Approfondimenti sulle analisi di risposta sismica locale
e sul rischio di liquefazione

TECNICHE DI MITIGAZIONE ED ESEMPI DI INTERVENTI PER COSTRUZIONI ORDINARIE

Ing. Alessio Colombi Ph.D.

Colombi Roversi & Associati
Studio di Ingegneria
Ferrara



29 settembre 2026
Auditorium A.Corelli, via A.Belletti 2 – Fusignano (RA)



TECNICHE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

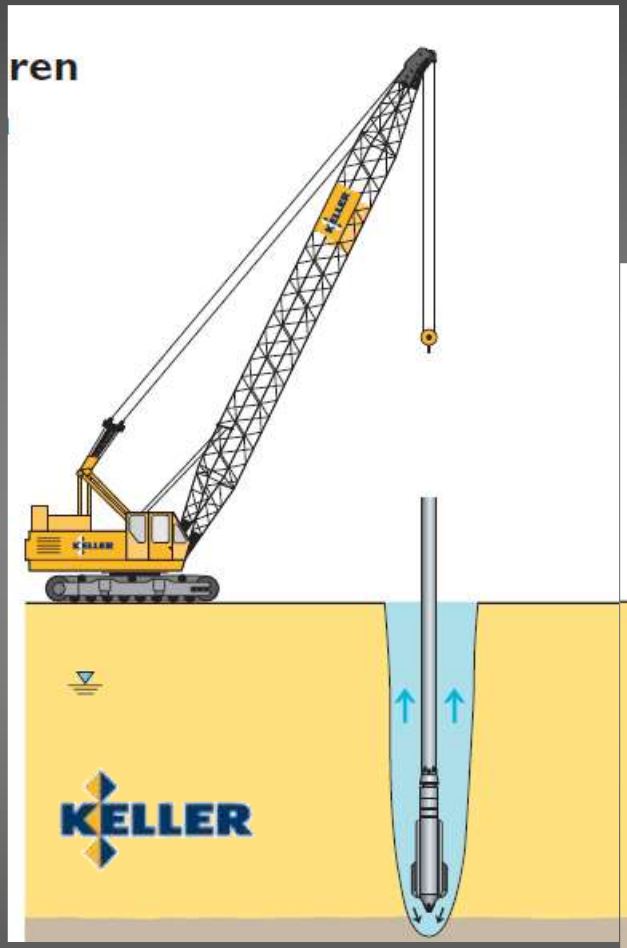


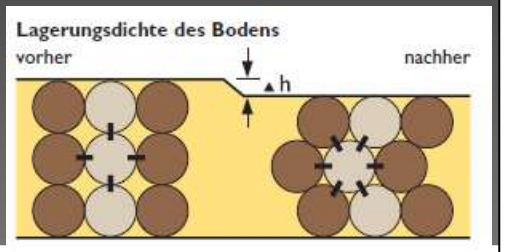
TERRENI LIQUEFACIBILI: PANORAMICA INTRODUTTIVA
INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO

- VIBROFLOTTAZIONE
- COMPATTAZIONE DINAMICA
- PALI INFISSI
- JET-GROUTING
- INIEZIONI CEMENTIZIE
- COMPACTION GROUTING
- DRENAGGI
- COLONNE DI GHIAIA E SABBIA

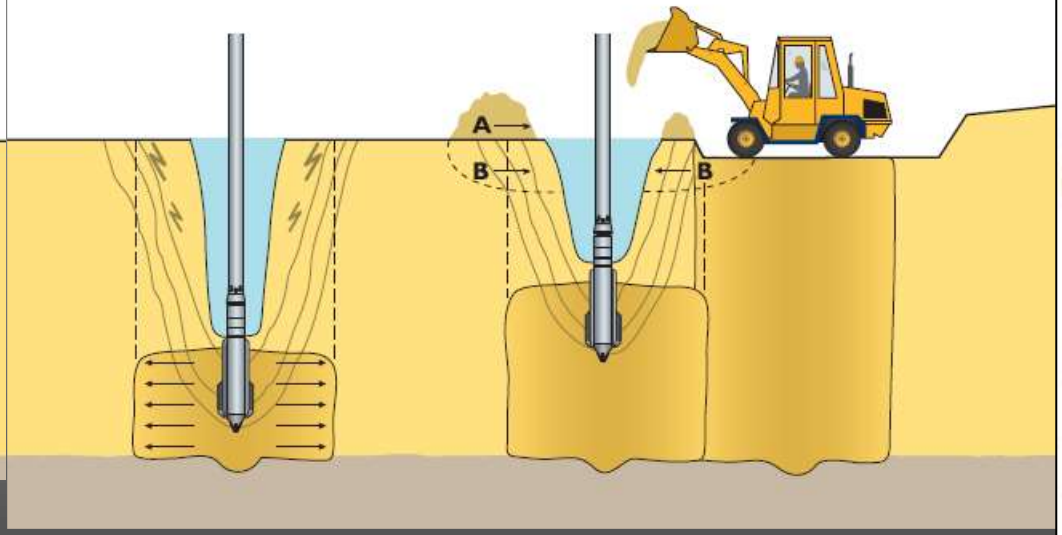
VERIFICHE SUI PARAMETRI GEOTECNICI A FINE TRATTAMENTO

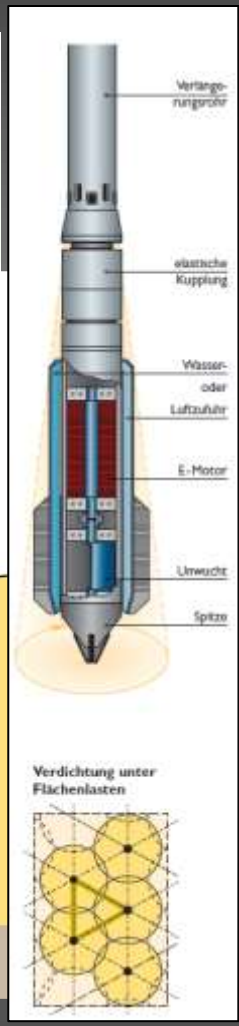
TERRENI LIQUEFACIBILI:
INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO





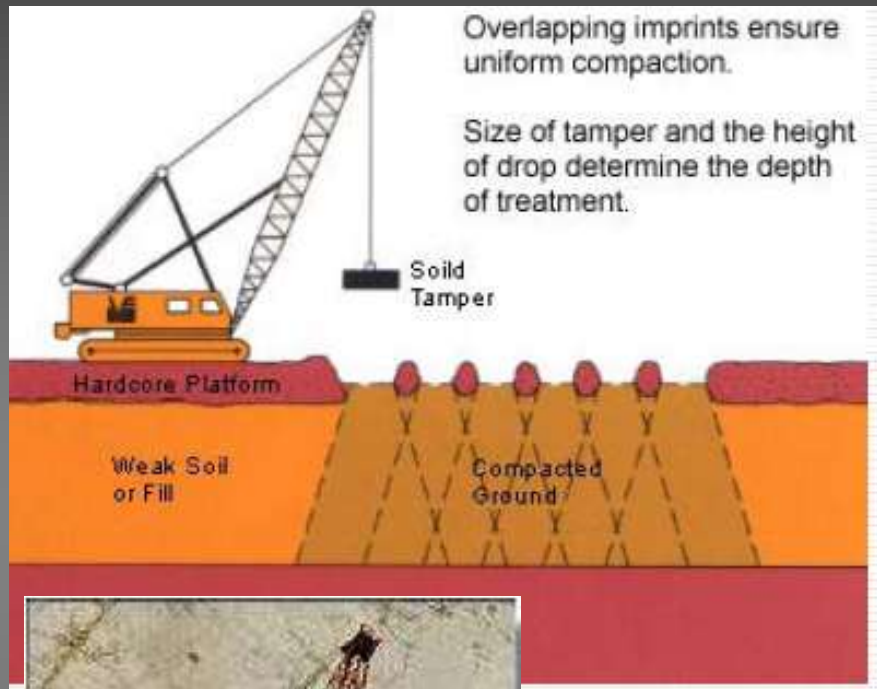
(Fonte Keller)





Vibroflottazione o vibrocompattazione
(colonne di sabbia addensata in terreni a grana grossa)

TERRENI LIQUEFACIBILI: INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO



(da Lai, 2009)

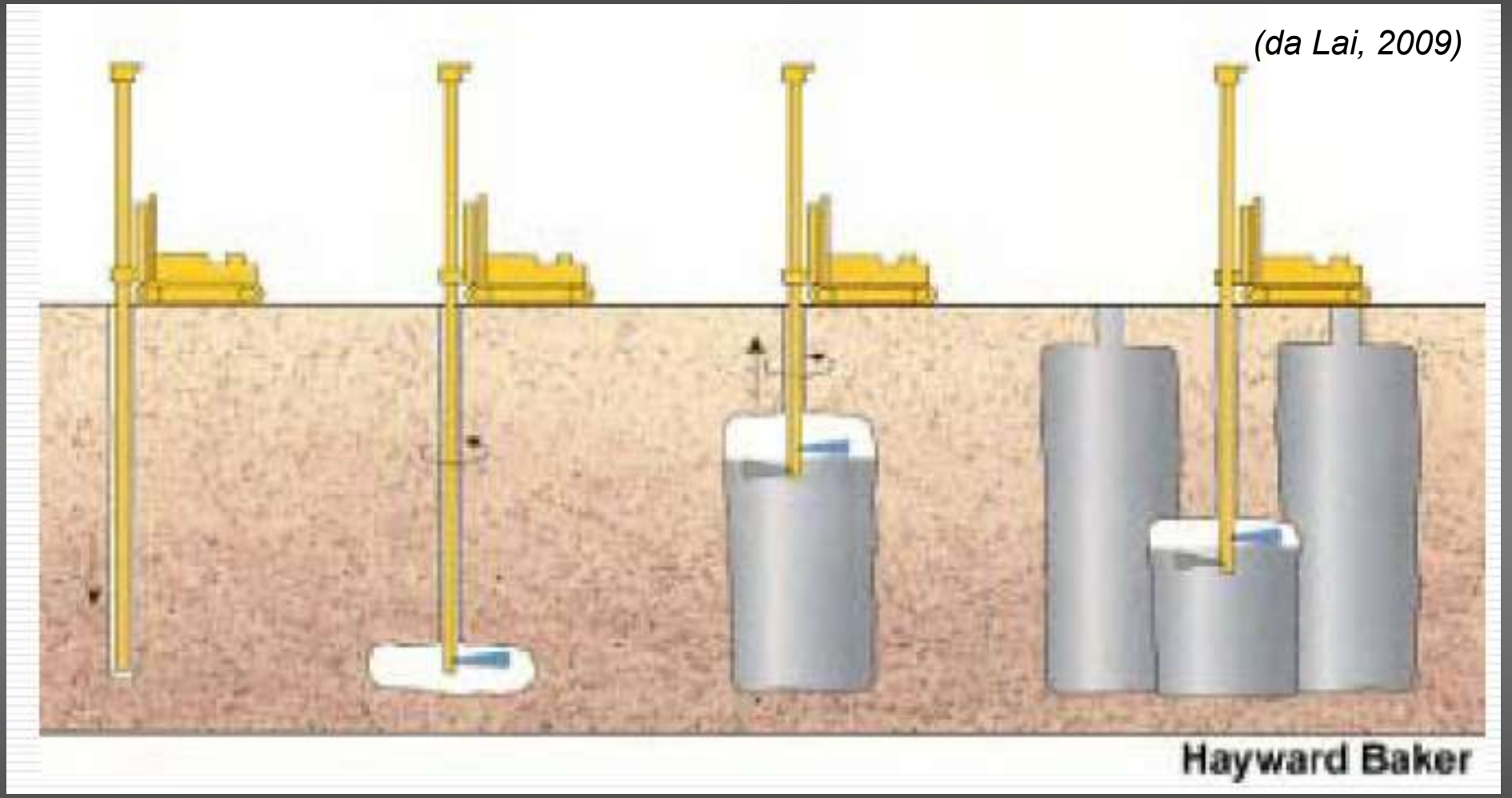


(da *Vibro Group Ltd, 2005*)



Compattazione dinamica (terreni a grana grossa)

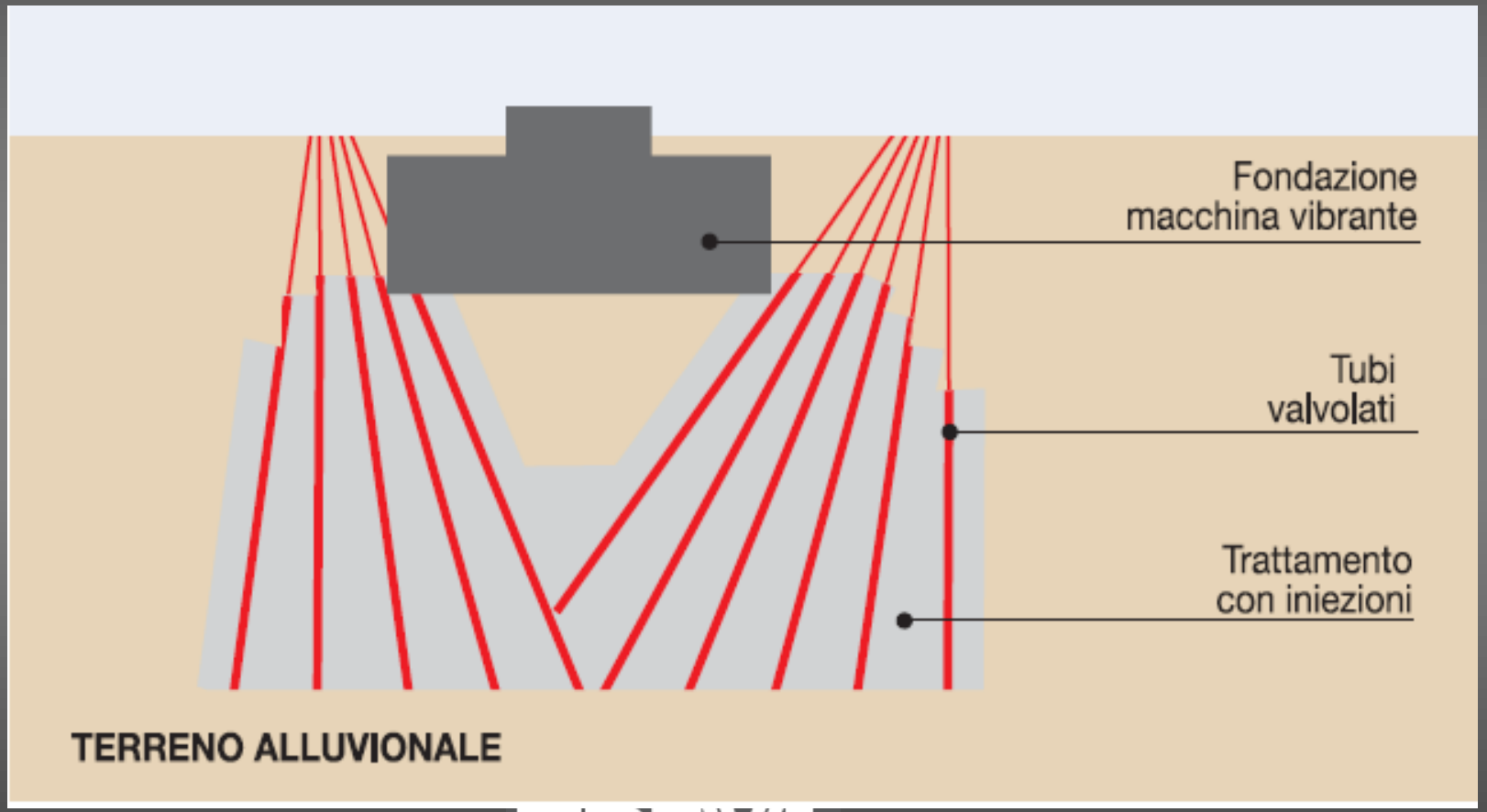
TERRENI LIQUEFACIBILI:
INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO



Jet Grouting

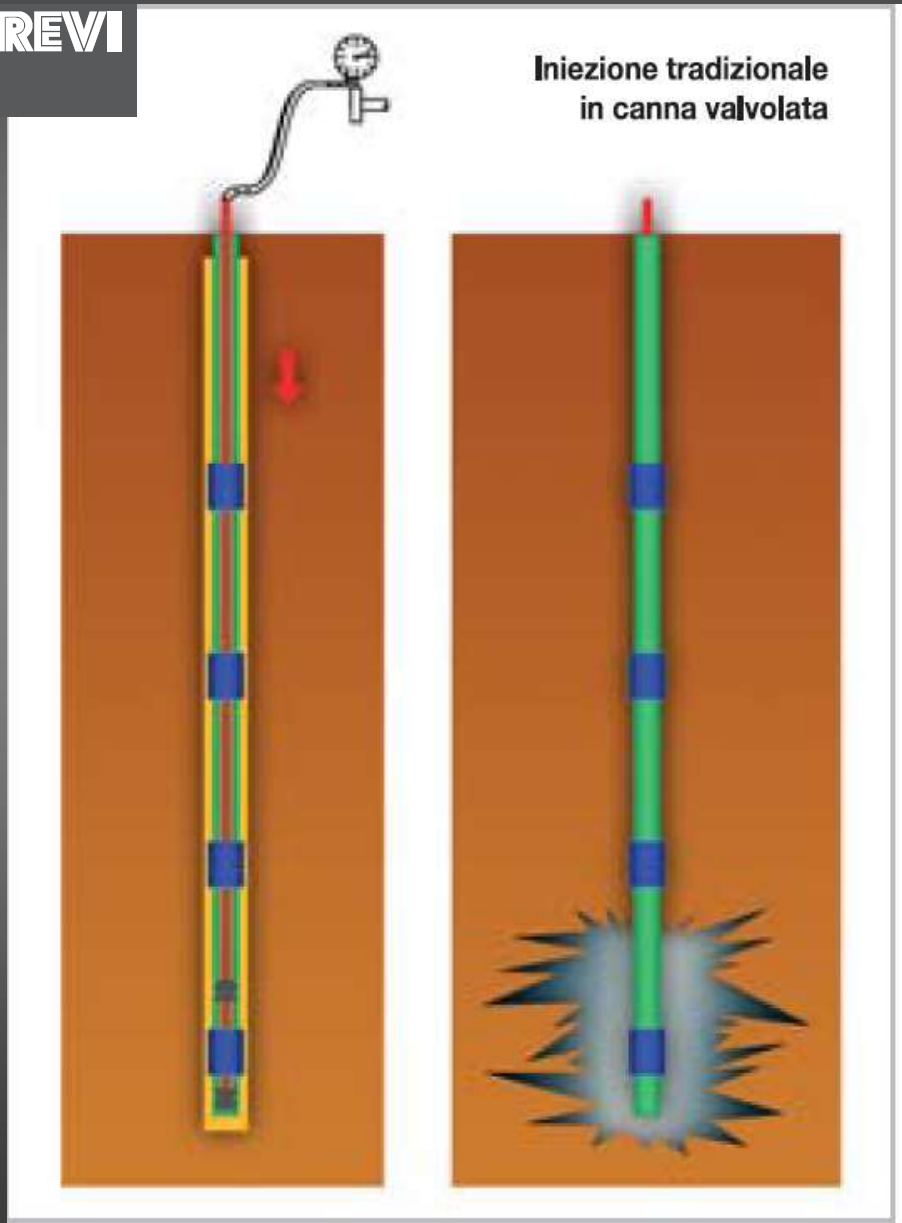
TERRENI LIQUEFACIBILI: INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO

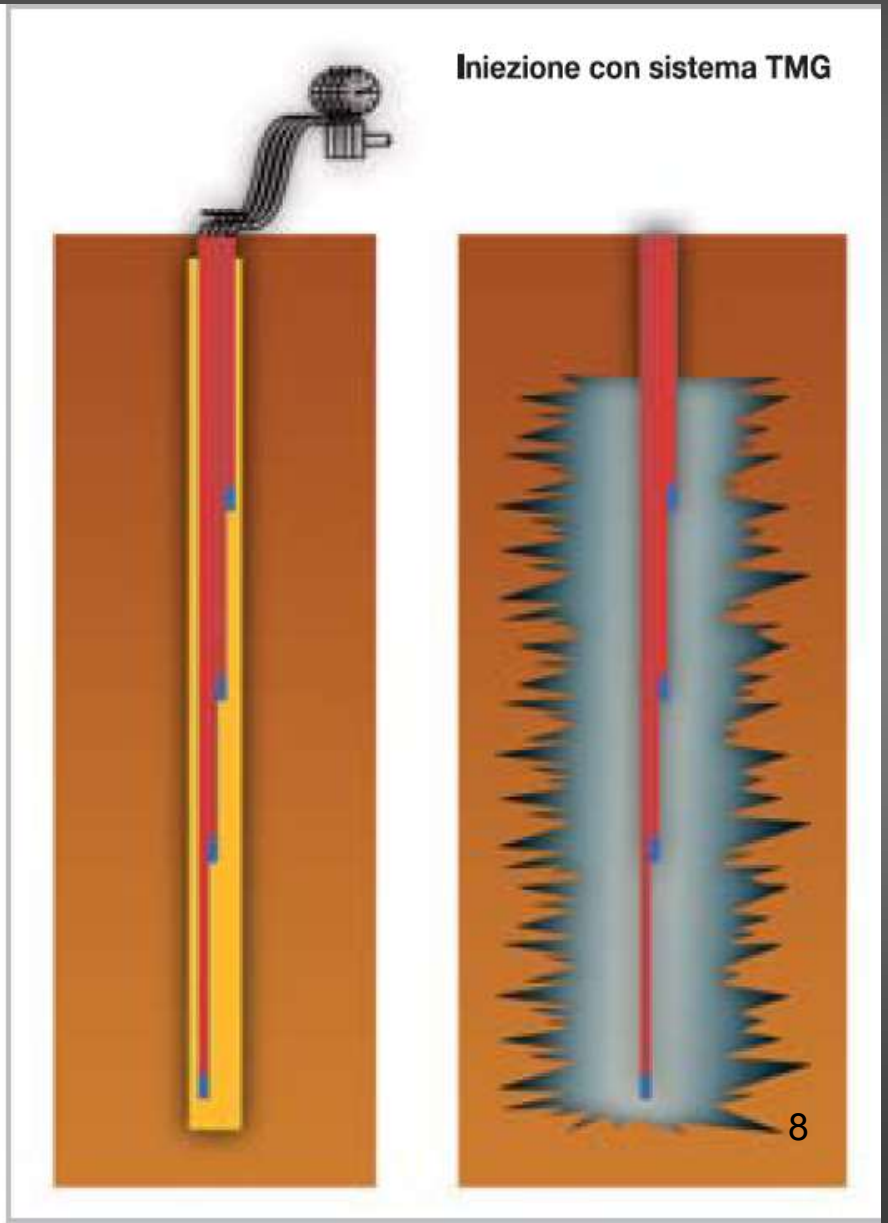
Iniezioni di miscele cementizie



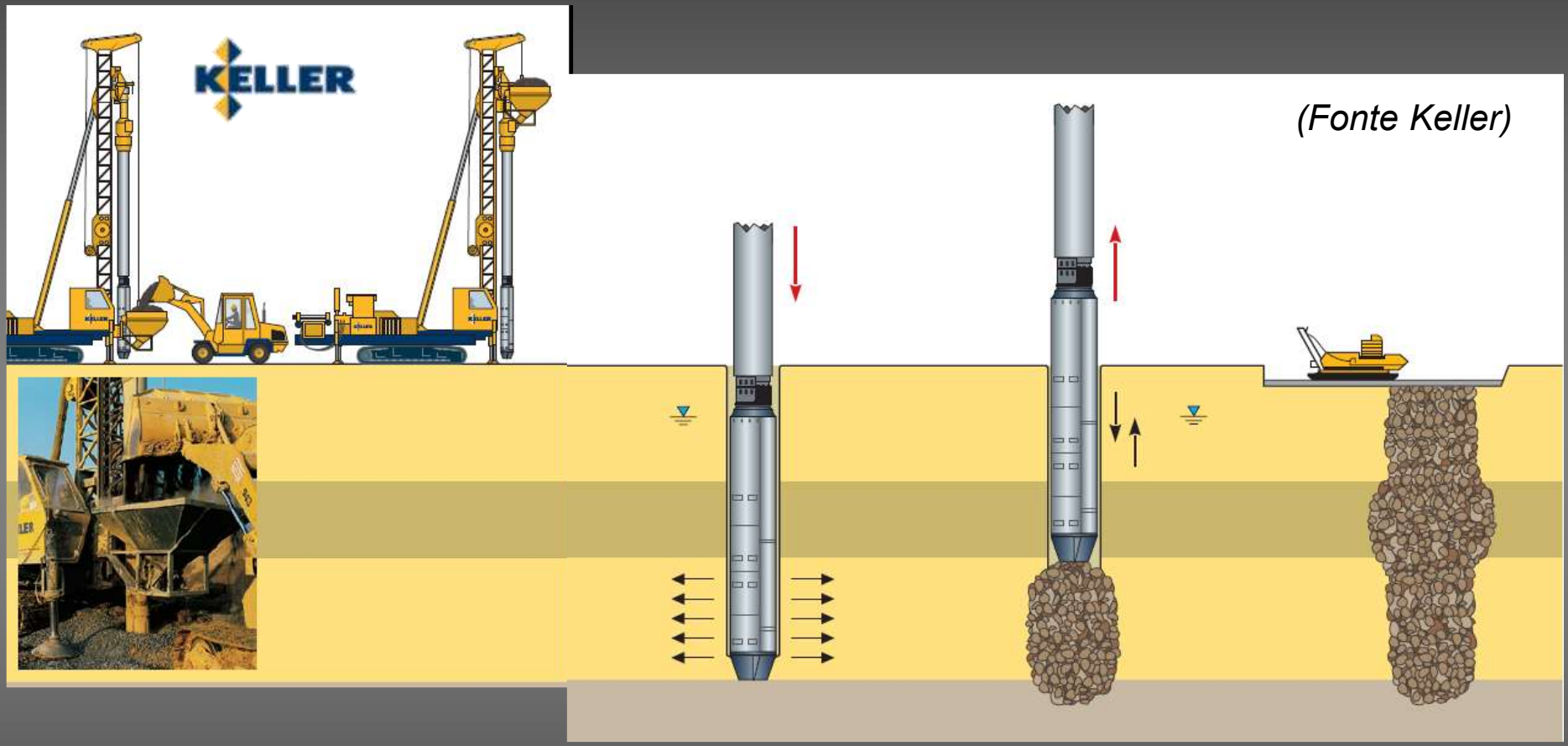
TREVI

TERRENI LIQUEFACIBILI:
INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO





TERRENI LIQUEFACIBILI: INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO



Vibrosostituzione
(colonne in ghiaia, sabbia o
malta cementizia in terreni fini)

