

TABELLA RIASSUNTIVA CALCOLO																						
		ZONA 1									ZONA 6						ZONA 9			ZONA 10		
		Palo $\phi=1000$			Palo $\phi=1200$			Monolita			Palo $\phi=1000$			Palo $\phi=1200$			Monolita			Monolita		
		DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2	DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2	DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2	DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2	DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2	DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2	DA1 Comb1	DA1 Comb2	DA2
H (m)	L (m)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)	Rdt (kN)
16	15	1343	881	1111	1718	1120	1412	2868	1850	2331	1297	842	1061	1681	1084	1366	2399	1559	1965	6291	3896	4909
17	16	1410	927	1168	1799	1175	1481	2992	1934	2437	1075	717	903	1350	895	1128	2514	1637	2063	6758	4197	5287
18	17	1477	972	1226	1880	1231	1551	3116	2018	2543	1130	754	950	1416	940	1185	2629	1715	2162	7238	4505	5676
19	18	1934	1251	1577	2516	1616	2037	4316	2742	3455	1184	791	997	1483	985	1242	2744	1793	2260	7728	4822	6075
20	19	2071	1343	1692	2689	1731	2181	4599	2927	3688	1641	1067	1345	2122	1371	1727	7468	4600	5795	8207	5132	6466
21	20	2213	1437	1811	2868	1849	2330	4890	3117	3927	1752	1141	1438	2261	1463	1843	7980	4931	6212	8695	5450	6867
22	21	2186	1432	1805	2802	1824	2298	4694	3022	3808	1866	1217	1534	2405	1558	1963	8504	5270	6640	9195	5775	7276
23	22	2302	1511	1905	2942	1919	2419	4905	3166	3990	1984	1295	1632	2554	1656	2087	9039	5617	7077	9704	6107	7695
24	23	2417	1591	2005	3082	2015	2540	5116	3310	4172	2105	1376	1734	2706	1757	2214	9585	5972	7524	10225	6447	8123
25	24	2533	1670	2105	3222	2111	2661	5327	3454	4353	2230	1459	1839	2863	1861	2345	-	-	-	10781	6808	8578
26	25	2648	1749	2205	3362	2207	2781	5539	3599	4535	2359	1545	1947	3024	1968	2480	-	-	-	11348	7177	9044
27	26	3112	2035	2565	3998	2597	3273	6721	4318	5441	2491	1633	2058	3189	2078	2618	-	-	-	7550	4966	6259
28	27	2597	1739	2192	3240	2159	2722	5181	3424	4315	2626	1724	2173	3359	2190	2761	-	-	-	7785	5127	6462
29	28	2667	1786	2252	3325	2217	2795	5310	3512	4426	2766	1817	2290	3533	2306	2906	-	-	-	8020	5287	6664
30	29	2736	1834	2312	3410	2275	2867	5440	3599	4537	2350	1578	1989	2921	1953	2462	-	-	-	8255	5448	6867
31	30	2806	1881	2372	3494	2333	2940	5569	3687	4648	2411	1620	2042	2995	2004	2526	-	-	-	8582	5664	7139
32	31	2876	1929	2432	3579	2390	3013	5698	3775	4759	2473	1662	2095	3070	2055	2590	-	-	-	8826	5831	7350
33	32	3367	2231	2812	4255	2804	3534	6961	4541	5723	2535	1704	2148	3145	2106	2655	-	-	-	9070	5998	7560
34	33	3500	2322	2927	4416	2914	3673	7204	4707	5933	2596	1746	2201	3220	2157	2719	-	-	-	15079	9578	12069
35	34	3633	2414	3043	4578	3025	3812	7446	4873	6142	2658	1788	2254	3295	2208	2783	-	-	-	15727	10006	12608
36	35	3767	2505	3158	4739	3135	3952	7689	5039	6351	2719	1830	2307	3370	2259	2848	-	-	-	16386	10441	13156
37	36	3900	2597	3273	4900	3245	4091	7932	5205	6561	2781	1872	2360	3445	2310	2912	-	-	-	17055	10883	13714
38	37	4033	2688	3389	5061	3356	4230	8174	5371	6770	2842	1914	2413	3520	2361	2976	-	-	-	17735	11332	14280
39	38	4167	2780	3504	5222	3466	4369	8417	5537	6979	2904	1956	2466	3594	2412	3041	-	-	-	18426	11789	14856
40	39	4300	2871	3619	5383	3577	4509	8660	5703	7189	3803	2501	3152	4854	3171	3997	-	-	-	19127	12253	15441
41	40	4433	2963	3735	5544	3687	4648	8903	5869	7398	3985	2623	3306	5079	3322	4187	-	-	-	19838	12724	16035

Per la legenda e i dettagli sui calcoli si veda l’allegato C da pag.518 a pag.550.