DETERMINA REGIONALE RIGUARDANTE I SITI COLPITI DA LIQUEFAZIONE

Atto del Dirigente a firma unica:	DETERMINAZIONE n° 12418 del 02/10/2012
Proposta:	DPG/2012/13201 del 02/10/2012
Struttura proponente:	SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DIREZIONE GENERALE AMBIENTE E DIFESA DEL SUOLO E DELLA COSTA
Oggetto:	APPROVAZIONE DEGLI ELABORATI CARTOGRAFICI CONCERNENTI LA DELIMITAZIONE DELLE AREE NELLE QUALI SI SONO MANIFESTATI GRAVI EFFETTI DI LIQUEFAZIONE A SEGUITO DEGLI EVENTI SISMICI DEL 20 E 29 MAGGIO 2012 E DEGLI INDIRIZZI PER INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI
Autorità emanante:	IL RESPONSABILE - SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI
Firmatario:	RAFFAELE PIGNONE in qualità di Responsabile di servizio

- Definisce le aree dei Comuni di S.Agostino e Mirabello colpite da liquefazione

- Indica gli interventi ammessi per il consolidamento dei terreni

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

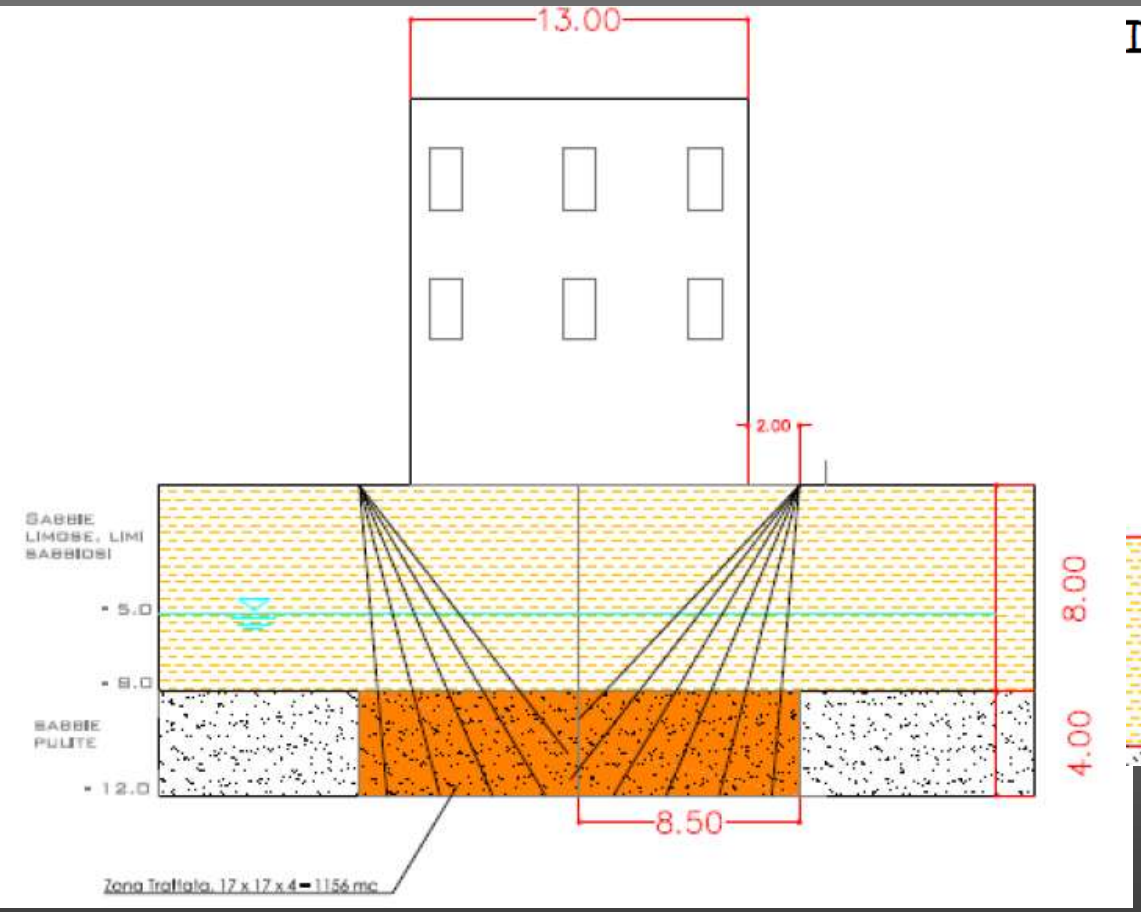
TRATTAMENTI ATTIVI

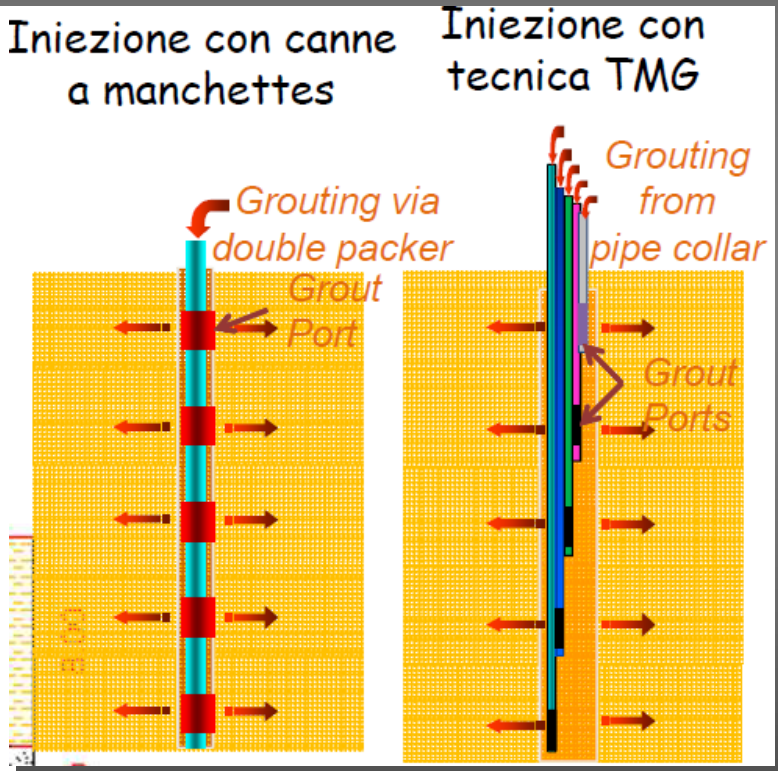
Si definiscono attivi quegli interventi che migliorano le proprietà meccaniche dei terreni mediante azioni dirette quali addensamento o cementazione

Qualunque intervento di miglioramento dovrà incrementare la resistenza ciclica dei materiali trattati di una quantità almeno sufficiente a evitare il ripetersi del fenomeno in caso di un sisma di entità paragonabile a quelli del 20 e 29 Maggio u.s., avere un basso impatto ambientale, risultare il meno invasivo possibile per le aree edificate, interessare superfici limitate,non dovrà alterare (se non localmente in corrispondenza degli edifici) il regime delle acque interstiziali di falda e il loro chimismo, e dovrà avere caratteristiche stabili e permanenti nel tempo, ben certificate. Durante i trattamenti gli edifici dovranno essere monitorati topograficamente per registrare eventuali effetti indotti dagli stessi

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

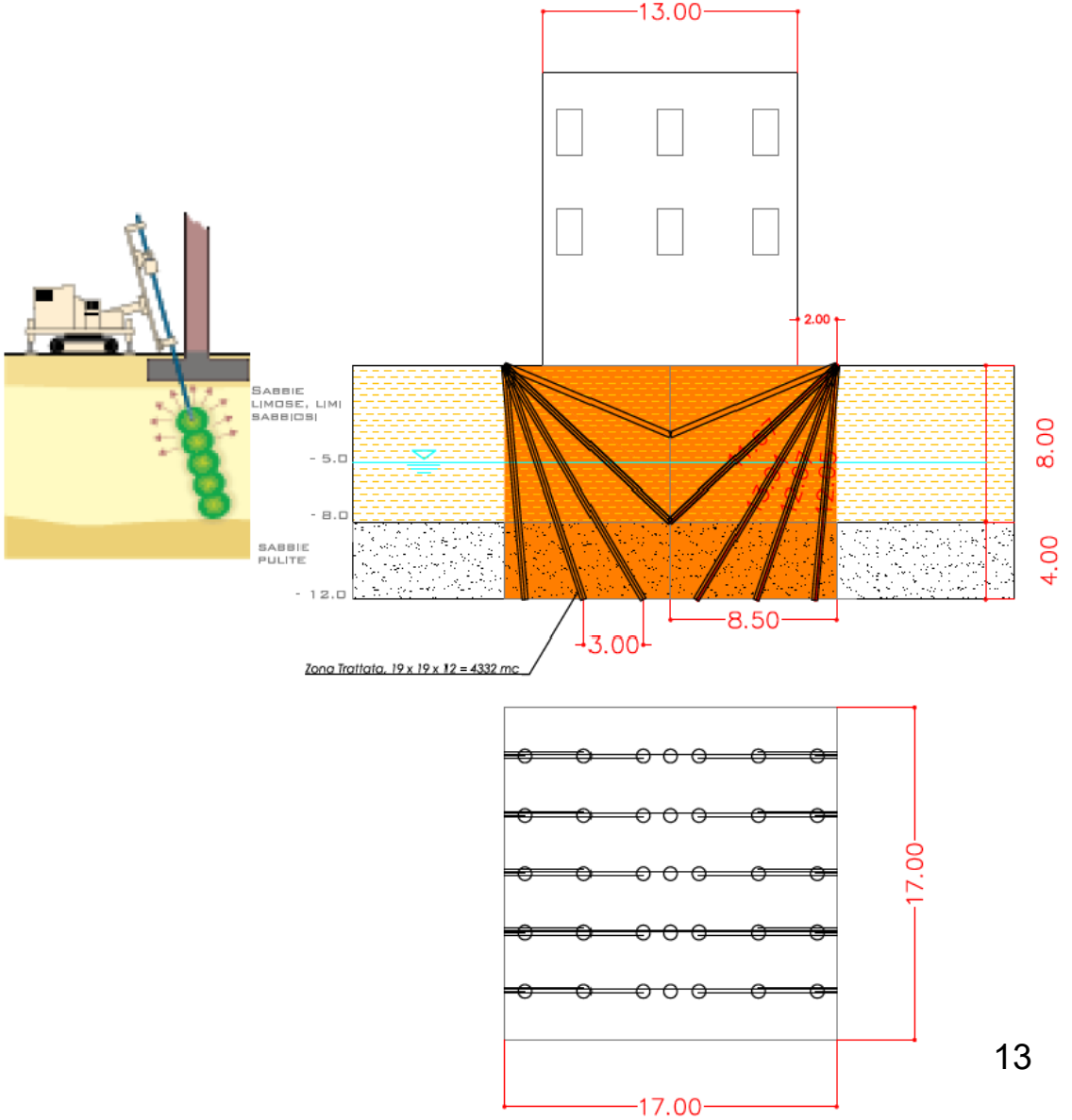
TRATTAMENTI ATTIVI: Iniezioni di permeazione con miscele leganti "permeation grouting"





METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

TRATTAMENTI ATTIVI: Iniezioni di compattazione "compaction grouting"



METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

TRATTAMENTI PASSIVI

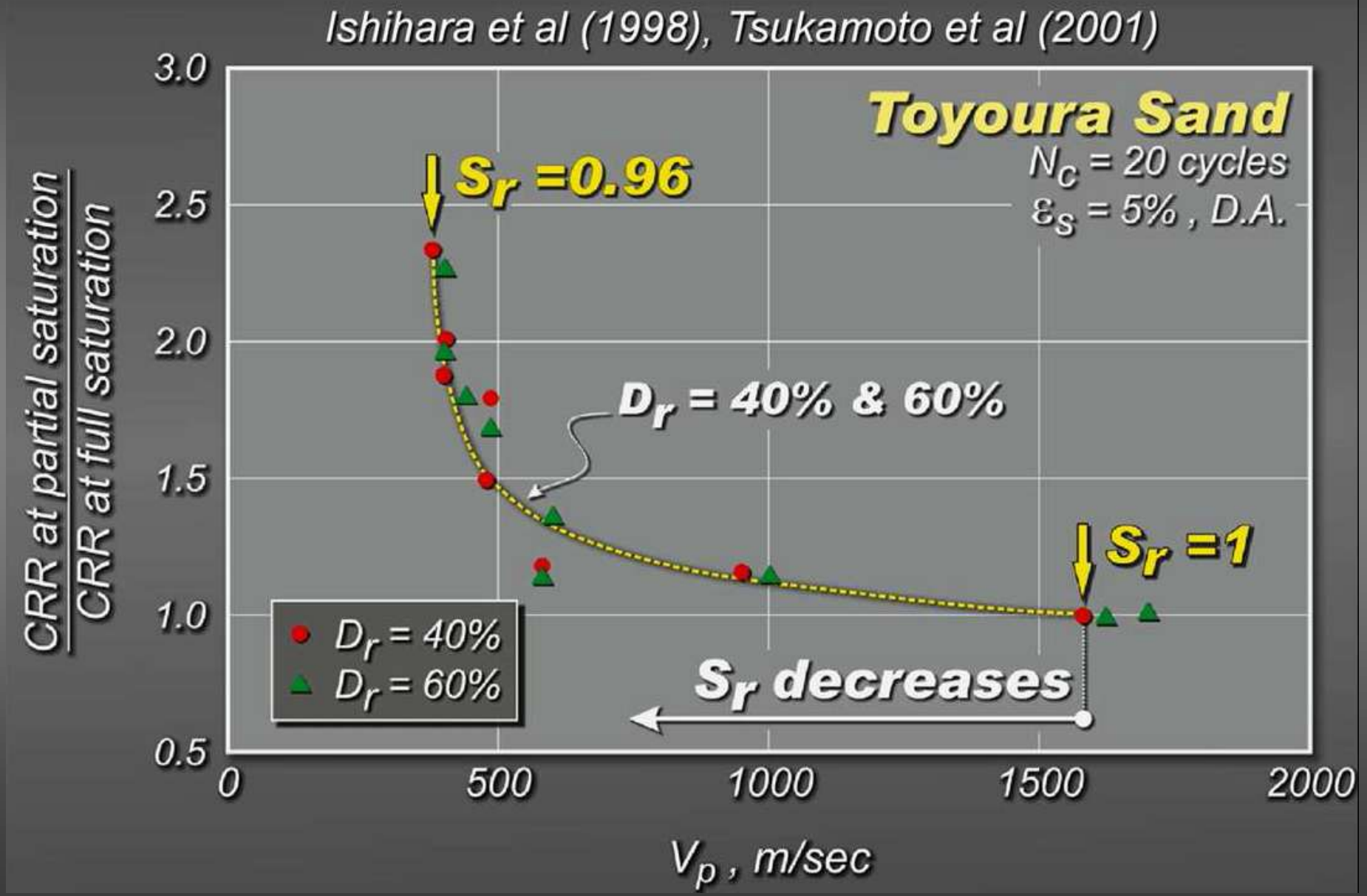
Qualora le metodiche di intervento di tipo "attivo" risultassero eccessivamente onerose, giustificabili solo per particolari edifici, quali quelli pubblici e strategici, ma poco estendibili ad ampie aree, potranno essere presi in considerazione trattamenti di tipo passivo, i quali non alterano le condizioni attuali dei terreni ma intervengono in maniera passiva se il fenomeno dovesse riproporsi, riducendo il generarsi della sovrappressione dell'acqua (IPS) o favorendo la dissipazione (dreni)

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

TRATTAMENTI PASSIVI: Parziale saturazione "Induced Partial Saturation", IPS

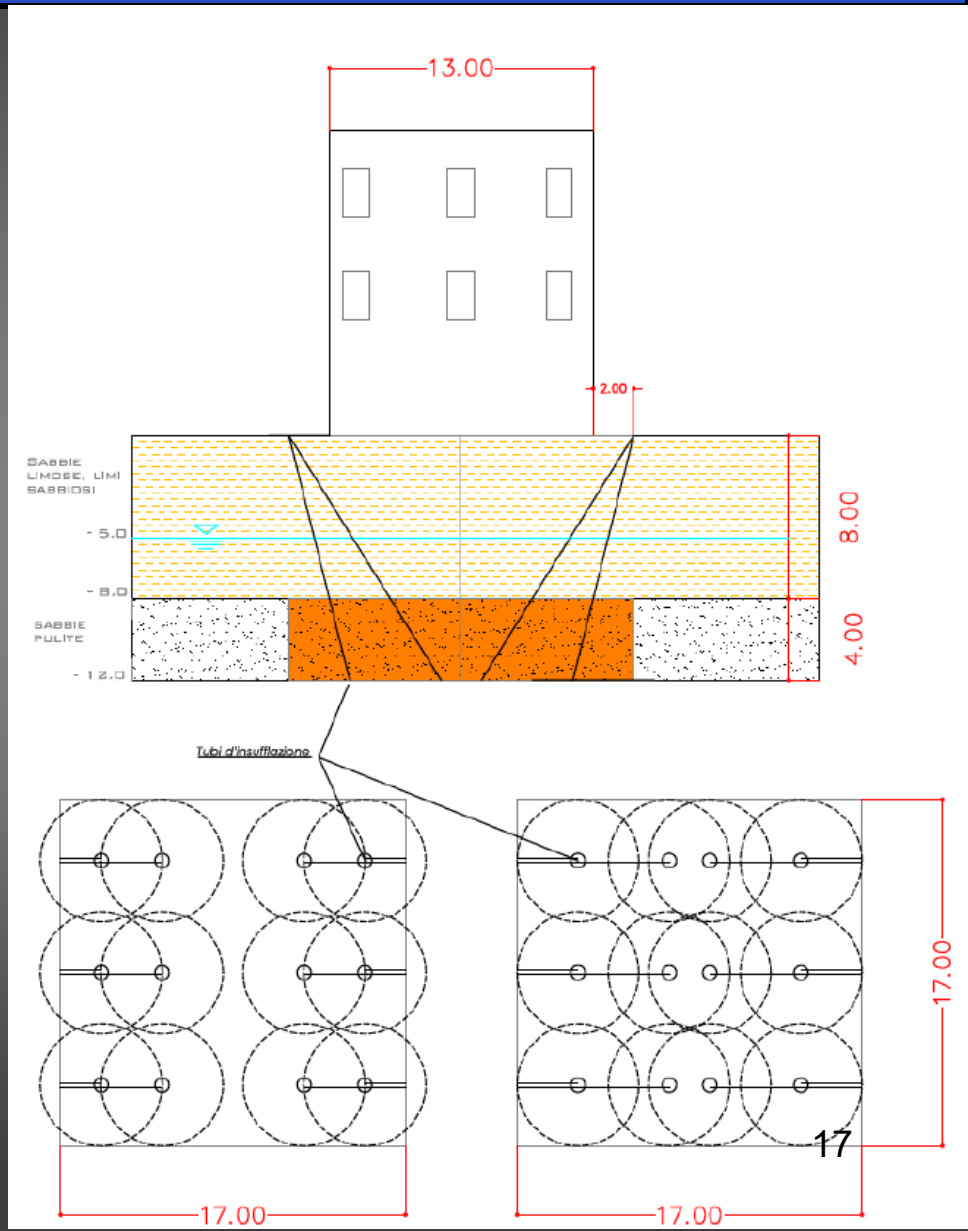
I terreni non saturi hanno una maggiore resistenza a liquefazione rispetto a quelli saturi, perché generano minori sovrappressioni dell'acqua interstiziale in caso di sisma. La parziale saturazione (IPS) può essere indotta in terreni sotto falda come quelli in esame, mediante tre tecniche recentemente sviluppate negli Stati Uniti e in Giappone: la prima prevede la generazione di gas all'interno dell'acqua di falda mediante processi di elettro-osmosi; la seconda consiste nell'insufflaggio di gas direttamente nel terreno saturo; la terza prevede l'iniezione di miscele contenenti soluzioni chimiche in grado di generare minuscole bollicine di gas all'interno dei pori tra i grani di sabbia. In questo modo un terreno saturo diventa parzialmente saturo, quindi più resistente ai carichi ciclici

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI



METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

TRATTAMENTI PASSIVI:
Parziale saturazione "Induced Partial Saturation", IPS



METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

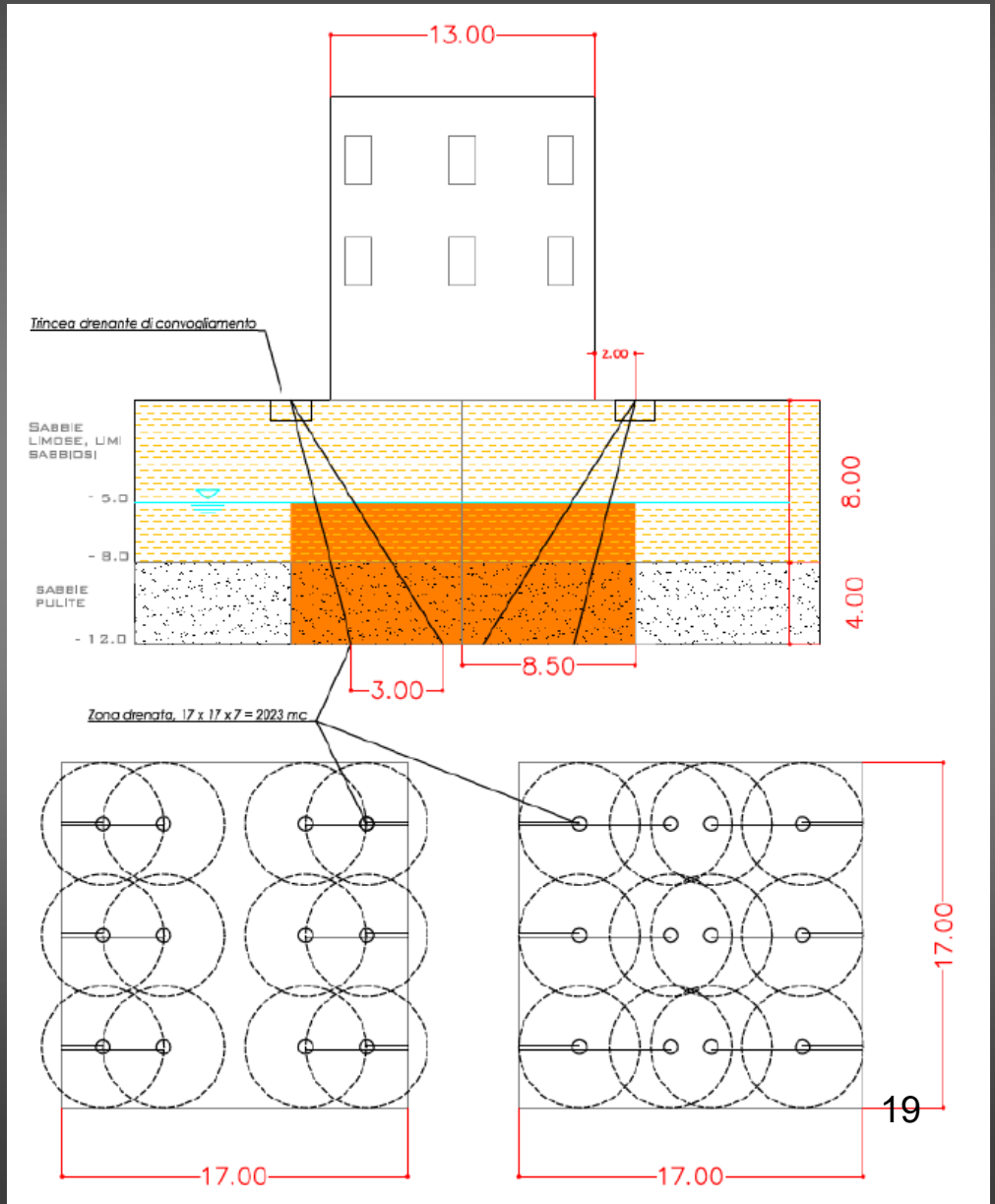
TRATTAMENTI PASSIVI: Drenaggi

La tecnica consiste nell'installazione di dreni verticali nel sottosuolo in adiacenza agli edifici esistenti per favorire il rapido smaltimento delle sovrappressioni interstiziali indotte dal sisma. Esistono diverse tipologie di dreni tra cui dreni prefabbricati infissi o installati in foro, tubi fessurati con filtro a sabbia o ghiaino installati in foro, pozzi per acqua tradizionali, pali di sabbia o ghiaia, colonne di ghiaia, ecc.

Il drenaggio non produce alcun significativo miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni interessati. L'utilizzo di dreni senza contemporaneo addensamento del terreno può non essere sufficiente a dissipare abbastanza velocemente le sovrappressioni interstiziali durante la fase più intensa del sisma. In alcuni casi l'effetto drenante può essere accoppiato a quello "consolidante" attraverso la realizzazione di elementi colonnari di materiali a grana grossa fortemente addensati

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

TRATTAMENTI PASSIVI:
Drenaggi



METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

CAMPO PROVA PER INTERVENTI DI TIPO ATTIVO E PASSIVO TIPO IPS

Data la natura dei terreni alluvionali interessati, la loro eterogeneità, considerate le proprietà meccaniche ed idrauliche dei litotipi presenti, è opportuno che la scelta delle tecniche di mitigazione del rischio di liquefazione per le zone di sottosuolo sottostanti gli edifici colpiti degli eventi sismici sia effettuata a valle di uno o più campi prova sperimentali in siti ben caratterizzati geotecnicamente

L'efficacia del trattamento dovrà essere verificata mediante prove in sito e prove di laboratorio eseguite su campioni rappresentativi dei terreni trattati

I siti adibiti a campo prova dovranno essere ben caratterizzati geotecnicamente

Le Imprese che eseguiranno i campi prova dovranno possedere una consolidata esperienza nell'esecuzione di interventi di mitigazione del rischio di liquefazione, anche mediante l'impiego di tecnologie differenti

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

VERIFICA DEI RISULTATI PER METODI ATTIVI

Le indagini da realizzare prima e dopo l'esecuzione del trattamento di mitigazione del rischio di liquefazione ritenuto più opportuno sono

- Sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati con campionatore di grande diametro, per garantire un nucleo centrale non condizionato dai disturbi del campionamento, sul quale eseguire successive prove di laboratorio. I fori di sondaggio dovranno essere cementati allo scopo di eseguire prove *down-hole* prima e dopo il trattamento;
- Prove penetrometriche con piezocono e modulo sismico con doppio geofono (metodo "*true time interval*"), per la misura della resistenza alla punta q_c, dell'attrito f_s, della pressione neutra, u, e della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s da eseguire prima e dopo il trattamento (se le resistenze lo consentono);
- Prove di permeabilità in sito, anche mediante prove di dissipazione con piezocono, anch'esse da eseguire prima e dopo il trattamento;
- Prove di laboratorio da eseguire su campioni indisturbati prelevati prima e dopo il trattamento:
  - Prove triassiali standard, con rottura drenata e/o non drenata, con misura della velocità di propagazione delle onde di taglio e di compressione mediante trasduttori di tipo "*bender elements*",
  - Prove di taglio semplice ciclico o in alternativa prove triassiali cicliche,
  - Prove di colonna risonante,
  - Prove di permeabilità,
  - Prove di *creep* in cella edometrica.

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

VERIFICA DEI RISULTATI PER METODI PASSIVI

Le indagini da realizzare prima e dopo l'esecuzione del trattamento di mitigazione del rischio di liquefazione mediante IPS sono

- Sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati con campionatore di grande diametro, per garantire un nucleo centrale non condizionato dai disturbi del campionamento, sul quale eseguire successive prove di laboratorio.
- Misura della velocità di propagazione delle onde di compressione V_P e di taglio, V_S mediante prove di tipo *cross-hole* o *down-hole* in fori di sondaggio cementati da eseguire prima e dopo il trattamento o mediante piezocono sismico.
- Prove di laboratorio da eseguire su campioni indisturbati prelevati prima e dopo il trattamento:
  - Prove triassiali standard con rottura non drenata, con misura della velocità di propagazione delle onde di taglio e di compressione mediante *bender elements*,
  - Prove di taglio semplice ciclico con controllo della sovrappressione interstiziale o in alternativa prove triassiali cicliche.

METODI DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

INTERVENTI DI SOTTOFONDAZIONE

Gli interventi strutturali sulle fondazioni di edifici esistenti sono utili per proteggere la struttura in elevazione dalle deformazioni indotte dalla liquefazione, di cui non riducono la probabilità di evenienza. Pertanto possono essere efficaci se il fenomeno temuto è la mobilità ciclica

- Allargamento dell'impronta delle fondazioni (aumento rigidezza verticale e capacità portante)
- Collegamento di fondazioni isolate
- Creazione di piano rigido orizzontale con realizzazione di platea
- Utilizzo di sottofondazioni profonde (pali o micropali)

(si obbliga in questo caso ad utilizzare anche cordoli di collegamento alle fondazioni superficiali esistenti)

Determina regionale riguardante la documentazione tecnica a supporto dei progetti di consolidamento del terreno in siti liquefacibili

Atto del Dirigente a firma unica:	DETERMINAZIONE n° 1105 del 03/02/2014
Proposta:	DPG/2014/1391 del 03/02/2014
Struttura proponente:	SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DIREZIONE GENERALE AMBIENTE E DIFESA DEL SUOLO E DELLA COSTA
Oggetto:	APPROVAZIONE DI "INDICAZIONI SULLA DOCUMENTAZIONE TECNICA DA PRODURRE A SUPPORTO DELLA RICHIESTA DI CONTRIBUTI PER INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO DI FONDAZIONE IN CASO DI RIPARAZIONE, RIPRISTINO CON MIGLIORAMENTO SISMICO O DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE DI EDIFICI DICHIARATI INAGIBILI CHE ABBIANO RIPORTATO DANNI DA LIQUEFAZIONE, A SEGUITO DELLA SEQUENZA SISMICA CHE HA INTERESSATO LA PIANURA EMILIANA NEL MAGGIO-GIUGNO 2012" .
Autorità emanante:	IL RESPONSABILE - SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI
Firmatario:	RAFFAELE PIGNONE in qualità di Responsabile di servizio

- Definisce le tipologie di indagini richieste per la definizione del modello geotecnico
- Definisce le tipologie di indagini finalizzate alla Progettazione degli interventi

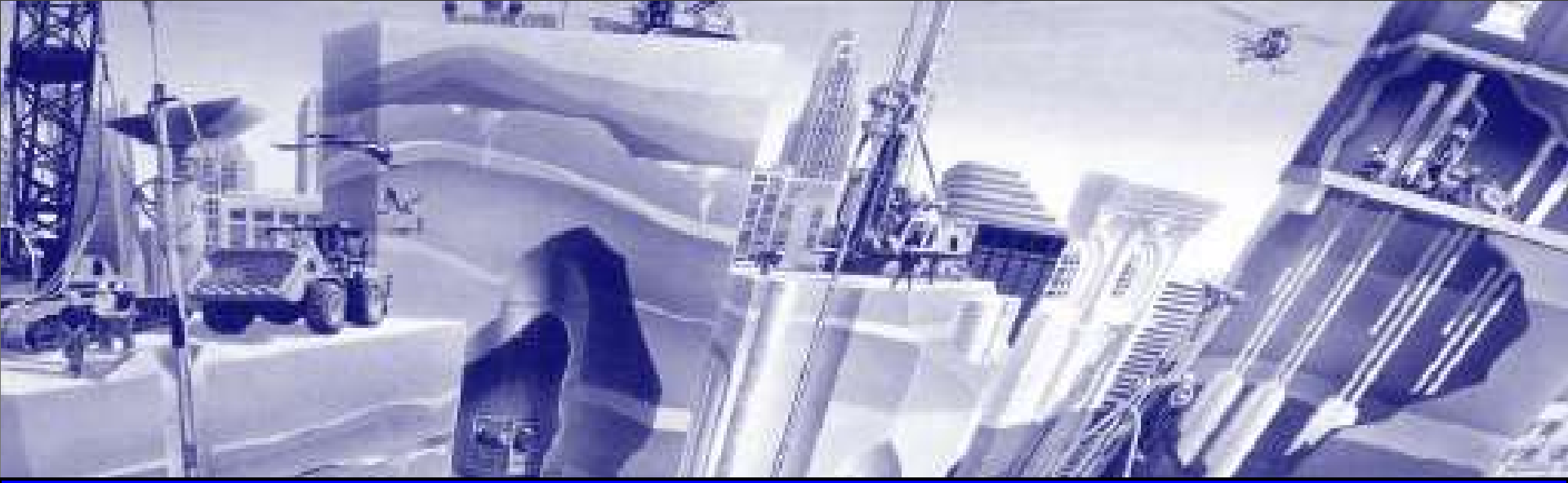
Determina regionale riguardante la documentazione tecnica a supporto dei progetti di consolidamento del terreno in siti liquefacibili

TABELLA RIASSUNTIVA INDAGINI PER LA PROGETTAZIONE INTERVENTI

SCOPO	PARAMETRI GEOTECNICI	PROVE	
		in sito	laboratorio
Iniezioni di permeazione	Permeabilità, K	Misure K in foro	
	Profilo di rigidezza pre e post intervento	Misure dirette di Vs (SCPTE, SCPTU SDMT, DH, CH)	
	Profilo di resistenza ciclica pre e post intervento		CTX, CSS su campioni indisturbati o ricostruiti
Compaction Grouting	Profilo di rigidezza pre e post intervento (a metà interasse)	Misure dirette di Vs (SCPTE, SCPTU SDMT, DH, CH)	
	Profilo di resistenza pre e post - intervento (a metà interasse)		CTX, CSS
Induced Partial Saturation (IPS)	Grado di saturazione pre e post - intervento	Misure dirette velocità onde di compressione, Vp (SCPTE, SCPTU SDMT, DH, CH)	CTX, CSS su campioni saturi e parzialmente saturi indisturbati o ricostruiti

Determina regionale riguardante la documentazione tecnica a supporto dei progetti di consolidamento del terreno in siti liquefacibili

Dreni verticali e sub-verticali	Compressibilità		Prova edometrica (EDO) campioni indisturbati e/o ricostruiti
	Conducibilità idraulica	Misure K in foro	
Sottofondazioni o nuove fondazioni	Profilo di resistenza	CPTE, CPTU, DMT, CC	Prove triassiali monotone con rottura non drenata TxCU, o drenata TxCD su campioni indisturbati
	Profilo di rigidezza	Misure dirette di Vs (SCPTE, SCPTU SDMT, DH, CH)	EDO su campioni indisturbati
Displacement columns	Profilo di resistenza pre e post intervento (a metà interasse)	CPTE, CPTU, DMT, CC	TxCU, TxCD su campioni indisturbati
	Profilo di rigidezza pre e post intervento (a metà interasse)	Misure dirette di Vs (SCPTE, SCPTU SDMT, DH, CH)	

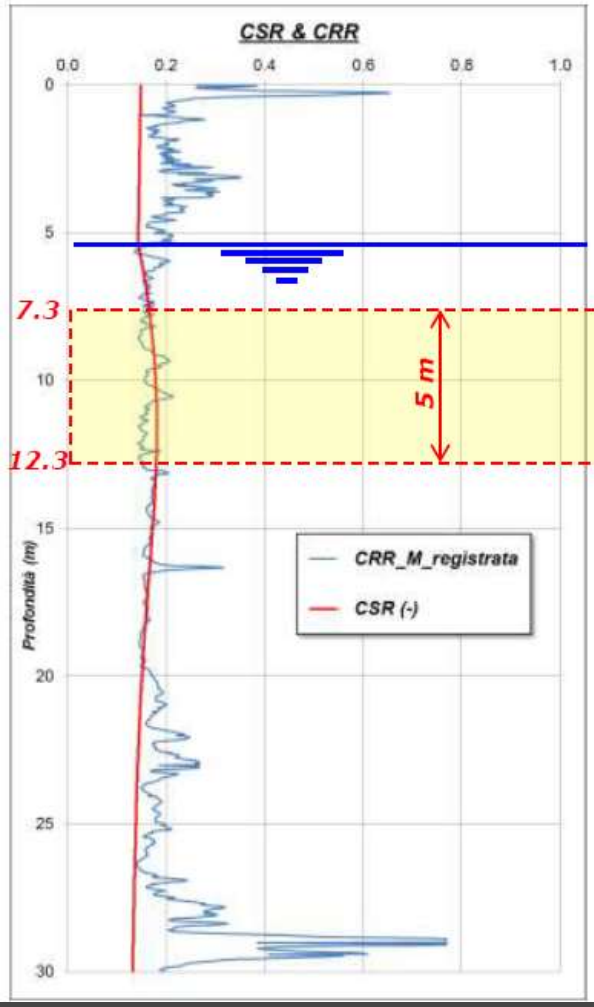


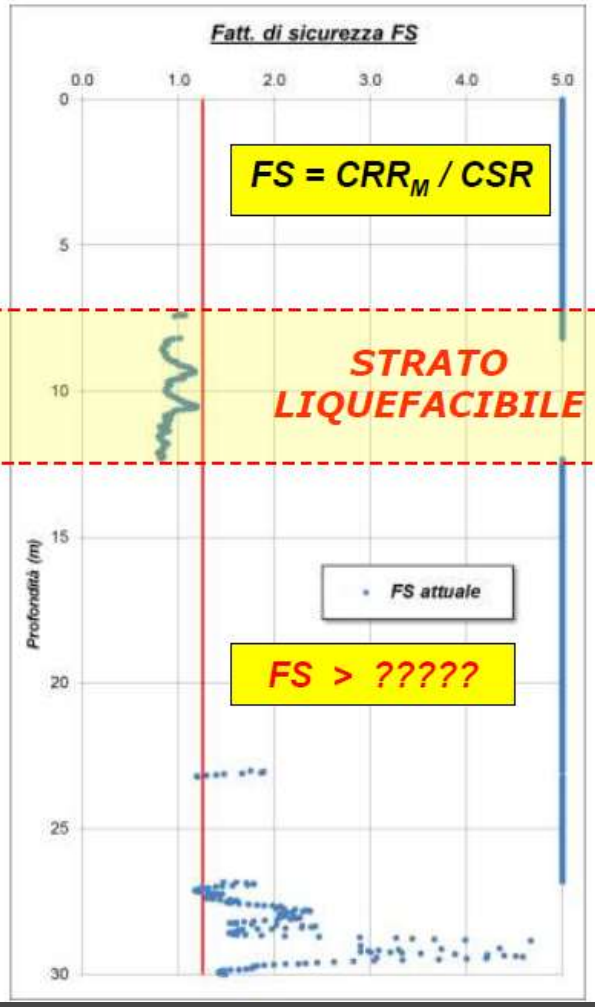
Esempio di studio tecnica di intervento con compaction grouting a San Carlo (FE)

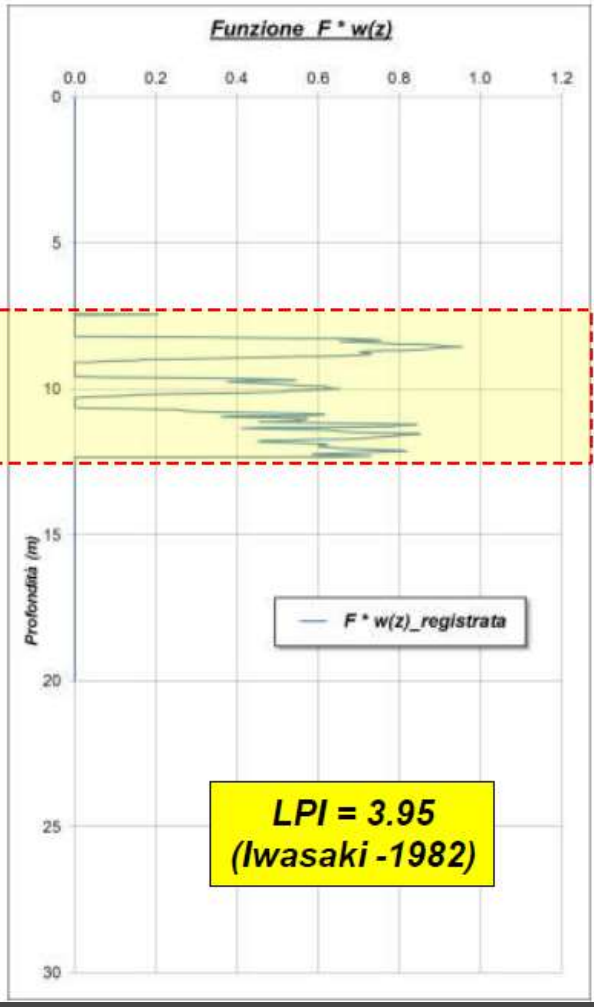


Esempio di studio tecnica di intervento a San Carlo

Verifica realizzata secondo le indicazioni NCEER 1996-1998







Fonte: Ing. Asioli - TREVI S.p.A. (2013)

Esempio di studio tecnica di intervento a San Carlo

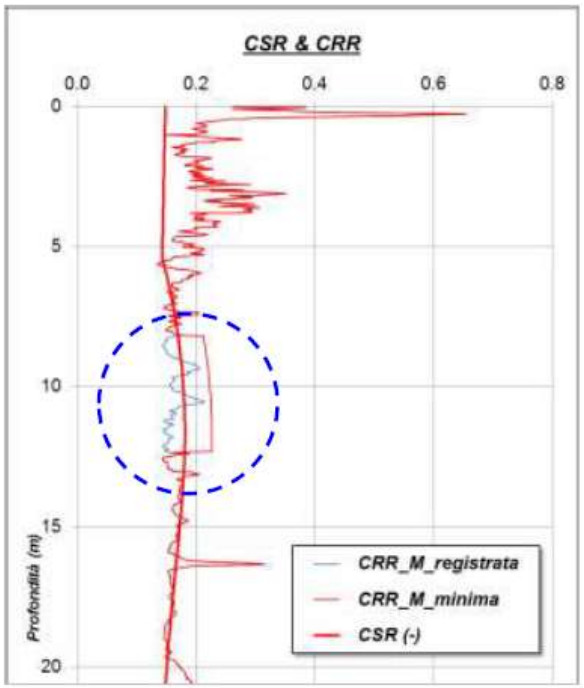
DIMENSIONAMENTO DELL'INTERVENTO MINIMO

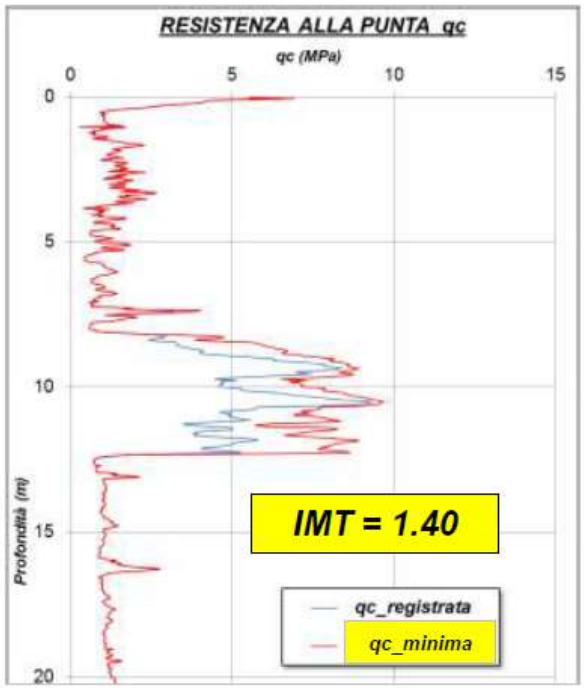
Procedimento a ritroso, che partendo dalla sollecitazione di progetto 'CSR' consente di determinare la 'qc' minima che bisogna ottenere in sito negli strati liquefacibili

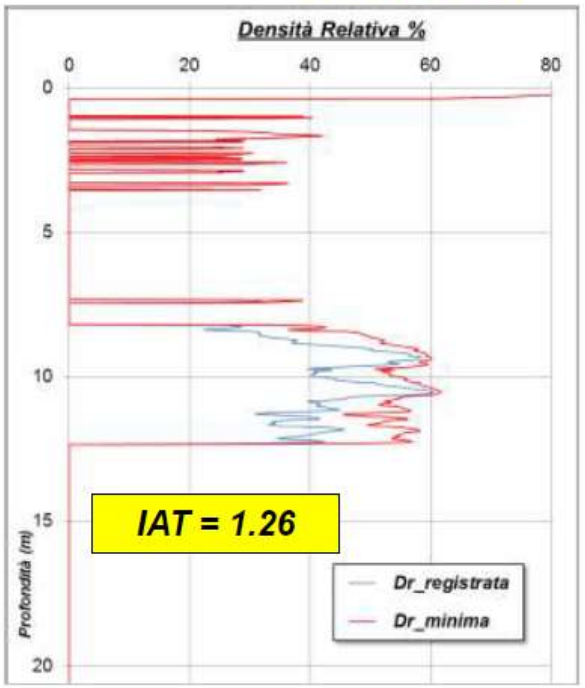
Il coefficiente I_C che indentifica la tipologia di terreno è mantenuto fisso

$$D_r = 68 \times \left[\log_{10}\left(\frac{q_c}{\sqrt{p_a \times \sigma'_v}} \right) - 1 \right]$$

$$CSR \times FS = CRR_{min} \rightarrow (q_{c1N})_{CSmin} \rightarrow q_{c1N} \rightarrow q_{c,min} \rightarrow D_{Rmin}$$ Jamilkowsky et al (1985)







Fonte: Ing. Asioli - TREVI S.p.A. (2013)

Esempio di studio tecnica di intervento a San Carlo

DIMENSIONAMENTO DELL'INTERVENTO MINIMO

Una volta definito il valore della D_R minima da ottenere, assumendo una maglia quadrata di lato ''S'' si può valutare il diametro minimo delle colonne di consolidamento

Proposta di MITCHELL

(X° ICSMFE–Stoccolma 1981)

HP1: *Il volume iniettato sposta il terreno inducendo una riduzione del volume dei vuoti pari al volume iniettato*

HP2: *Si ha spostamento del terreno solo in direzione radiale*

$$D_{min} = \frac{2 \times S}{\sqrt{\pi \times \frac{1 + e_0}{e_0 - e}}}$$

$$e_0 = e_{max} - D_{r,in} \times (e_{max} - e_{min})$$

$$e = e_{max} - D_{r,fin} \times (e_{max} - e_{min})$$

Analisi sull'intera verticale per differenti dimensioni di maglia

S = 1.50 m	D_{min} = 442 mm
S = 1.75 m	D_{min} = 516 mm
S = 2.00 m	D_{min} = 590 mm
S = 2.25 m	D_{min} = 664 mm
S = 2.50 m	D_{min} = 737 mm

Fonte: Ing. Asioli - TREVI S.p.A. (2013)