10. VERIFICA ALLA PROPENSIONE ALLA LIQUEFAZIONE

I metodi semplificati, per la verifica alla liquefazione si basano su risultati di prove in situ quali le prove penetrometriche statiche, dinamiche o le prove sismiche a rifrazione. Il fattore di sicurezza, F_s nella verifica di resistenza alla liquefazione di un livello di terreno è per definizione il rapporto tra la capacità di resistenza alla liquefazione, espressa in termini di rapporto di resistenza ciclica **CRR** (Cyclic Resistance Ratio), e la domanda di resistenza alla liquefazione, espressa in termini di rapporto di tensione ciclica **CSR**. Si ha dunque:

$$F_s = \frac{CRR}{CSR}$$

Dunque, la stima del fattore di sicurezza F_s passa attraverso la valutazione delle due quantità CSR e CRR.

10.1 Formule Utilizzate nei Calcoli

10.1.1 La resistenza normalizzata CSR

Tutti i metodi di calcolo, indipendentemente dalla prova in situ utilizzata, calcolano CSR con la formula dovuta originariamente a Seed & Idriss (1971) e aggiornata negli anni successivi:

$$CSR_{7,5} = 0,65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \left(\frac{1}{MSF} \right) \left(\frac{1}{K_\sigma} \right)$$

- a_{\max} = accelerazione massima al suolo
- g = accelerazione di gravità = 9,81 m/s
- σ_v = pressione litostatica totale
- σ'_v = pressione litostatica effettiva
- r_d = coefficiente di riduzione della rigidità con l'aumentare della profondità "z"
- MSF = fattore di correzione per la magnitudo del sito in analisi
- K_σ = coefficiente di correzione per la pressione litostatica.

Il Coefficiente r_d

Il coefficiente r_d viene calcolato in modo molto diverso dai diversi studiosi. Alcune formule fra le più note sono:

Seed e Idriss (1971)

$$r_d = 1 - 0,015 z$$

Youd et al. (1996, 1997, 2001) – (Utilizzato dal programma di calcolo)

$$r_d = 1 - 0,00765 \text{ per } z \leq 9,15 \text{ m.}$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267 z \text{ per } 9,15 < z \leq 23 \text{ m.}$$

$$r_d = 0,744 - 0,008 z \text{ per } 23 < z \leq 30 \text{ m.}$$

$$r_d = 0,5 \text{ per } z > 30 \text{ m.}$$

Blake (1996)

$$r_d = \frac{1 - 0,411z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5}}{1 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,00121z^2}$$

Il fattore MSF

Viene invece così stimato dai diversi autori:

Idriss (1997)

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M^{2,56}} \text{ Per } M > 7.5$$

Andrus & Stokoe (1997)

$$MSF = \left(\frac{M}{7,5} \right)^{-3,3} \text{ Per } M \leq 7.5$$

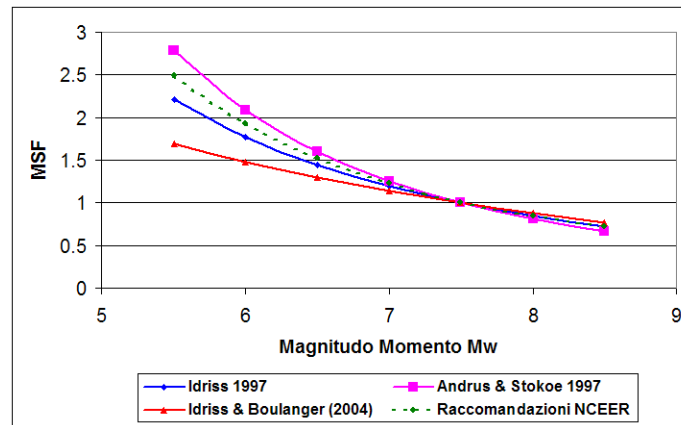
NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research-1997)

$$MSF = \frac{MSF_{Idriss} + MSF_{Andrus \& Stokoe}}{2} \text{ Per } M \leq 7.5$$