Esempio di studio tecnica di intervento a San Carlo

IPOTESI DI INTERVENTO

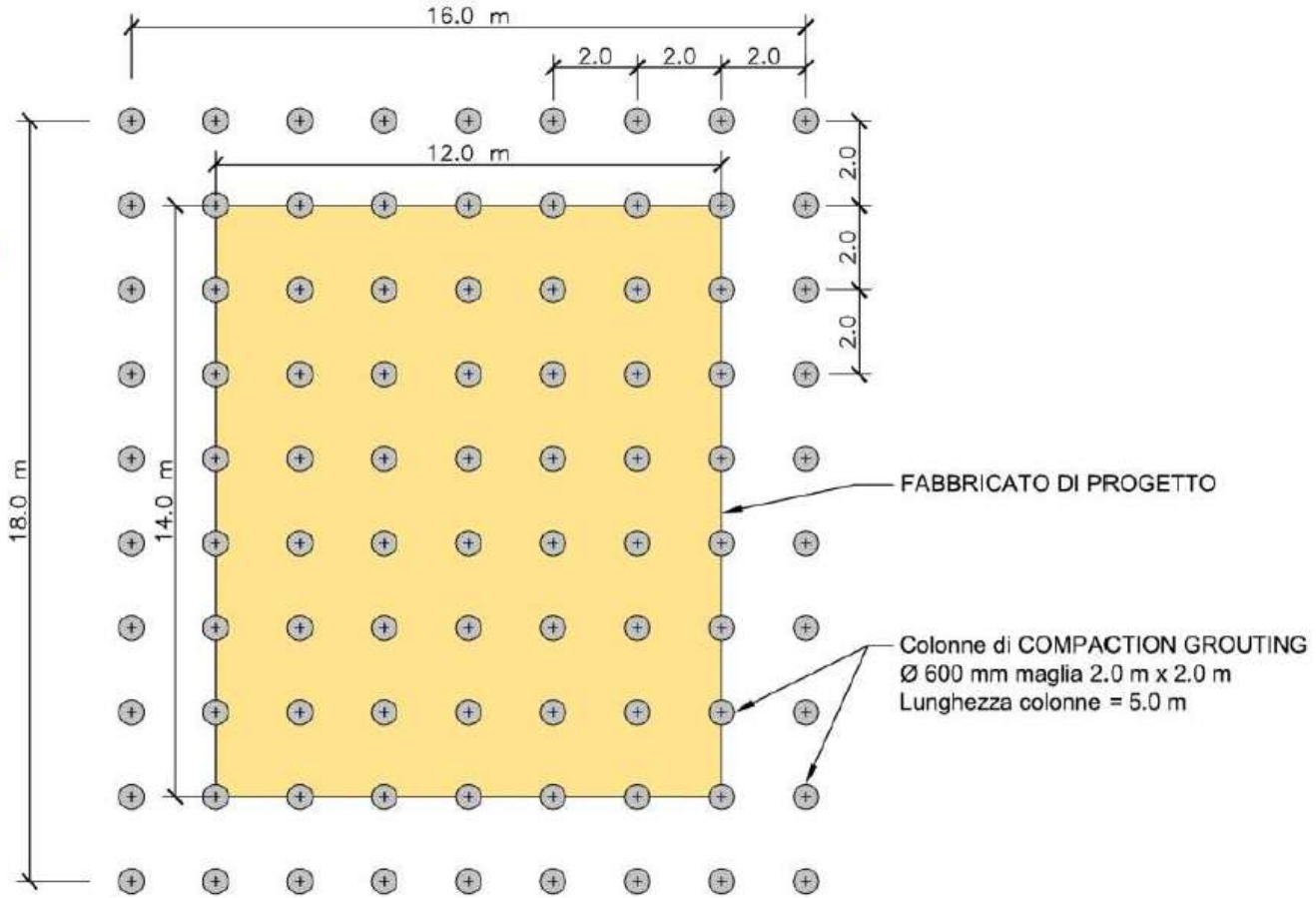
D = 600mm

S = 2.00 m

% Trattamento = 7%

$V_{CLS,COL}$ = 1.4 m³

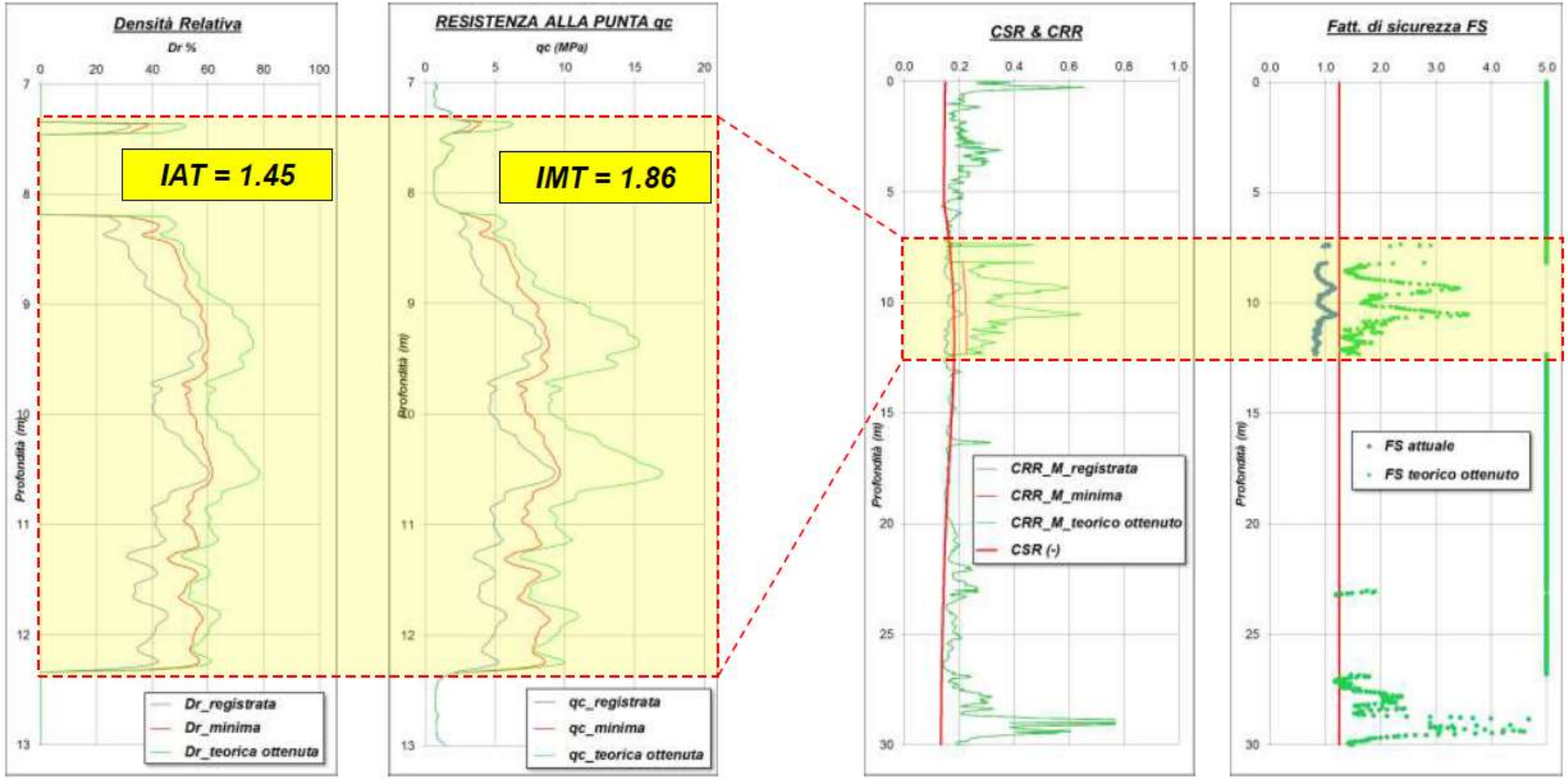
$V_{CLS,TOT}$ = 126 m³



Fonte: Ing. Asioli - TREVI S.p.A. (2013)

Esempio di studio tecnica di intervento a San Carlo

Sulla base dell'intervento ipotizzato sono state rieseguite le verifiche ed è stato calcolato il Fattore di Sicurezza atteso che risulta > 1.25



Fonte: Ing. Asioli - TREVI S.p.A. (2013)

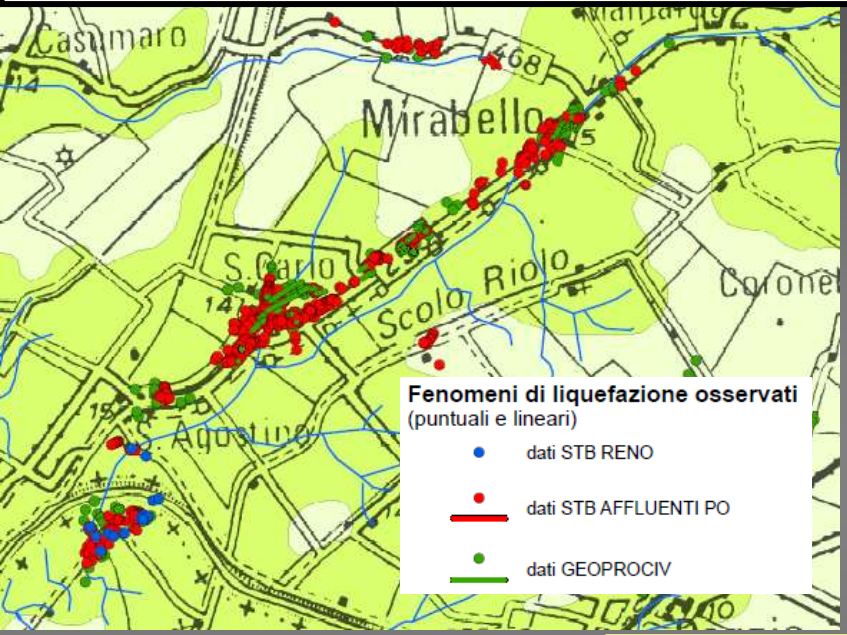


INTERVENTO DI TIPO ATTIVO CON COMPACTION GROUTING SU UN EDIFICIO RESIDENZIALE DANNEGGIATO DAL SISMA EMILIANO DEL 2012 A SAN CARLO (FE) PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE



Effetti di liquefazione, sisma emiliano 2012, San Carlo (FE)





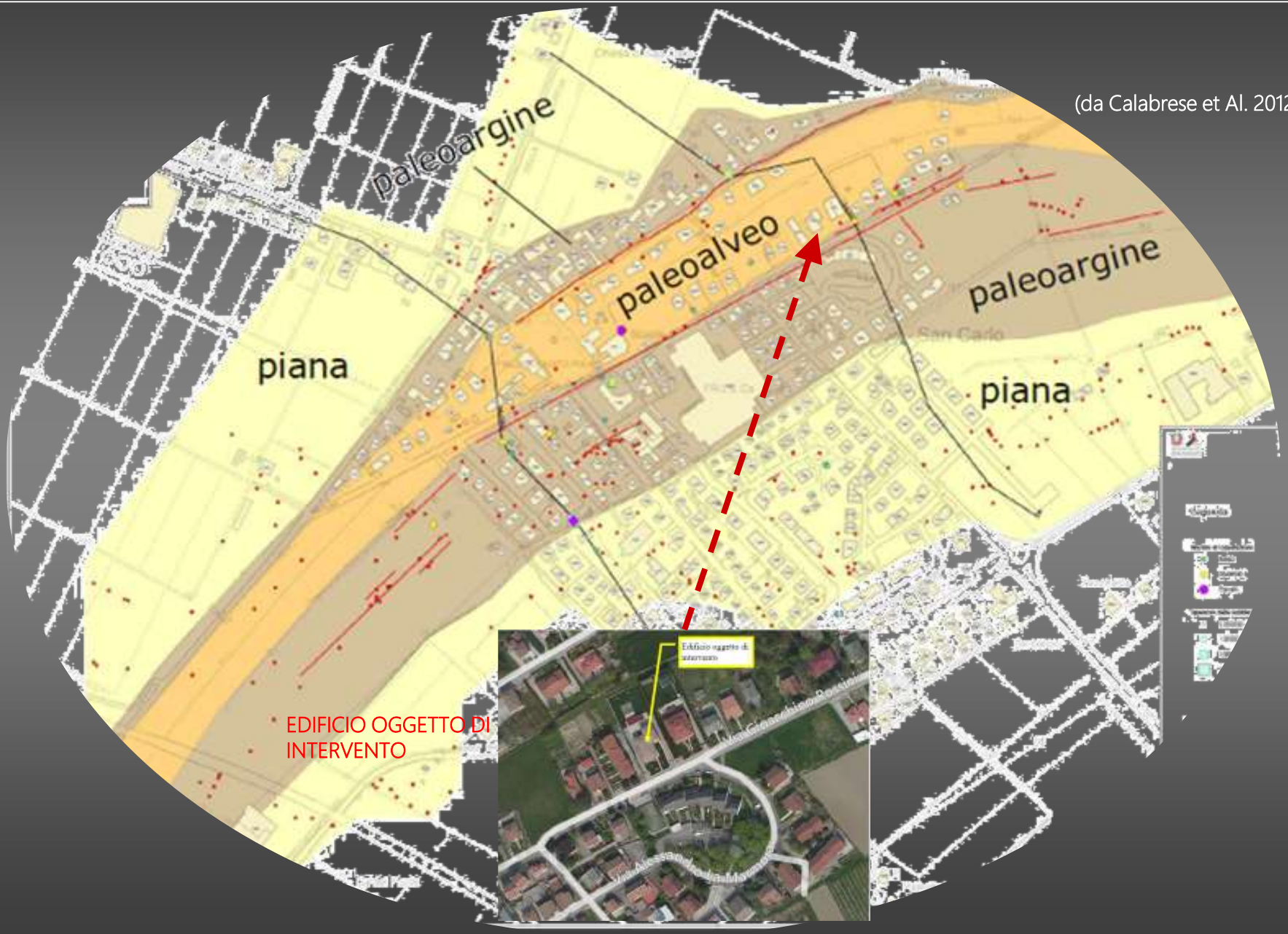

Via Rossini, San Carlo
(da Fioravante et Al. 2012)


Via Rossini, San Carlo
(da Fioravante et Al. 2012)


Via Risorgimento, San Carlo
(da Crespellani et Al. 2012)


Via VIII marzo, San Carlo
(da Crespellani et Al. 2012)

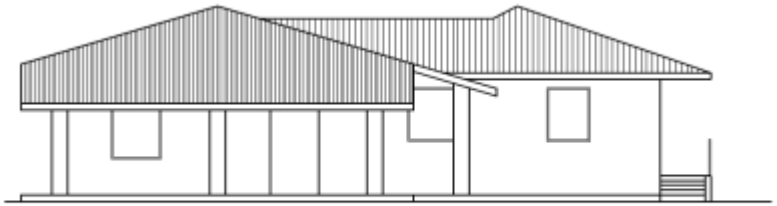
Effetti di liquefazione, sisma emiliano 2012, San Carlo (FE)



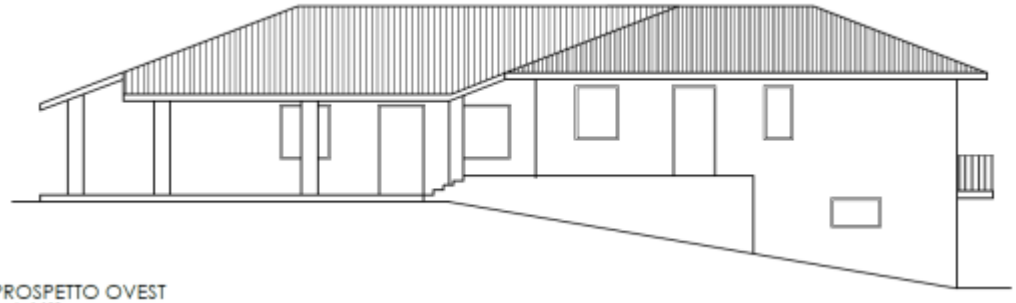
(da Calabrese et Al. 2012)

Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE), Via Rossini

Scala 1:100



Scala 1:100



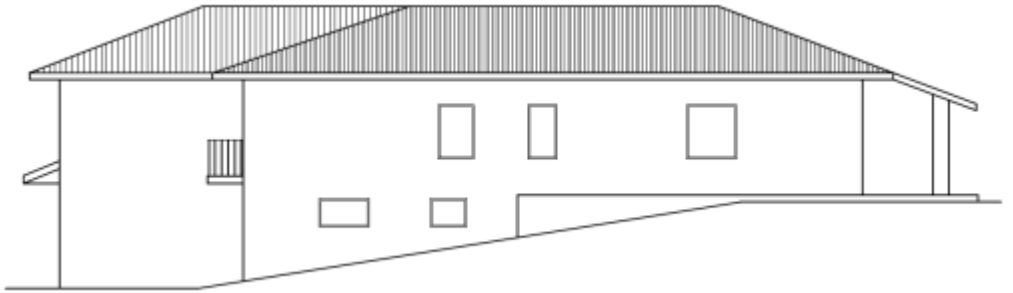
PROSPETTO NORD

Scala 1:100

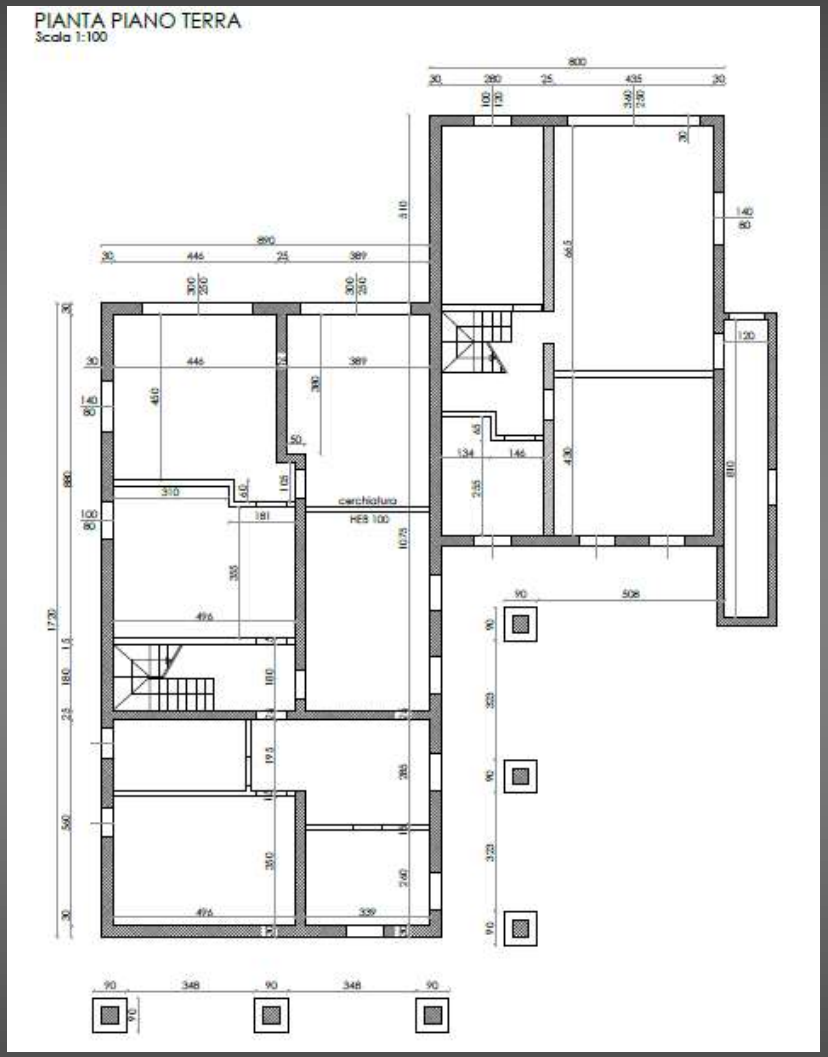


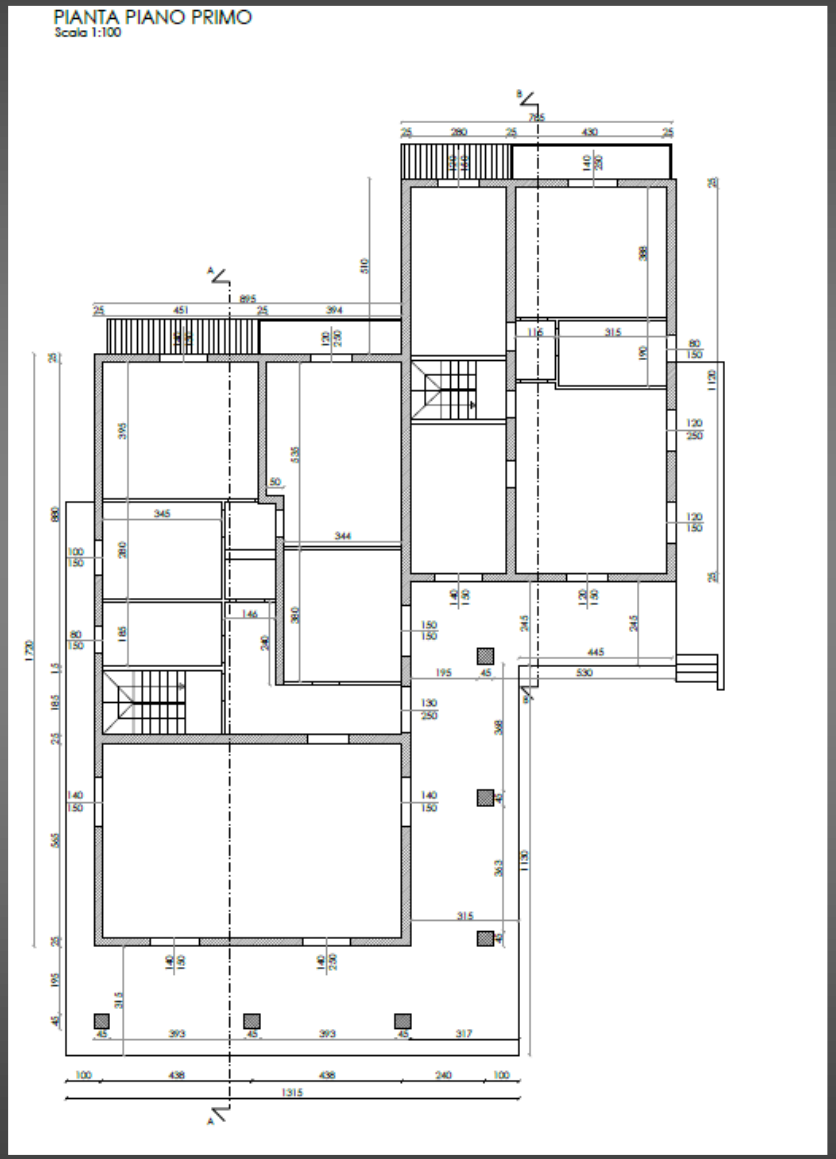
PROSPETTO OVEST

Scala 1:100

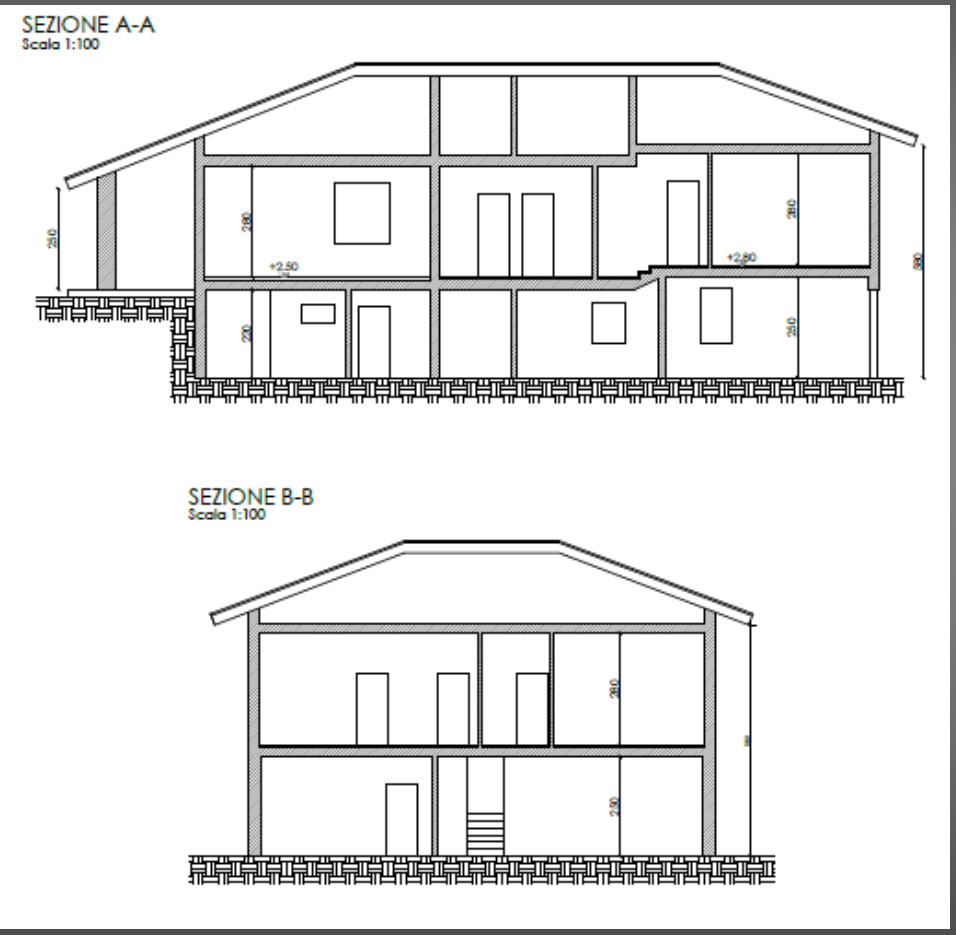


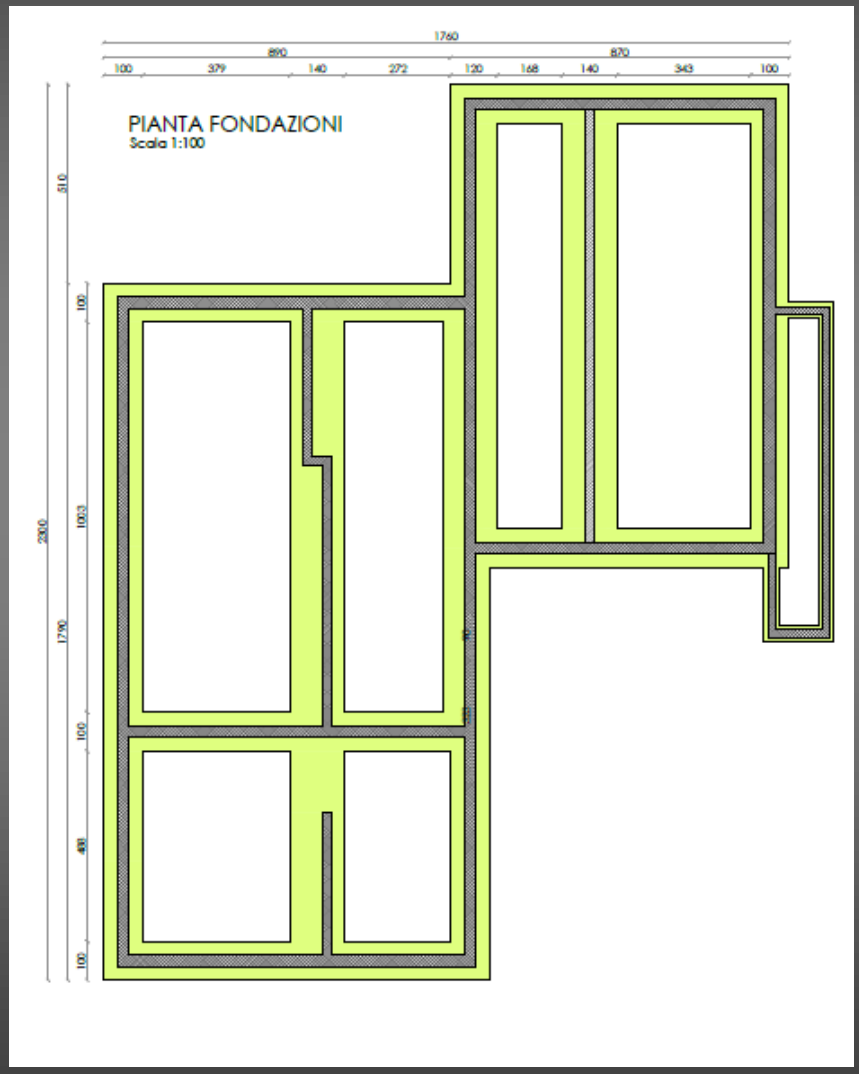
Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE), Via Rossini





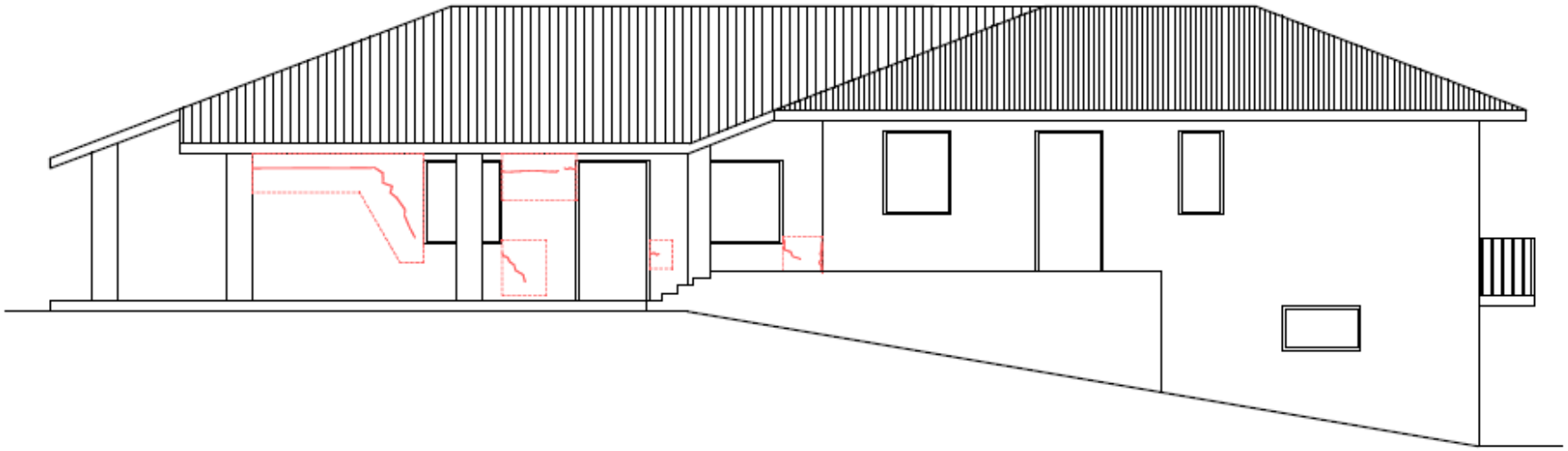
Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE), Via Rossini

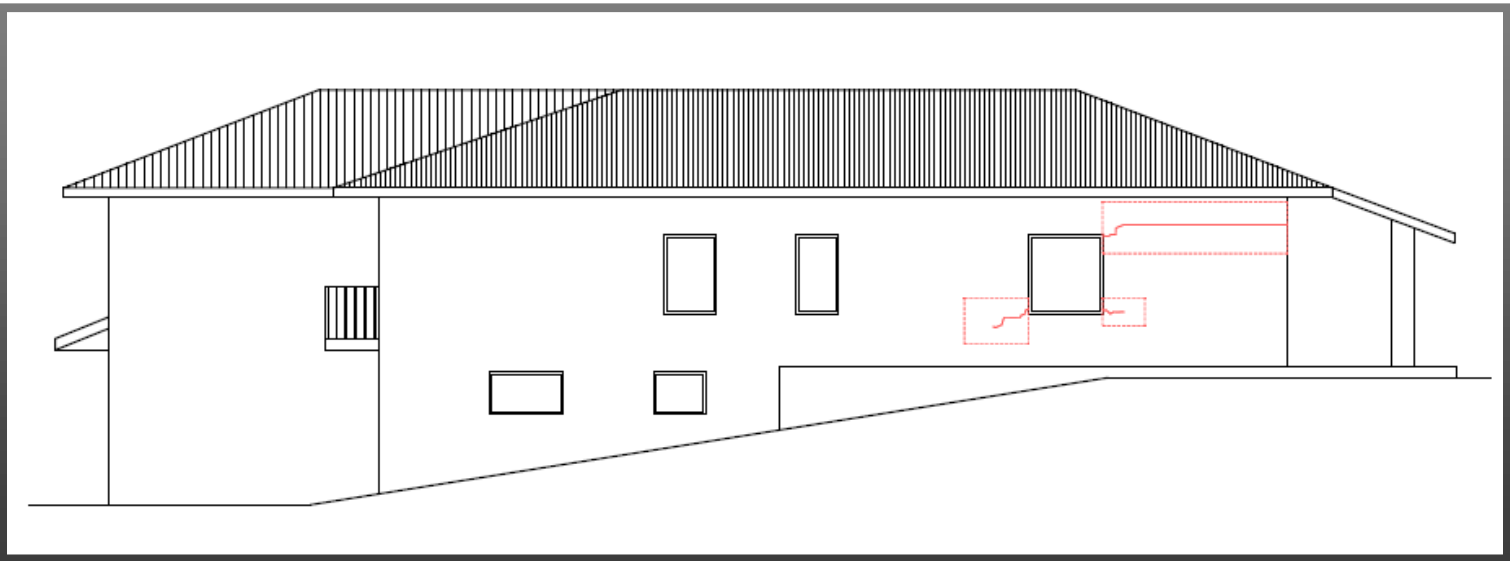




Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE), Via Rossini

PROSPETTO EST
Scala 1:100





Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE), Via Rossini













Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE), Via Rossini









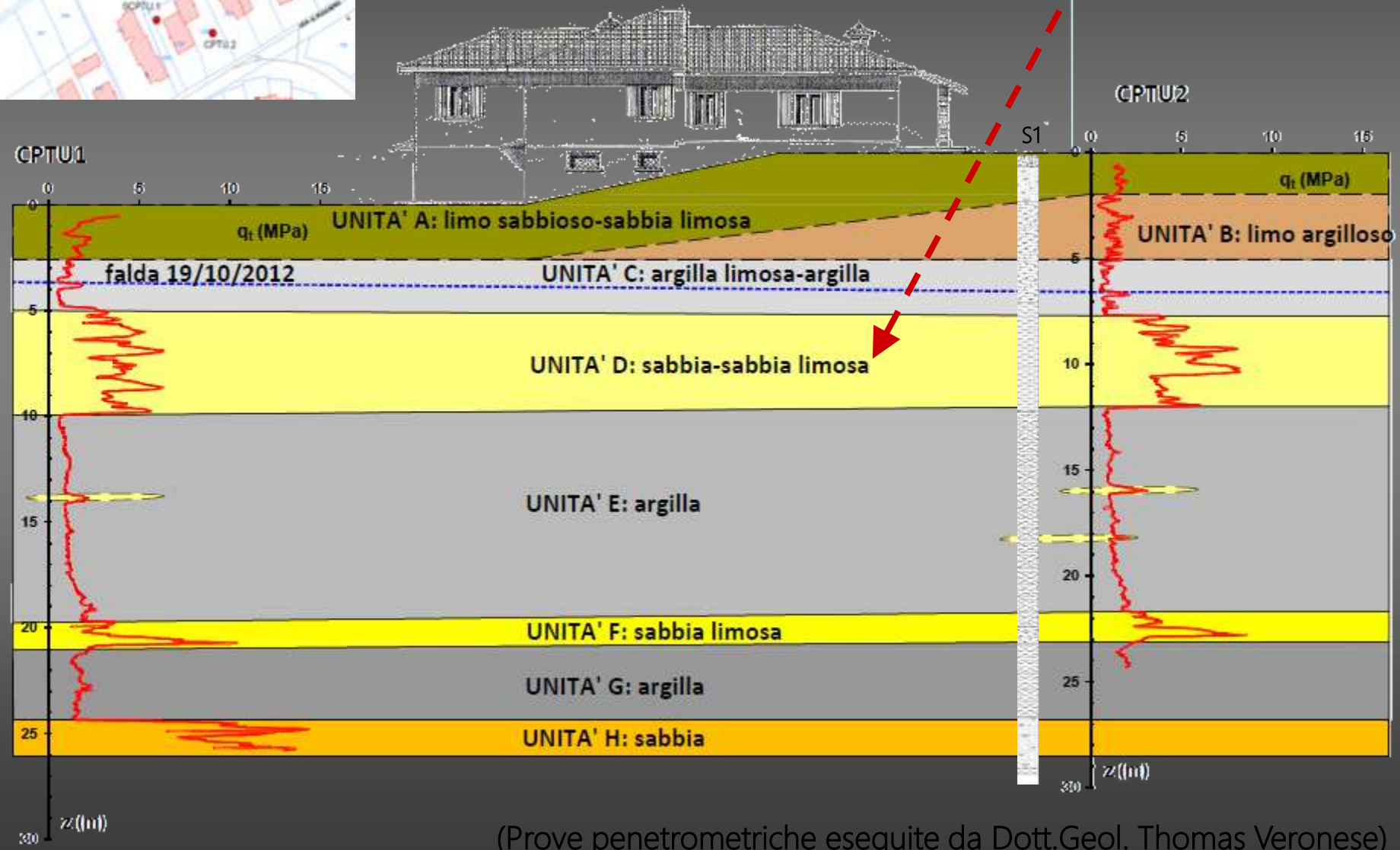






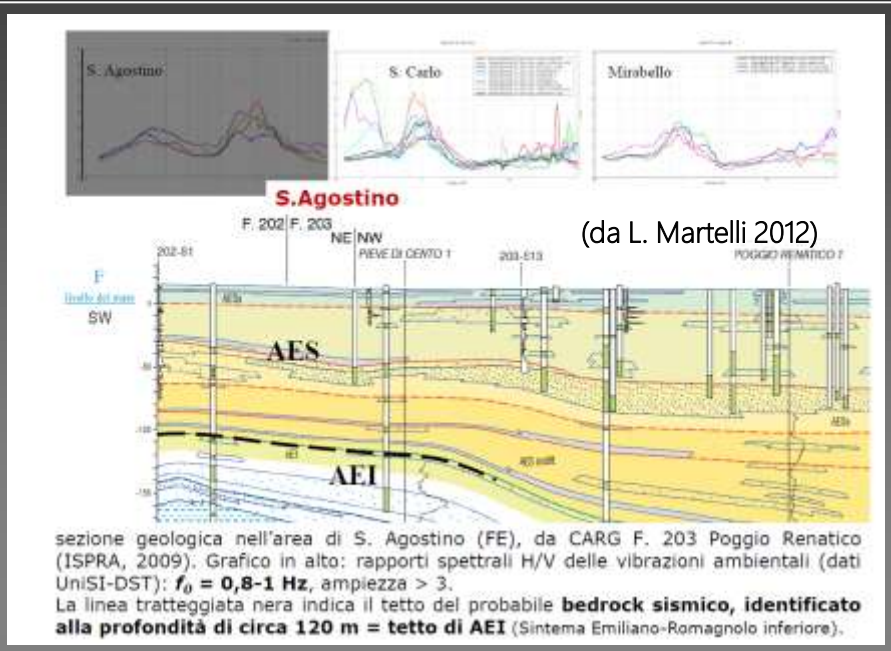
Edificio Oggetto di Intervento, profilo geotecnico





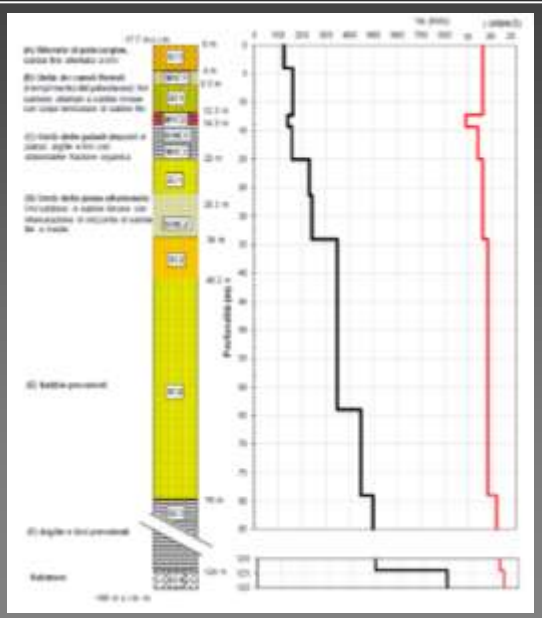
(Prove penetrometriche eseguite da Dott.Geol. Thomas Veronese)

Analisi di risposta sismica locale per verifiche di liquefazione



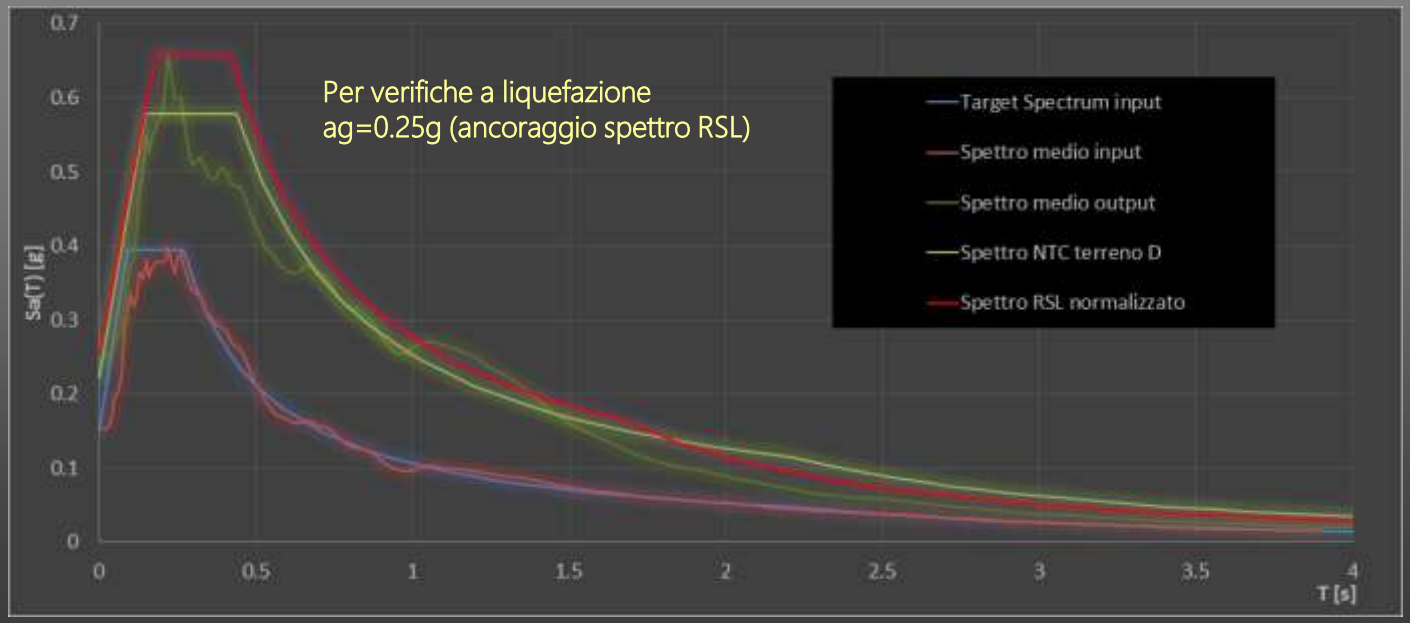
(da L. Martelli 2012)

sezione geologica nell'area di S. Agostino (FE), da CARG F. 203 Poggio Renatico (ISPRA, 2009). Grafico in alto: rapporti spettrali H/V delle vibrazioni ambientali (dati UniSI-DST): f_0 = **0,8-1 Hz**, ampiezza > 3.
La linea tratteggiata nera indica il tetto del probabile **bedrock sismico, identificato alla profondità di circa 120 m = tetto di AEI** (Sintema Emiliano-Romagnolo inferiore).



(da J.Facciorusso et Al. 2012)

Risultato RSL: confronto tra spettro medio di input, spettro medio di output (ottenuto con il codice EERA) e spettro di normativa per un terreno D



Verifica a liquefazione CPTU1 (Metodo NCEER 1996-1998)





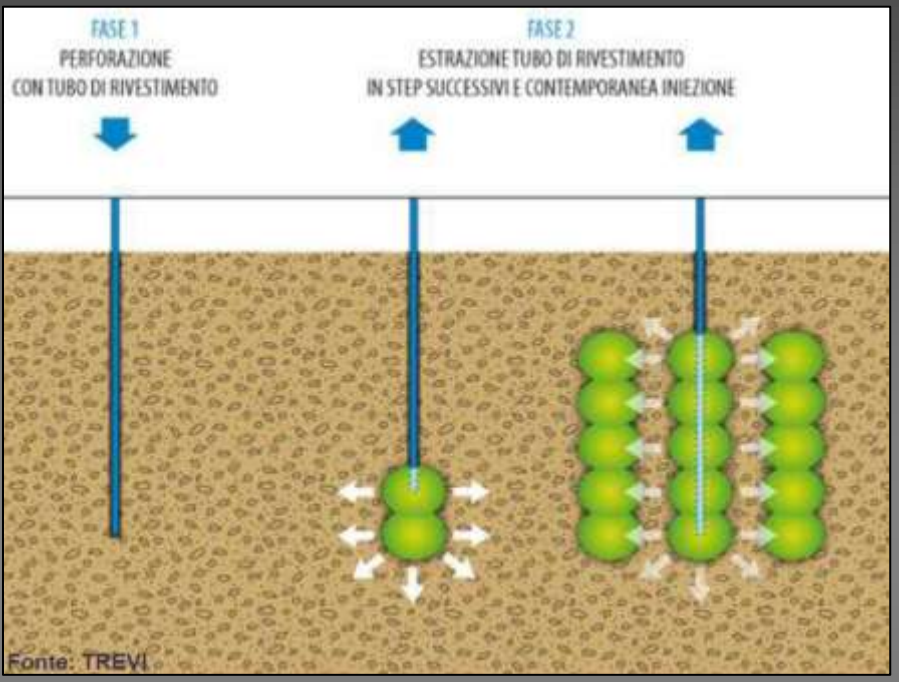
Indici del potenziale di liquefazione

(CPTU1)

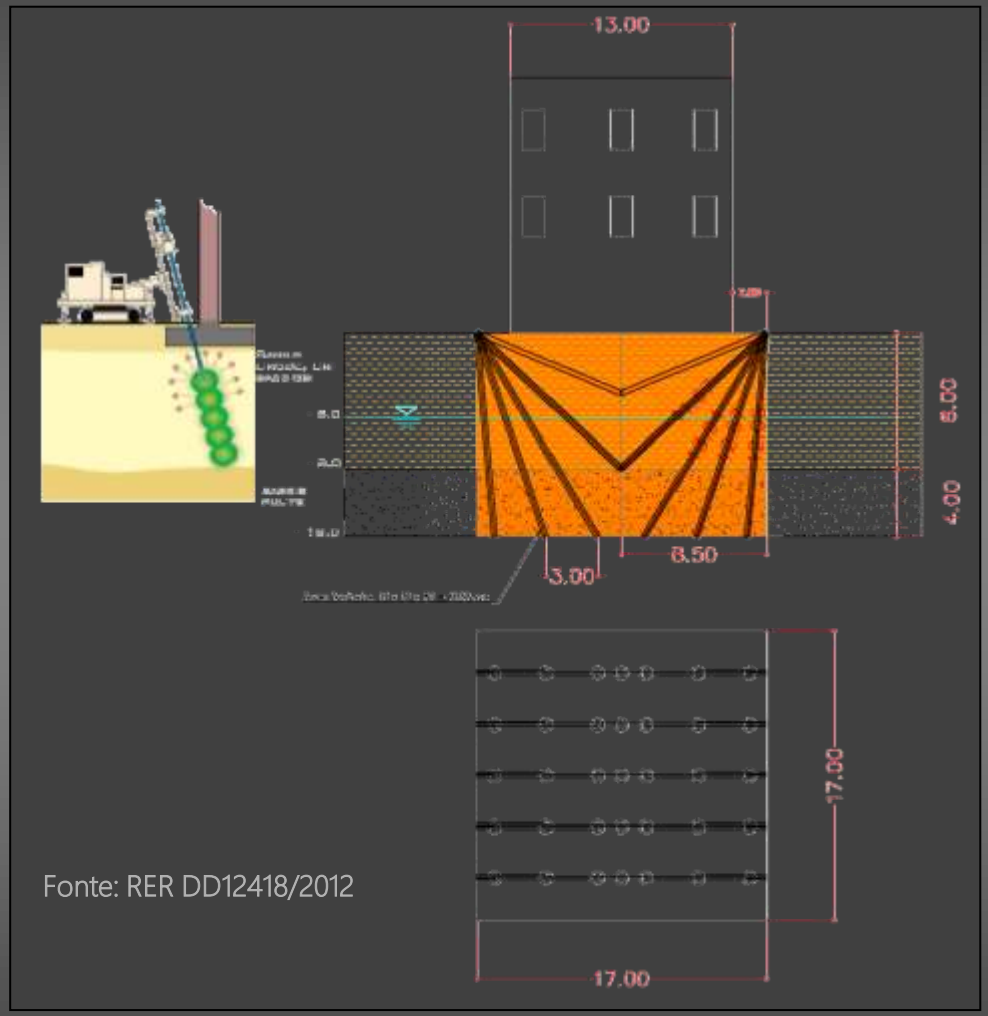
$LPI_{M=6.14} = 6.11$

$LPI_{M=5.90} = 3.58$

TRATTAMENTI ATTIVI: Iniezioni di compattazione "compaction grouting"



La tecnica consente di ridurre l'indice dei vuoti di terreni granulari mediante iniezioni di miscele cementizie che spiazzano il terreno circostante che si compatta con conseguente incremento della resistenza alla liquefazione, della rigidezza e riduzione della permeabilità



TRATTAMENTI ATTIVI: Iniezioni di compattazione "compaction grouting"

e_{min}	0,336	
e_{max}	0,965	
$MSF_{6.14}$	1,670	
$MSF_{5.9}$	1,850	
spaziatura colonne	S	150 [cm]
diametro minimo medio	D_{min}	56 [cm]
diametro di calcolo	d_{calc}	60 [cm]