EUROCODICE 8

L'Eurocodice 8 per tener conto di terremoti con magnitudo $5.5 < M < 8.0$ utilizza la seguente tabella:

M	MSF
5.5	2.86
6.0	2.20
6.5	1.69
7.0	1.30
8.0	0.67



Il coefficiente K_σ

Il coefficiente K_σ viene così espresso:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1,1$$

Dove il valore di C_σ è funzione del tipo di parametro indice utilizzato e dipende dalla prova geognostica eseguita sul campo:

SPT
$$C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 2,55(N_{1,60,cs})^{0,5}} \leq 0,3$$

CPT
$$C_\sigma = \frac{1}{37,3 - 8,27(q_{c1N,cs})^{0,264}} \leq 0,3$$

Vs
$$C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 3,1[V_{s1}/100]^{1,976}} \leq 0,3$$

Prova SPT (N1,60,cs)

Tutti i metodi semplificati fanno riferimento al parametro indice N,1,60,cs a partire dal valore di N misurato attraverso le:

$$\begin{aligned} N_{60} &= N * CE * CR * CS * CB \\ N_{1,60} &= N_{60} * CN \\ N_{1,60,cs} &= N_{1,60} + CF \end{aligned}$$

- N = numero dei colpi misurato
- CE = correzione per l'energia trasmessa alle aste
- CR = correzione per la lunghezza delle aste
- CS = correzione per il metodo di campionamento
- CB = correzione per il diametro del foro
- CN = N60 normalizzato per la pressione litostatica
- CF = correzione per il contenuto di fini (% passante allo 0,074 mm)

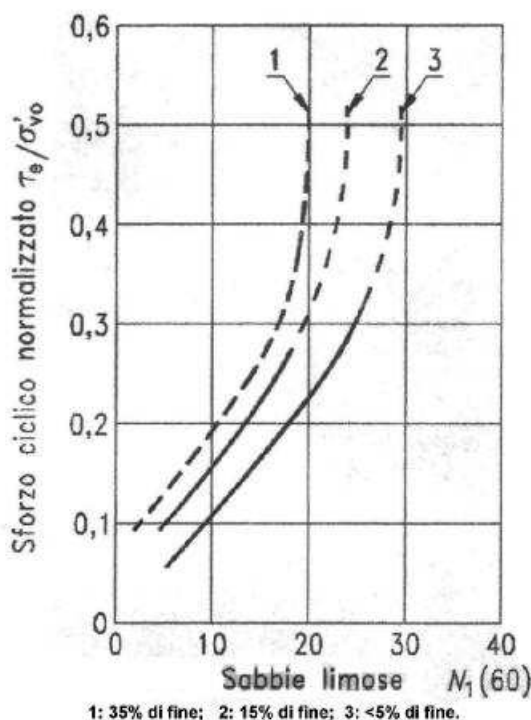
10.1.2 Il Rapporto CRR da NSPT

Diversi metodi sono stati proposti per la valutazione di CRR da SPT:

- Tokimatsu & Yoshimi (1983)
- Seed & Blake (1967)
- Rauch (1998)
- Juang et al. (2000)
- Idriss & Boulanger (2004)
- Eurocodice 8

METODO EUROCODICE 8

La valutazione della capacità di resistenza alla liquefazione (**CRR**) da prove penetrometriche dinamiche viene stimata con la seguente correlazione:



$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_V}} \leq 2.0 \quad \text{: normalizzazione rispetto alla pressione di confinamento;}$$

σ'_V : pressione verticale efficace espressa in $[\text{kg}/\text{cm}^2]$;

C_E : normalizzazione rispetto ad un valore del rapporto di energia ER/60;

$N_{SPT} = 0.75 \cdot N_{SPT}$: riduzione del 25% per profondità minori di 3 m;