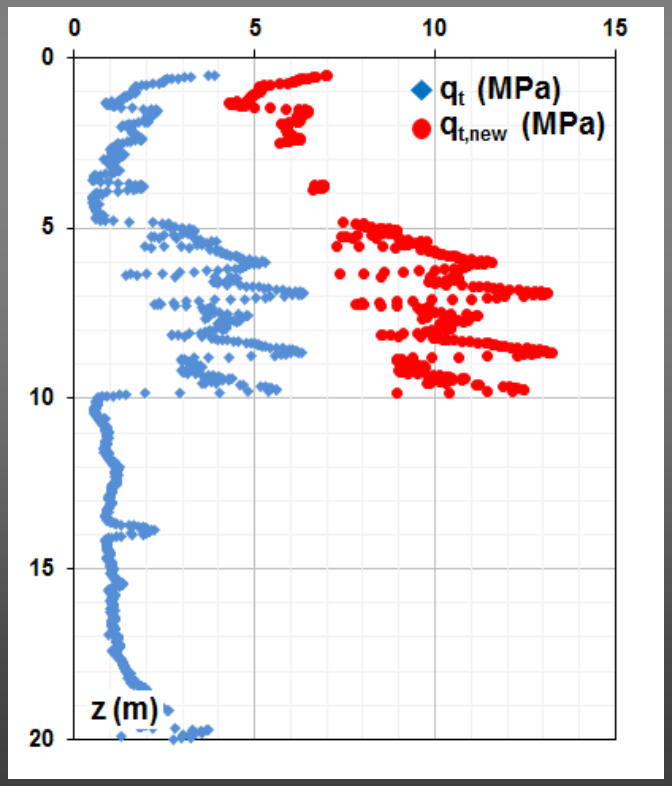
$$D_{min} = \frac{2 \times S}{\sqrt{\pi \times \frac{1 + e_0}{e_0 - e}}}$$

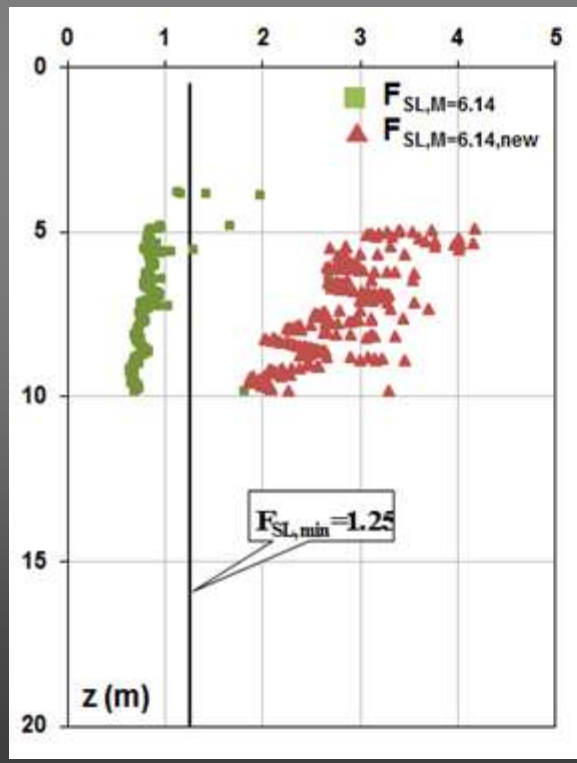
$$e_0 = e_{max} - D_{r,in} \times (e_{max} - e_{min})$$

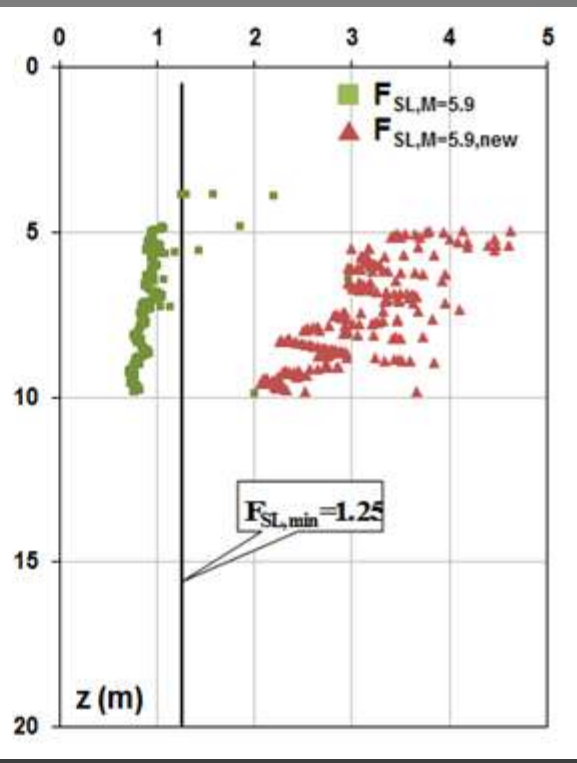
$$e = e_{max} - D_{r,fin} \times (e_{max} - e_{min})$$

Proposta di MITCHELL

(X° ICSMFE-Stoccolma 1981)

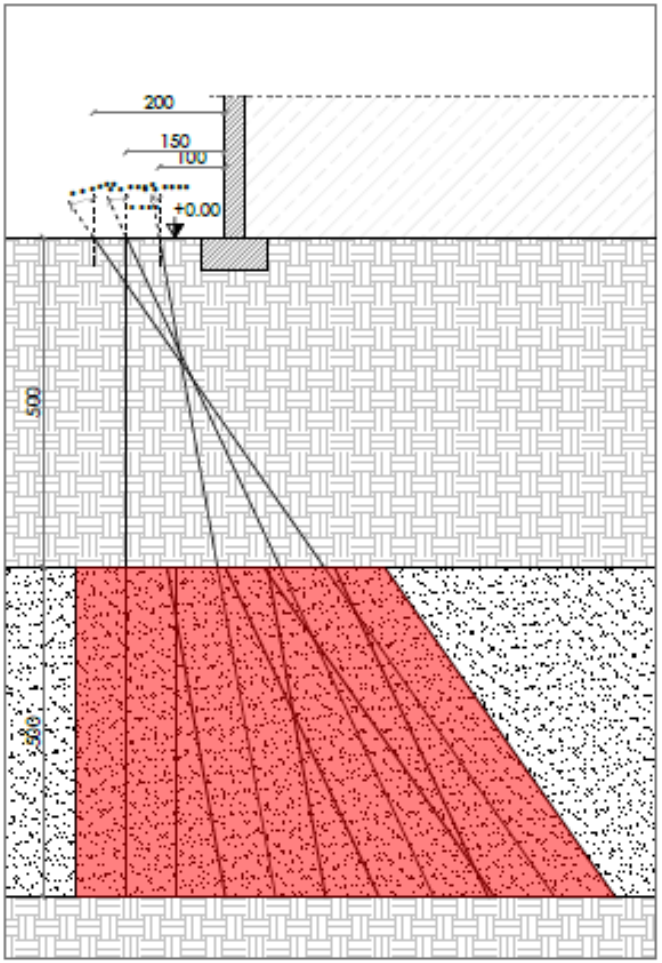




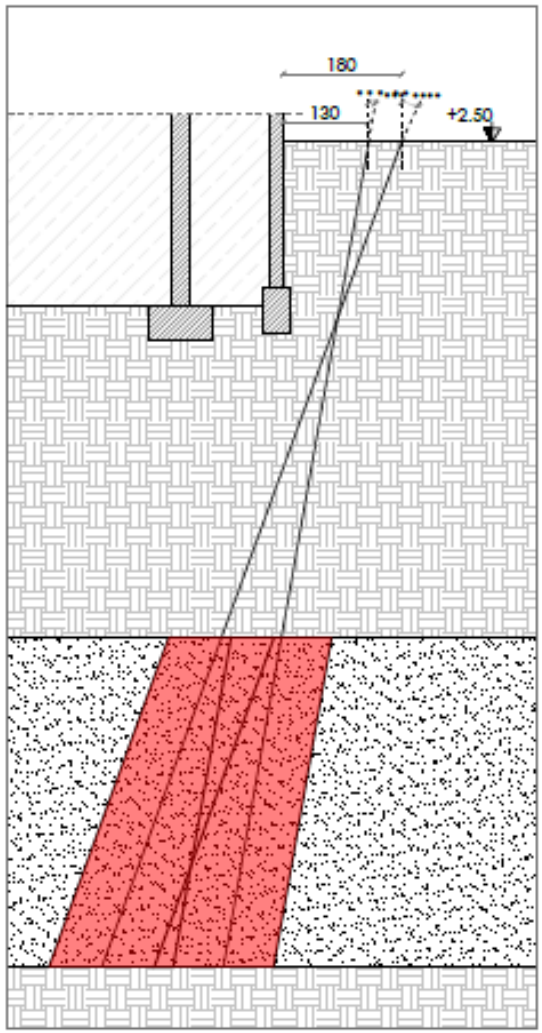


Intervento di consolidamento progettato: compaction grouting

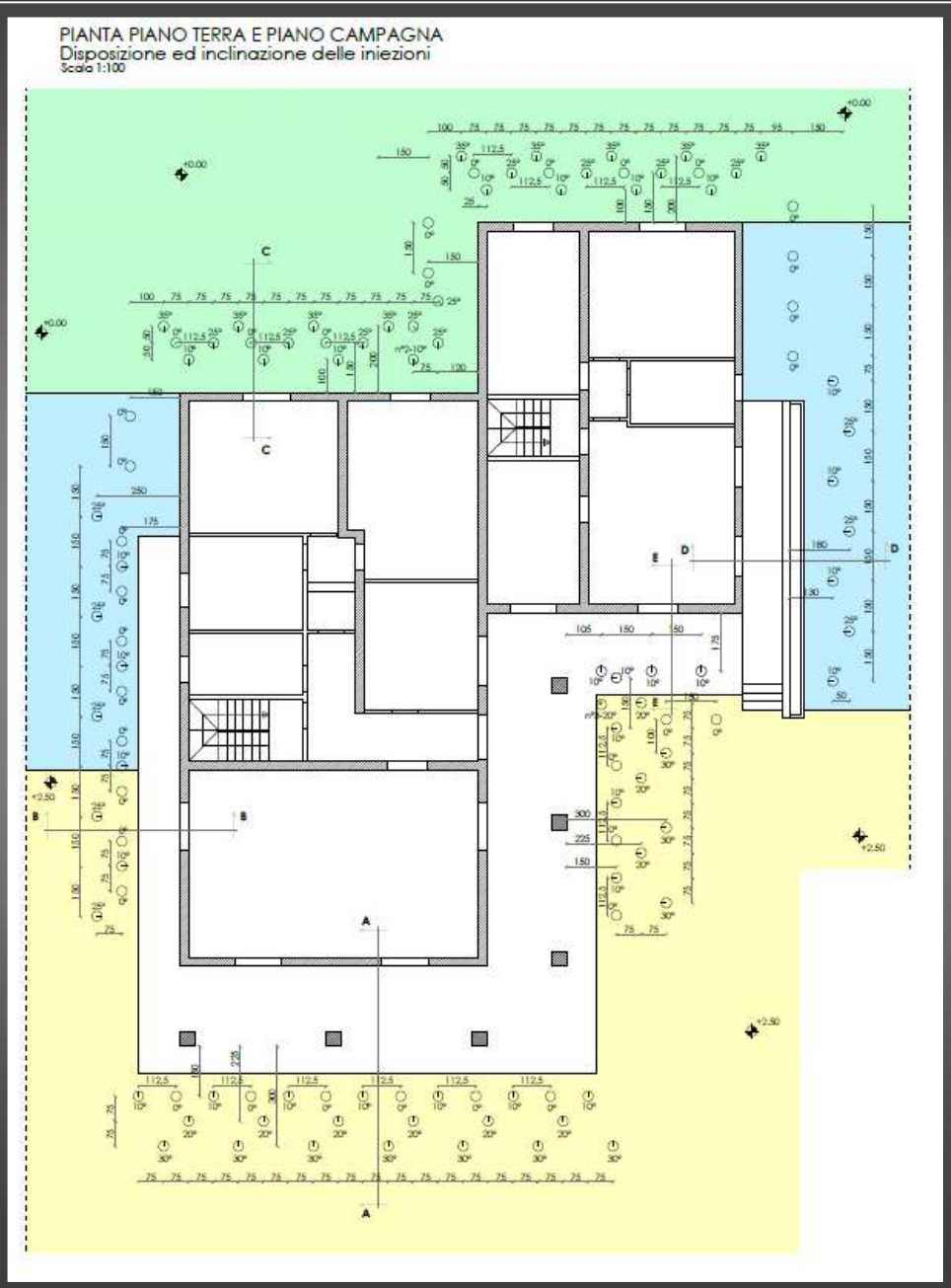
SEZ. C-C
Scala 1:100

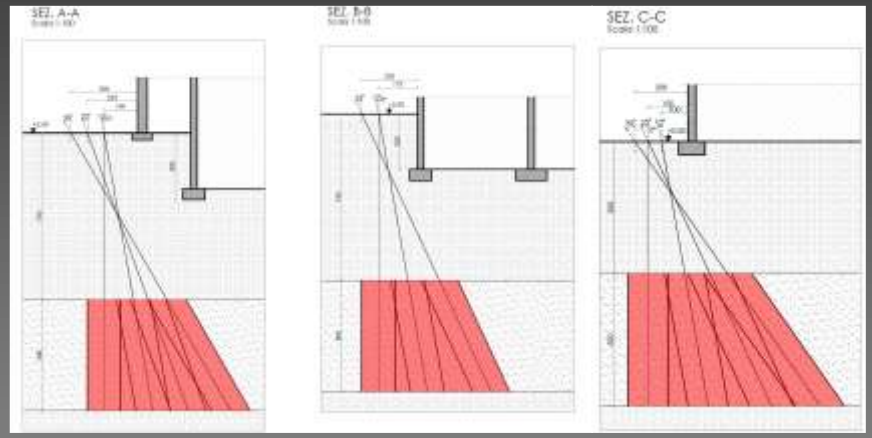


SEZ. D-D
Scala 1:100



Schema di intervento iniezioni di compaction grouting

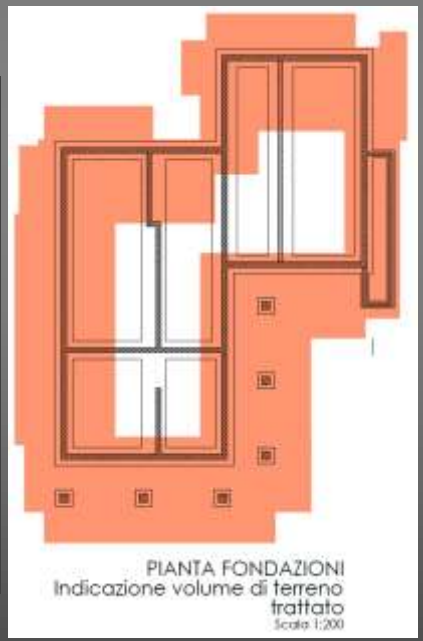




Costo intervento trattamento di compaction grouting (112 colonne)
90.000€

Spessore medio trattato 5 m
Proiezione in pianta
area trattata circa 400mq

Costo medio: 45 €/mc di terreno trattato



(importo interamente finanziato dalla Regione Emilia Romagna nell'ambito della ricostruzione Post Sisma)

Interventi per il consolidamento dei terreni soggetti a liquefazione – Determinazioni Regione Emilia Romagna

Atto del Dirigente a firma unica:	DETERMINAZIONE n° 12418 del 02/10/2012
Proposta:	DPG/2012/13201 del 02/10/2012
Struttura proponente:	SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DIREZIONE GENERALE AMBIENTE E DIFESA DEL SUOLO E DELLA COSTA
Oggetto:	APPROVAZIONE DEGLI ELABORATI CARTOGRAFICI CONCERNENTI LA DELIMITAZIONE DELLE AREE NELLE QUALI SI SONO MANIFESTATI GRAVI EFFETTI DI LIQUEFAZIONE A SEGUITO DEGLI EVENTI SISMICI DEL 20 E 29 MAGGIO 2012 E DEGLI INDIRIZZI PER INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI
Autorità emanante:	IL RESPONSABILE - SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI
Firmatario:	RAFFAELE PIGNONE in qualità di Responsabile di servizio

Definisce le aree dei Comuni di S.Agostino e Mirabello colpite da liquefazione

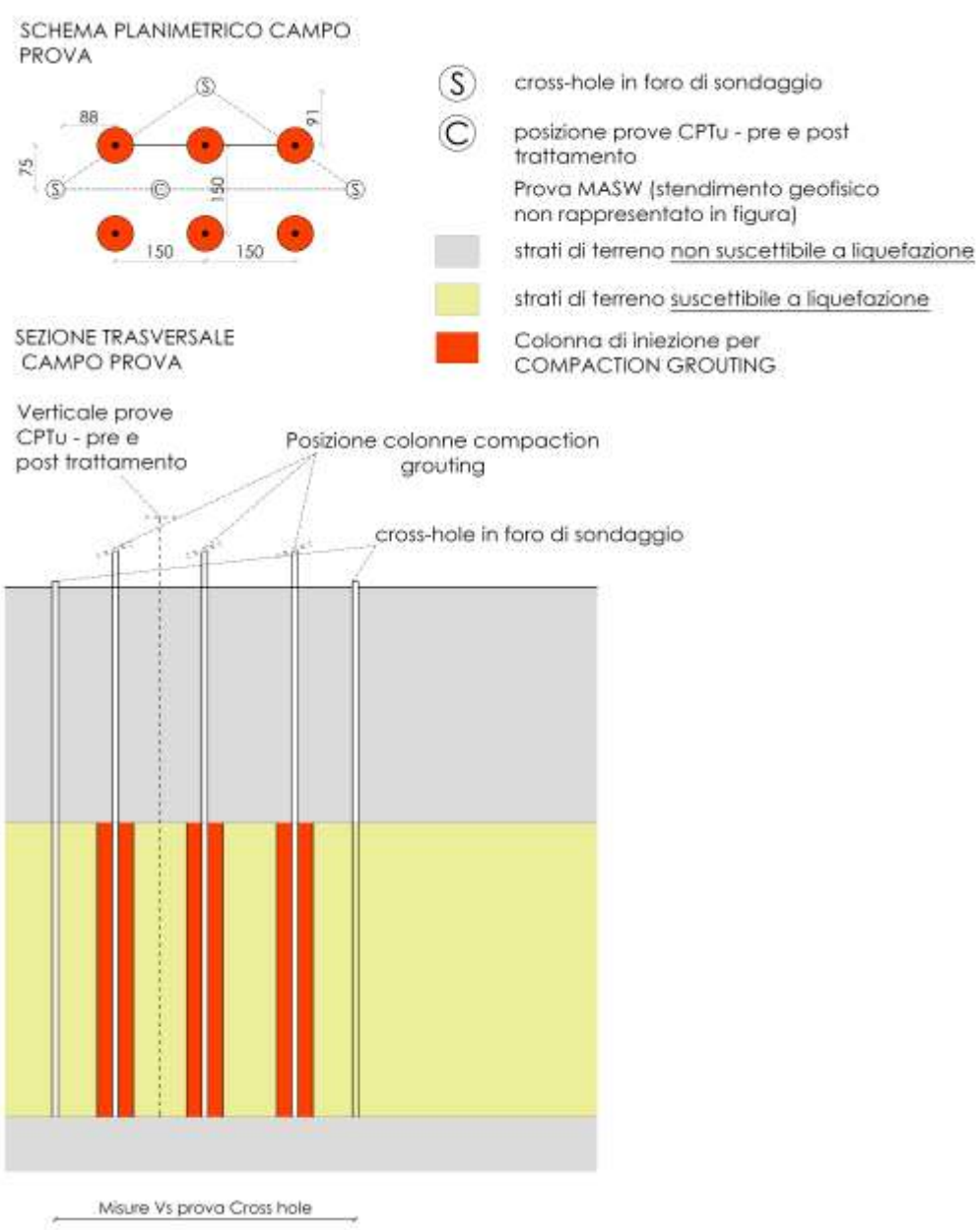
Indica gli interventi ammessi per il consolidamento delle dei terreni

Interventi per il consolidamento dei terreni soggetti a liquefazione – Determinazioni Regione Emilia Romagna

Atto del Dirigente a firma unica:	DETERMINAZIONE n° 1105 del 03/02/2014
Proposta:	DPG/2014/1391 del 03/02/2014
Struttura proponente:	SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DIREZIONE GENERALE AMBIENTE E DIFESA DEL SUOLO E DELLA COSTA
Oggetto:	APPROVAZIONE DI "INDICAZIONI SULLA DOCUMENTAZIONE TECNICA DA PRODURRE A SUPPORTO DELLA RICHIESTA DI CONTRIBUTI PER INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO DI FONDAZIONE IN CASO DI RIPARAZIONE, RIPRISTINO CON MIGLIORAMENTO SISMICO O DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE DI EDIFICI DICHIARATI INAGIBILI CHE ABBIANO RIPORTATO DANNI DA LIQUEFAZIONE, A SEGUITO DELLA SEQUENZA SISMICA CHE HA INTERESSATO LA PIANURA EMILIANA NEL MAGGIO-GIUGNO 2012" .
Autorità emanante:	IL RESPONSABILE - SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI
Firmatario:	RAFFAELE PIGNONE in qualità di Responsabile di servizio

- Definisce le tipologie di indagini richieste per la definizione del modello geotecnico
- Definisce le tipologie di indagini finalizzate alla Progettazione degli interventi

Edificio Oggetto di Intervento, campo prova



Iniezione di boiacca cementizia con acqua e cemento 32.5 in rapporto 1:1

Pressione di iniezione 1.8-3 bar
Volume di boiacca iniettato: 1.4 mc per ogni colonna di trattamento

Diametro colonna di trattamento reso: 60 cm

Interasse colonne di trattamento 1.5m

Costo campo prova

Costo colonne di trattamento 4800€
Costo indagini pre-post trattamento: 16.600€

(importo interamente finanziato dalla Regione Emilia Romagna nell'ambito della ricostruzione Post Sisma)