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot C_E \cdot N_{SPT}$$

N_{SPT} : numero di colpi della prova penetrometrica standard;

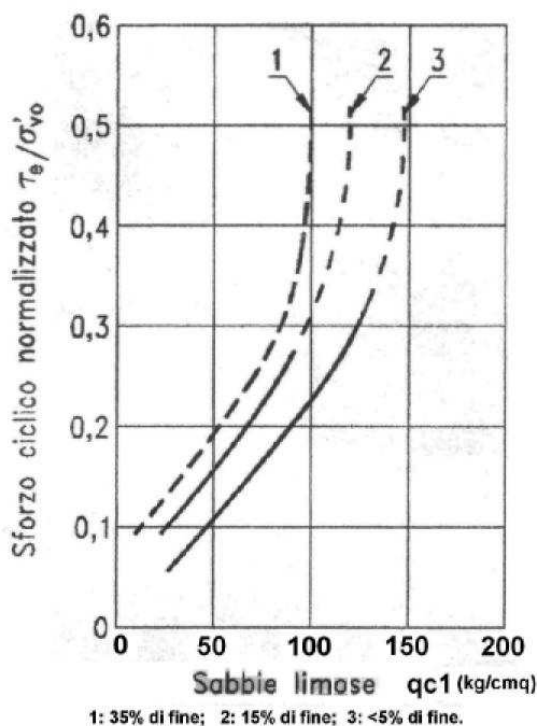
10.1.3 Il Rapporto CRR da CPT

Diversi metodi sono stati proposti per la valutazione di CRR da CPT:

- Robertson & Wride (1997 -1998)
- Mayne & Schneider (1999)
- Ku et al. (2003)
- Idriss & Boulanger (2004)
- Juang, Fang, Khor (2006)
- Juang, Mayne, Chen (2008)
- Eurocodice 8

METODO EUROCODICE 8

La valutazione della capacità di resistenza alla liquefazione (**CRR**) da prove penetrometriche statiche (CPT) viene stimata con la seguente correlazione:



$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_v}} \leq 2.0 \quad \text{: normalizzazione rispetto alla pressione di confinamento;}$$

σ'_v : pressione verticale efficace espressa in $[\text{kg}/\text{cm}^2]$;

$$q_{c1} = C_N \cdot q_c$$

q_c : resistenza alla punta misurata espressa in $[\text{kg}/\text{cm}^2]$;

10.2 Contenuto di Fine (FC%)

Nel calcolo della verifica alla liquefazione ha molta importanza il contenuto di fine del materiale per cui si è pensato di stimarlo, invece che con le usuali prove granulometriche di laboratorio, (che comunque avrebbero fornito solo una informazione puntiforme), dalle prove penetrometriche statiche (CPT).

La teoria utilizzata è quella di Robertson che permette di risalire al contenuto di fine (FC) dal parametro I_c .

Come noto, il metodo di Robertson considera come indicativo della litologia il confronto fra i parametri Q (resistenza alla punta normalizzata) e F (rapporto delle resistenze normalizzate) del terreno indagato. La resistenza alla punta normalizzata Q e il rapporto delle resistenze normalizzate hanno le seguenti espressioni:

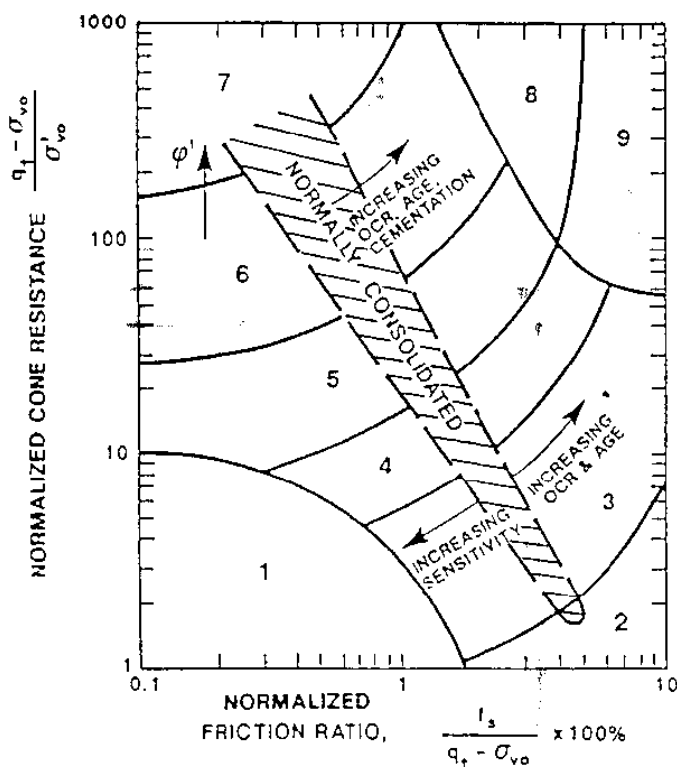
$$Q = \frac{R_p - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$F = 100 \left[\frac{R_l}{R_p - \sigma_{v0}} \right]$$