Campo prova, configurazione pre intervento

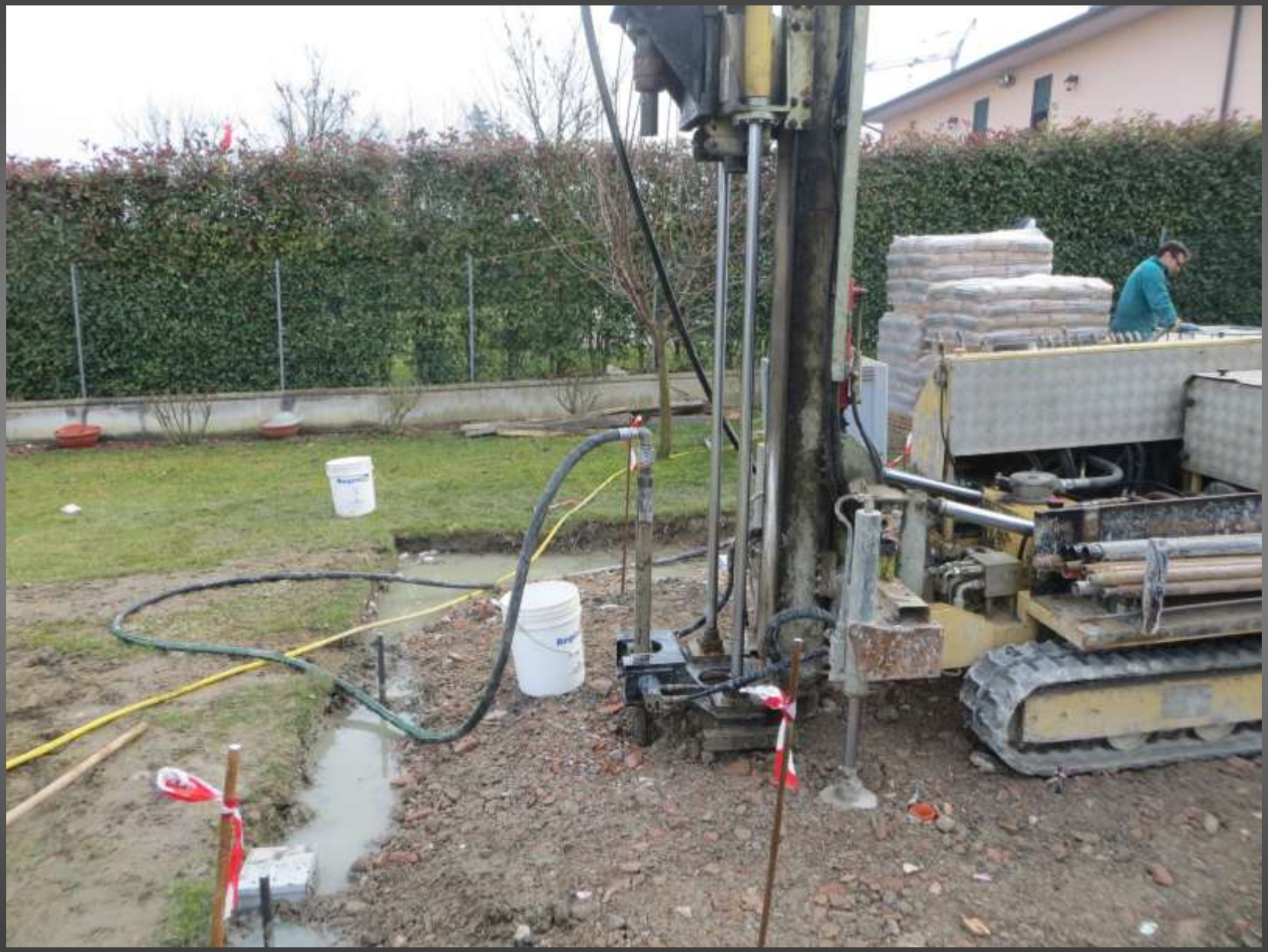


Campo prova, prove di cross-hole pre-intervento





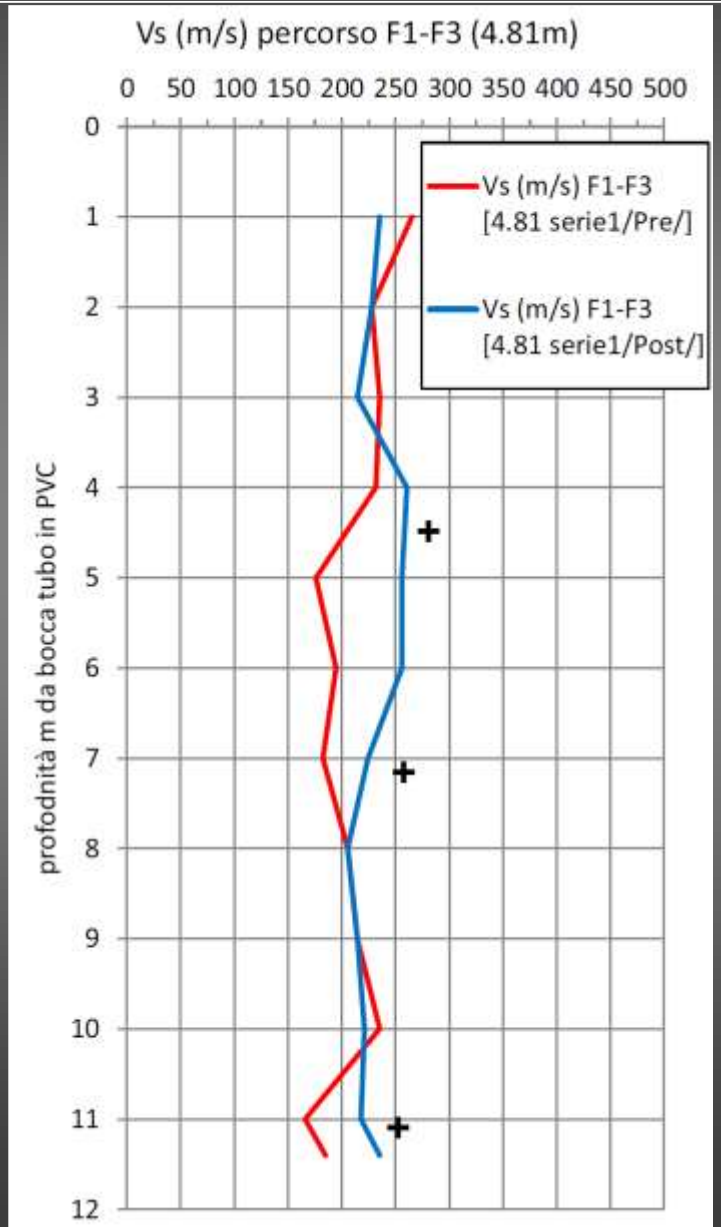
Campo prova, esecuzione delle colonne di trattamento

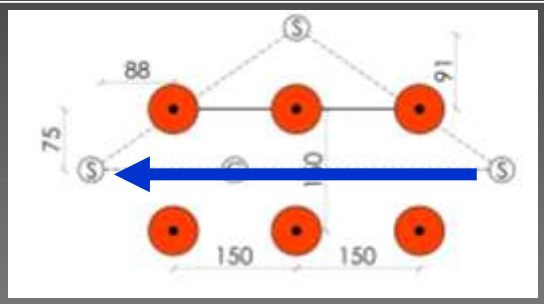


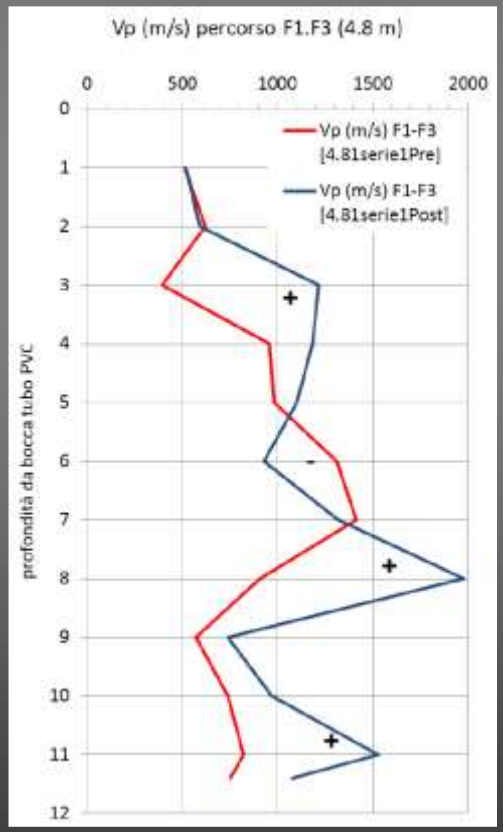
Campo prova, esecuzione delle colonne di trattamento



Risultati del campo prova: profilo di Vs pre e post trattamento da prove CROSS HOLE



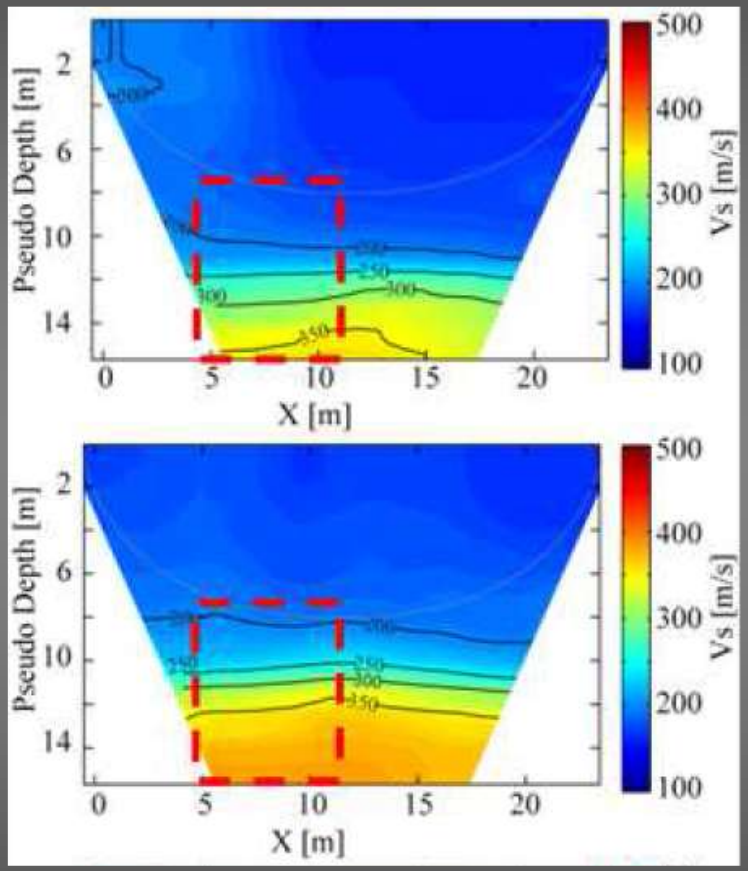




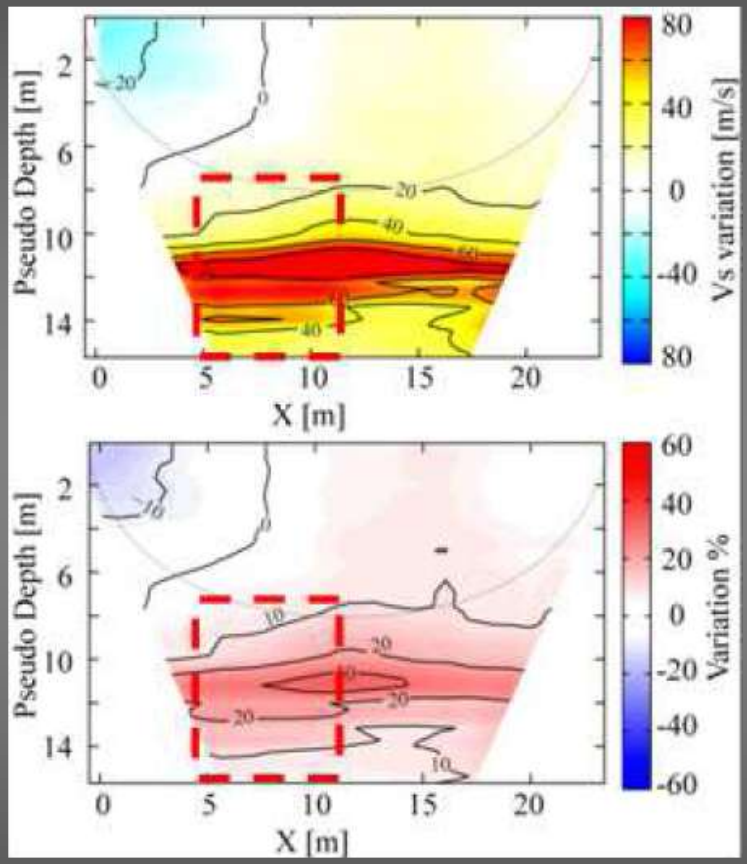
(Elaborazioni CROSS-HOLE
Dott. Geol. E. Farinatti
IN.DA.G.O snc)

Risultati del campo prova: profilo di Vs pre e post trattamento da prove MASW

Spessore di terreno trattato



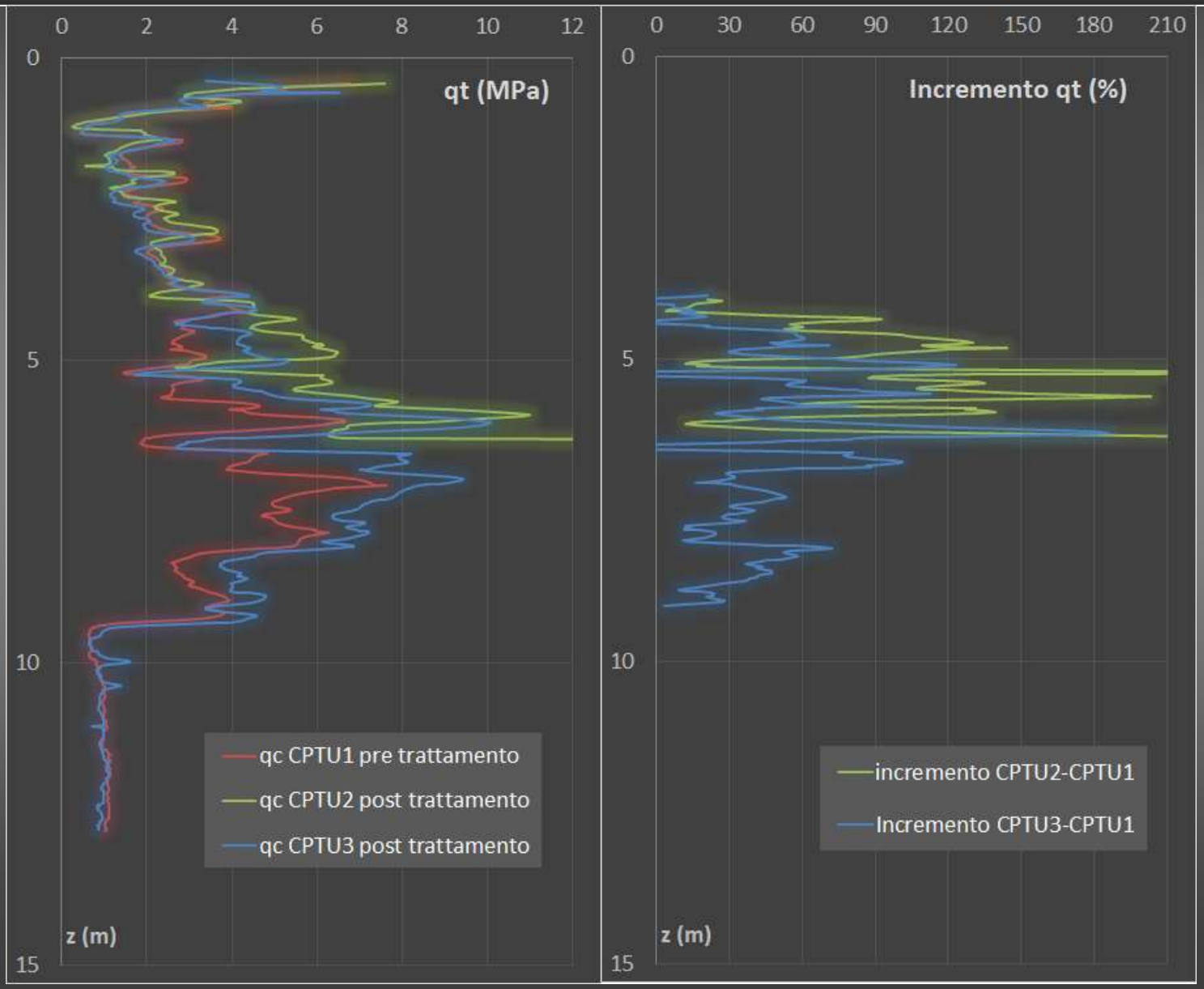
Pseudo sezione di Vs pre trattamento e post trattamento



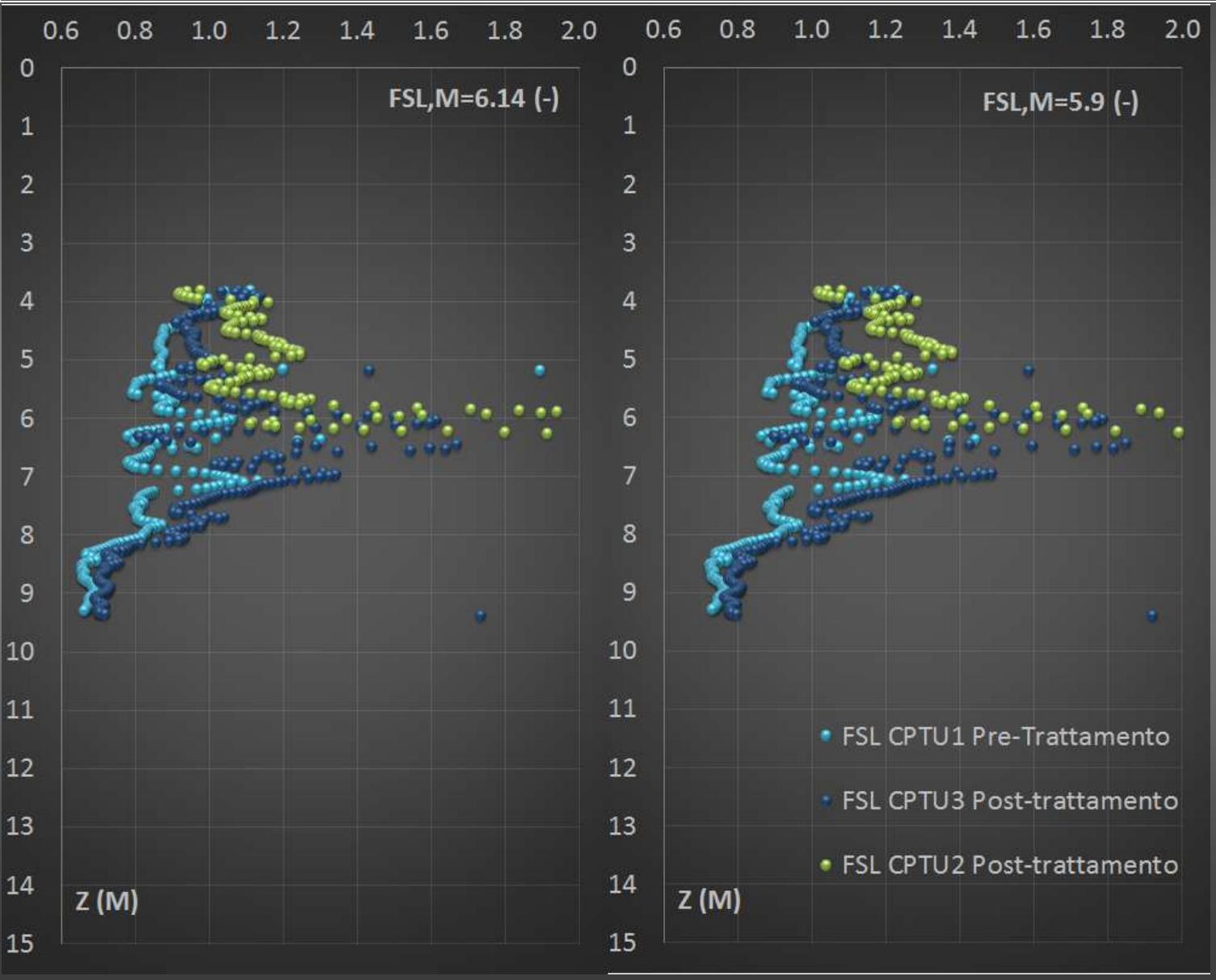
Pseudo sezione della variazione di Vs (pre/post trattamento) in termini assoluti e percentuali

(Elaborazioni MASW Dott. Geol. Nasser Abu Zeid – Università di Ferrara - Team Geofisica srl)

Risultati del campo prova: confronto CPTU pre e post trattamento



Risultati del campo prova: confronto CPTU pre e post trattamento



Potenziale di liquefazione dello strato trattato

Pre-trattamento (CPTU1)
$LP_{M=6.14} = 5.56$
$LP_{M=5.90} = 2.92$

Post-trattamento (CPTU3)
$LP_{M=6.14} = 3.21$
$LP_{M=5.90} = 1.46$

Risultati del campo prova: misure spostamenti al piano campagna

Zenith ingegneria s.r.l.
impresa spin-off dell'Università di Ferrara

Monitoraggio campo prove abitazione di Via Rossini, 25
San Carlo - Ferrara 2-3/03/2015

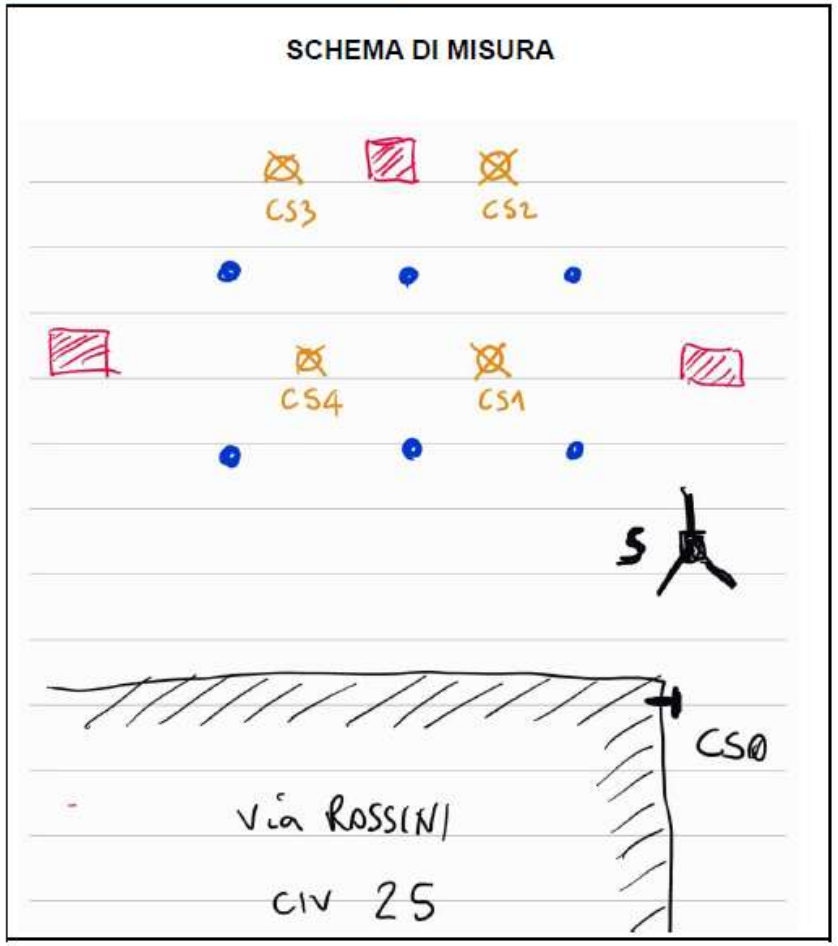
02.03.15	lett i	lett a	dislivello	quota
CS0	1,04038			10,00000
CS1		1,83971	-0,79933	9,20067
CS2		1,84820	-0,80782	9,19218
CS3		1,77295	-0,73257	9,26743
CS4		1,87189	-0,83151	9,16849

LETTURA dopo la prima iniezione

02.03.15	lett i	lett a	dislivello	quota	spostamenti [mm]
CS0	1,04071			10,00000	0,0
CS1		1,83985	-0,79914	9,20086	0,2
CS2		1,84853	-0,80782	9,19218	0,0
CS3		1,77307	-0,73236	9,26764	0,2
CS4		1,87185	-0,83114	9,16886	0,4

LETTURA all'ultimazione delle 6 iniezioni

03.03.15	lett i	lett a	dislivello	quota	spostamenti [mm]
CS0	0,88867			10,00000	0,0
CS1		1,68177	-0,79310	9,20690	6,2
CS2		1,69534	-0,80667	9,19333	1,1
CS3		1,61748	-0,72881	9,27119	3,8
CS4		1,72012	-0,83145	9,16855	0,1



Iniezioni di compaction grouting eseguite



Iniezioni di compaction grouting eseguite







Iniezioni di compaction grouting eseguite





Iniezioni di compaction grouting eseguite



Iniezioni di compaction grouting eseguite



Iniezioni di compaction grouting eseguite





Iniezioni di compaction grouting eseguite



Iniezioni di compaction grouting eseguite





Impresa Esecutrice Compaction Grouting: Infomap srl – Copparo (FE)

Considerazioni riassuntive

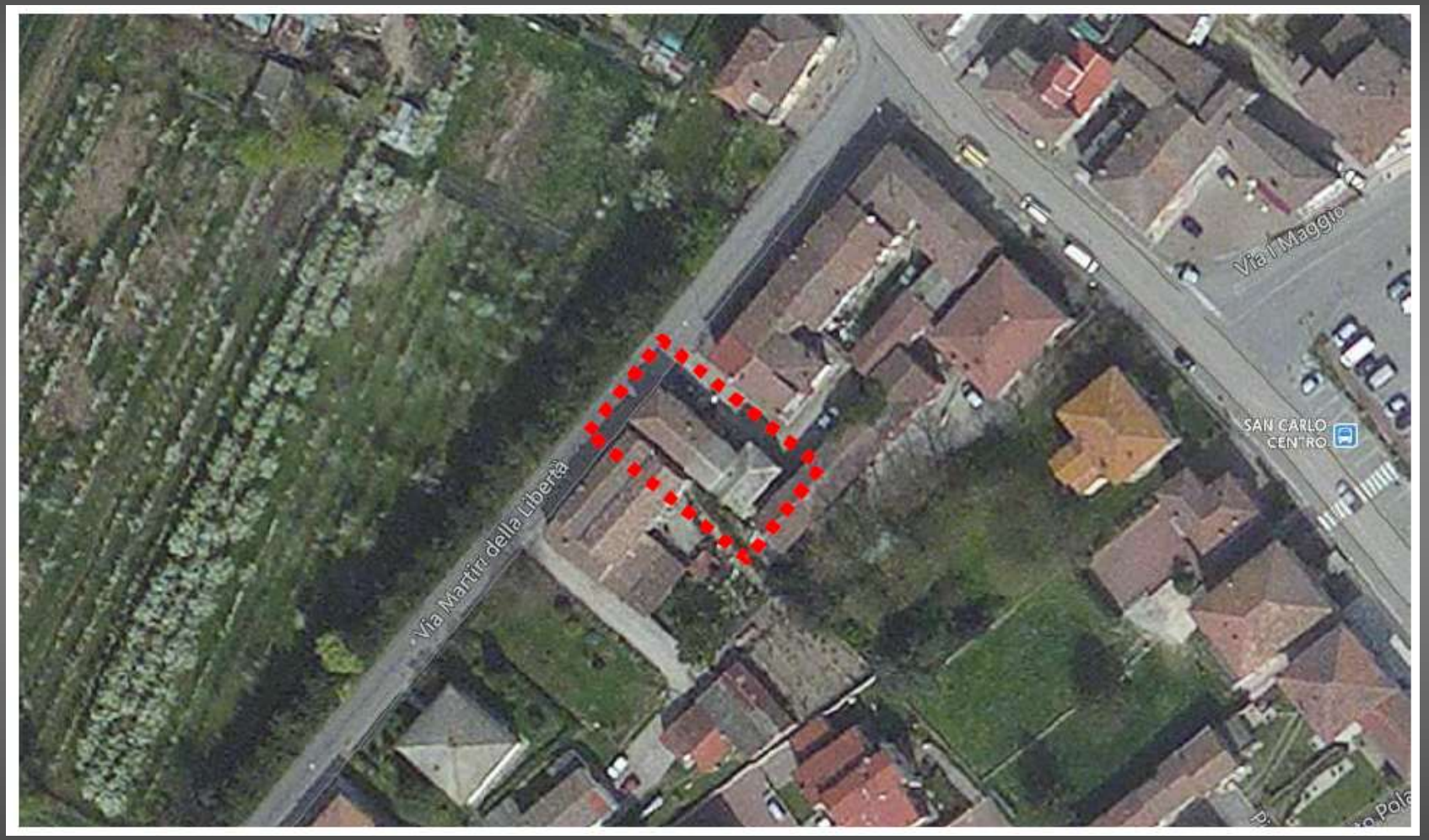
- Il campo prova ha mostrato come nel caso in esame con i parametri di trattamento utilizzati si ottiene un incremento medio di rigidezza e resistenza del terreno addensato dal trattamento pari a circa il 30% di quelle iniziali.
- Apparentemente la tecnica mostra dei limiti di efficacia al tetto e alla base dello strato a confine con litologie argillose deformabili.
- L'incremento di rigidezza e resistenza raggiunto permette di considerare l'intervento come di riduzione del rischio, con una riduzione del 40-50% del potenziale di liquefazione dello strato trattato.
- Nel campo prova si sono osservati solo modesti movimenti superficiali al piano campagna (dell'ordine di qualche millimetro) con un ricoprimento medio di 4 m rispetto allo strato trattato che ne ha permesso l'impiego nel fabbricato esistente.