dove:

- R_p (kg/cmq)= Resistenza alla punta del penetrometro statico
- R_l (kg/cmq)= Resistenza laterale del penetrometro statico
- σ_{v0} (kg/cmq)= Pressione litostatica totale
- σ'_{v0} (kg/cmq)= Pressione litostatica efficace

Il grafico che permette l'identificazione del tipo litologico in funzione di Q e F è il seguente:



Per classificare il terreno Robertson introduce anche il parametro IC (indice del tipo di comportamento del terreno) definito come:

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \text{Log}Q)^2 + (\text{Log}F + 1.22)^2}$$

Zone	Soil Behaviour Type	I_c
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – peats	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

Infine il parametro I_c può essere correlato empiricamente al contenuto di fine del terreno attraverso la relazione:

$$FC\% = 1.75I_c^{3.25} - 3.7$$

10.3 Calcolo dell'Indice del Potenziale di Liquefazione

Un indice rappresentativo del rischio di liquefazione, applicabile ai metodi che prevedono il calcolo del coefficiente di sicurezza F_s , è l'indice del potenziale PL (I.L.) alla propensione alla liquefazione introdotto da Iwasaki et al. (1978).

$$P_L = \int_0^{Z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

$$F(z) = \begin{cases} 1 - F_s(z) & \text{per } F_s \leq 1.0 \\ 0.0 & \text{per } F_s > 1.0 \end{cases}$$

$$w(z) = 10 \cdot 10^{-\left(\frac{z}{Z_{crit}}\right)}$$

$$Z_{crit} = 20 \text{ m}$$

Z_{crit} è la profondità oltre la quale sono da escludersi fenomeni di liquefazione. In base al valore di PL è possibile fornire una indicazione del rischio di liquefazione attraverso la seguente tabella:

Valore P_L	Rischio di Liquefazione
$P_L = 0$	Molto basso
$0 < P_L \leq 5$	Basso
$5 < P_L \leq 15$	Alto
$P_L \geq 15$	Molto alto

10.4 Conclusione sulla Propensione alla Liquefazione

Utilizzando i metodi sopra descritti e le correlazioni introdotte dall'eurocodice 8 si sono sviluppati calcoli di propensione alla liquefazione per le seguenti aree:

- ZONA 2 - Crostolo Sponda Sinistra
- ZONA 5 - Svincolo rete 2
- ZONA 6 - Cavalcavia su via Ferraroni
- ZONA 10 - Ponte sul T. Quaresimo

Si riporta qui l'indice potenziale di liquefazione per le zone sopra descritte, con la nomenclatura I.L. così come riportato nel DAL RER 112/2007:

- ZONA 2 - I.L. = 0.29
- ZONA 5 - I.L. = 0.00
- ZONA 6 - I.L. = 0.00
- ZONA 10 - I.L. = 0.52

L'indice alla propensione alla liquefazione risulta compreso fra 0 e 0.52 quindi il rischio alla liquefazione può essere definito complessivamente da basso a molto basso. Anche se il problema non si può escludere in modo categorico, tutti i calcoli hanno mostrato una scarsa propensione alla liquefazione in quanto gli strati sabbiosi superficiali sono modesti e con un contenuto di fine limitato.

Per tutti i dettagli sui calcoli di stabilità si veda l'allegato C da pag.551 a pag.587.