INTERVENTO DI TIPO PASSIVO CON DRENI VERTICALI SU UN EDIFICIO RESIDENZIALE DANNEGGIATO DAL SISMA EMILIANO DEL 2012 A SAN CARLO (FE) PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE



Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)



Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)





Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)



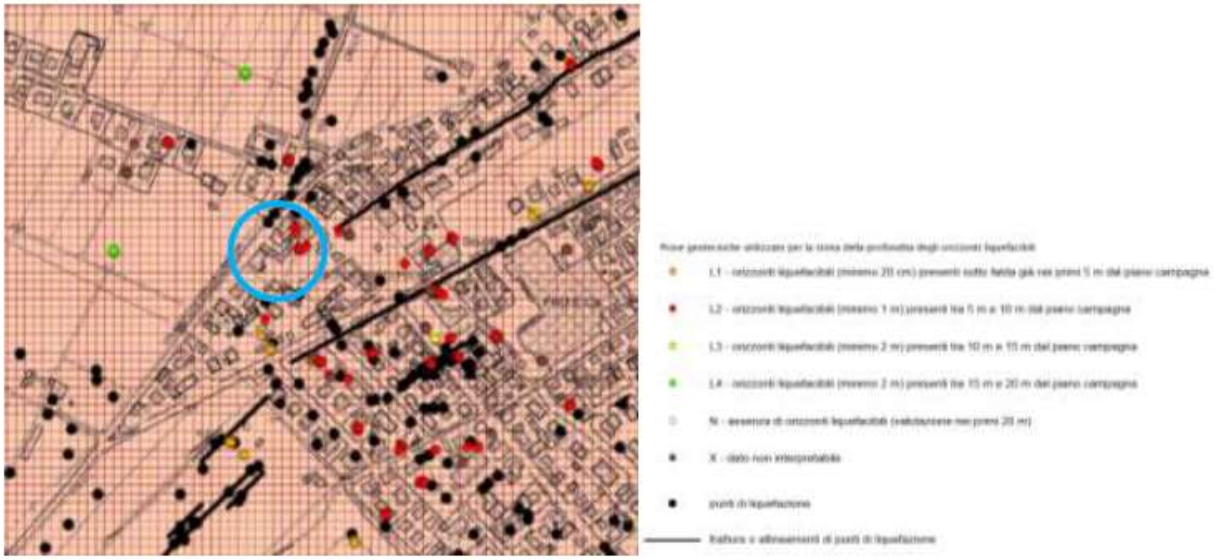


Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)

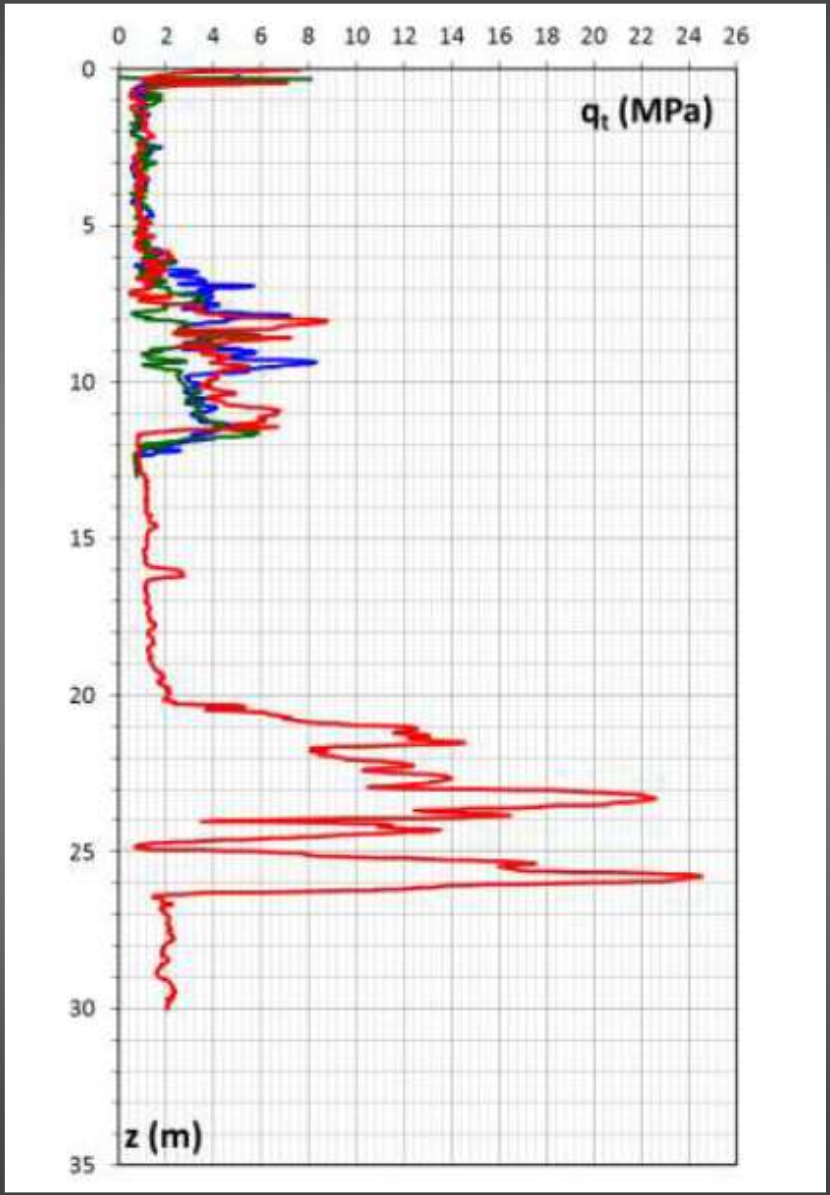




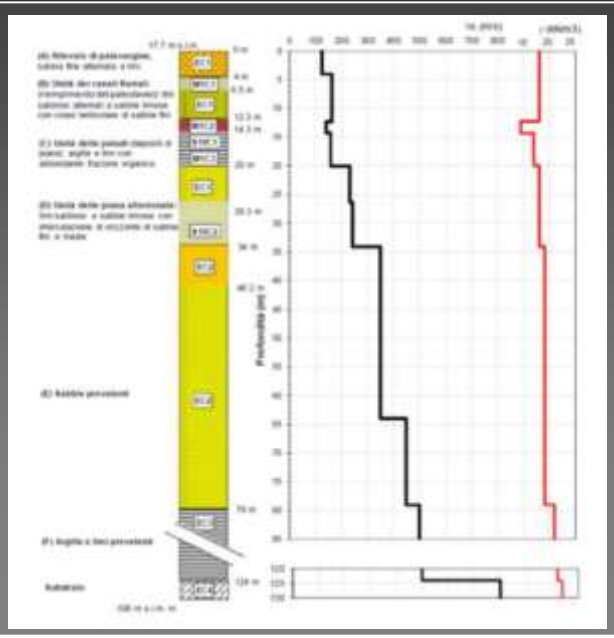
Rifluimenti di sabbia in Via Martiri della Libertà

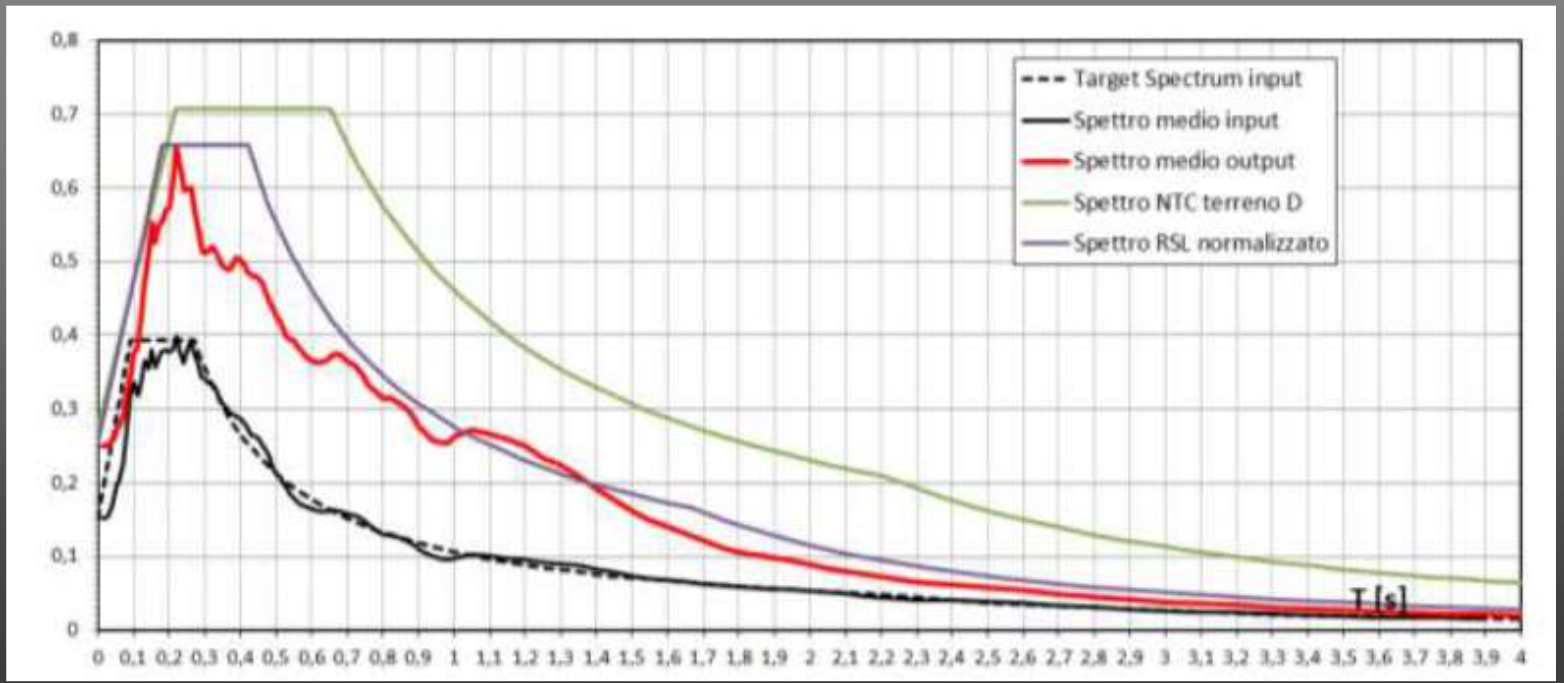


Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)

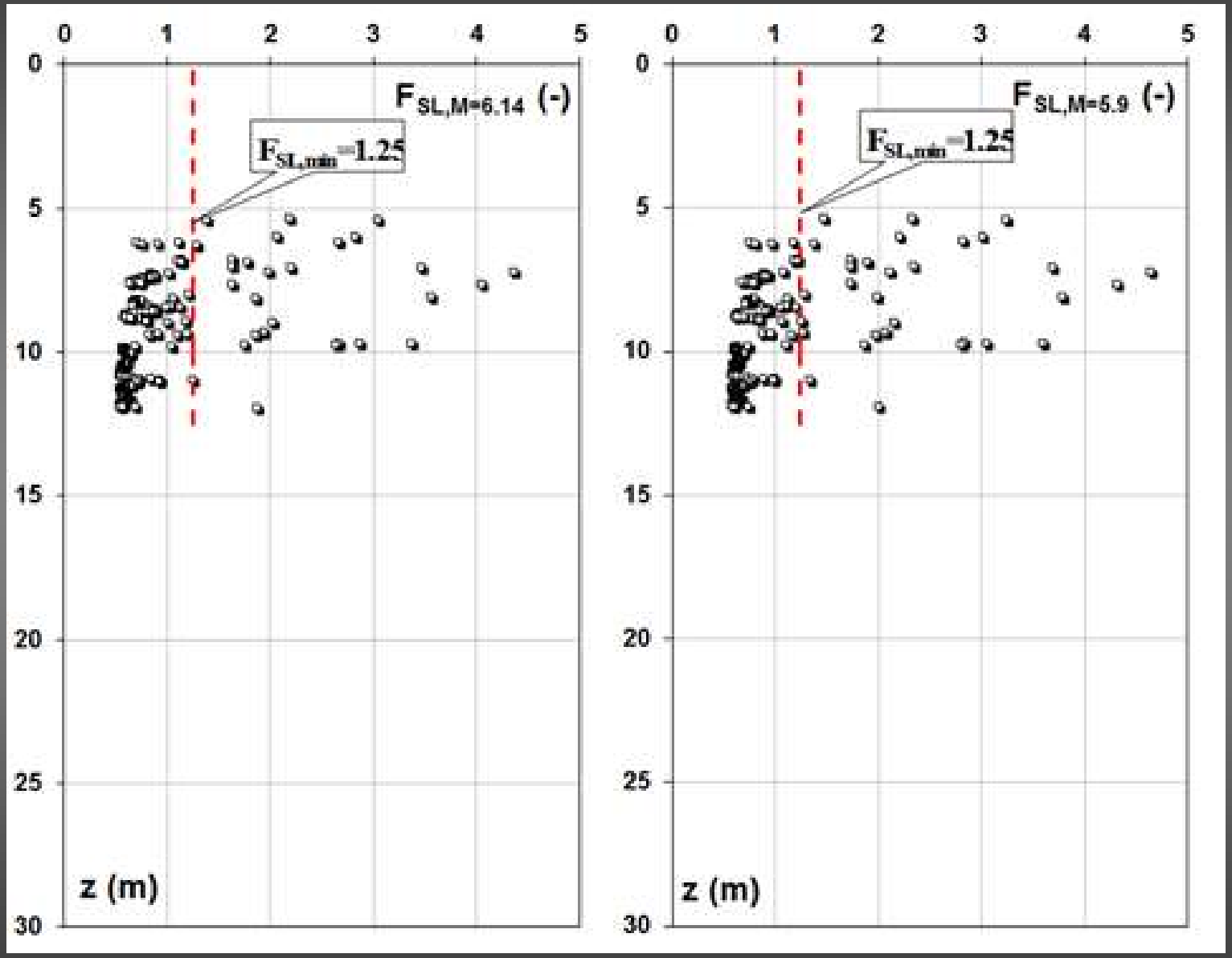


Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)

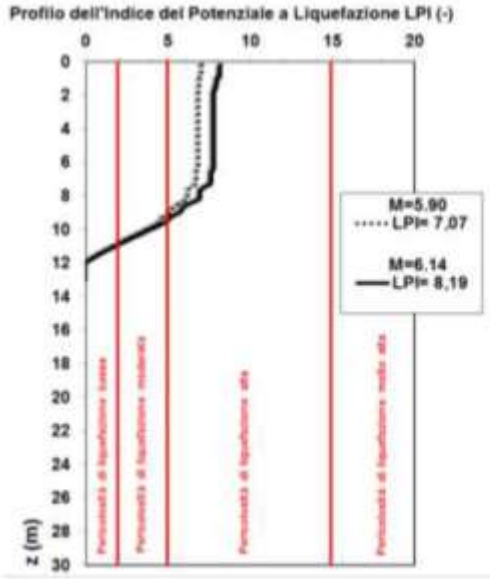




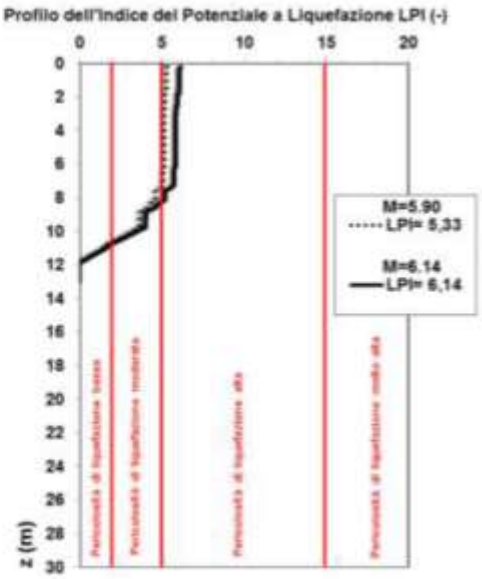
Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)



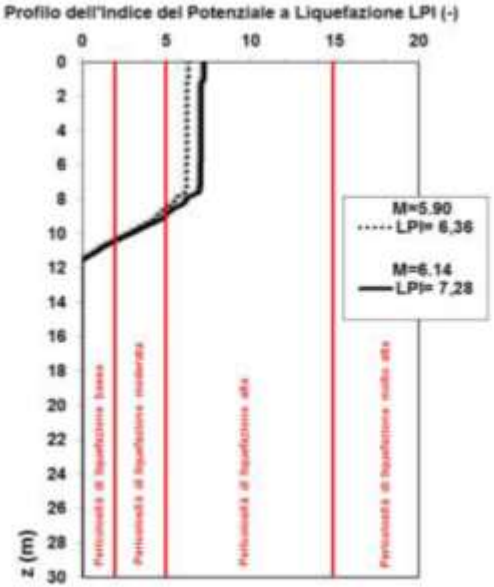
Edificio Oggetto di Intervento, San Carlo (FE)



CPTu1



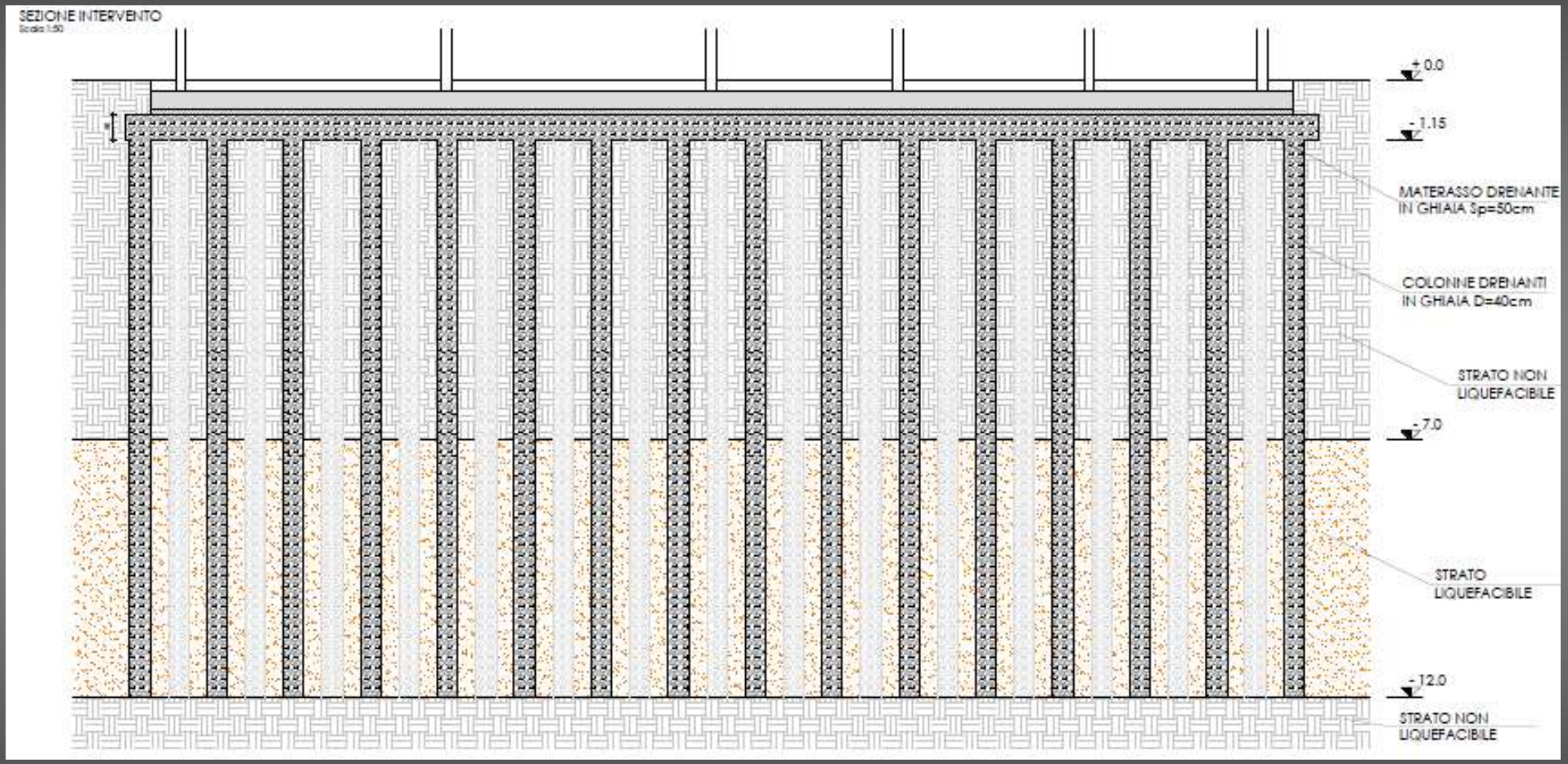
CPTu2



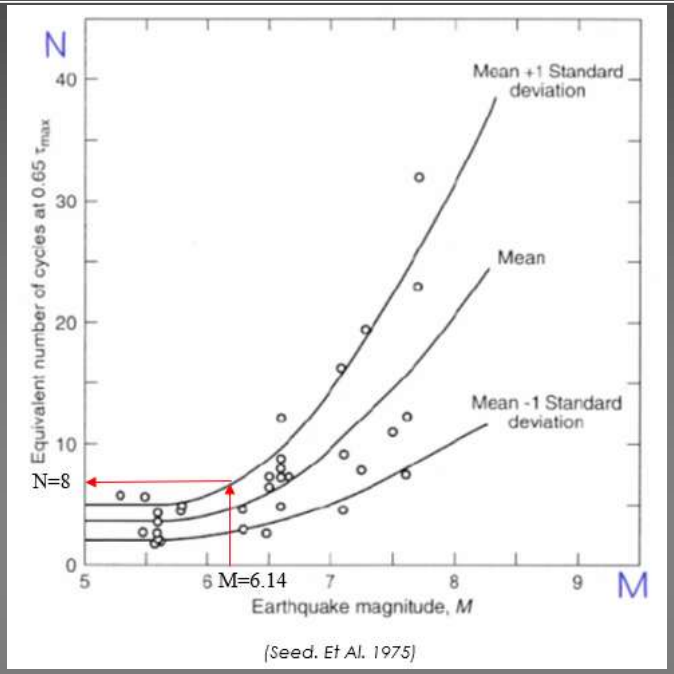
CPTu3

CPTu1 -	I_L=7.07 per M=5.9
	I_L=8.19 per M=6.14
CPTu2 -	I_L=5.33 per M=5.9
	I_L=6.14 per M=6.14
CPTu3 -	I_L=6.36 per M=5.9
	I_L=7.28 per M=6.14

Intervento passivo mediante colonne in ghiaia con funzione di dreni verticali

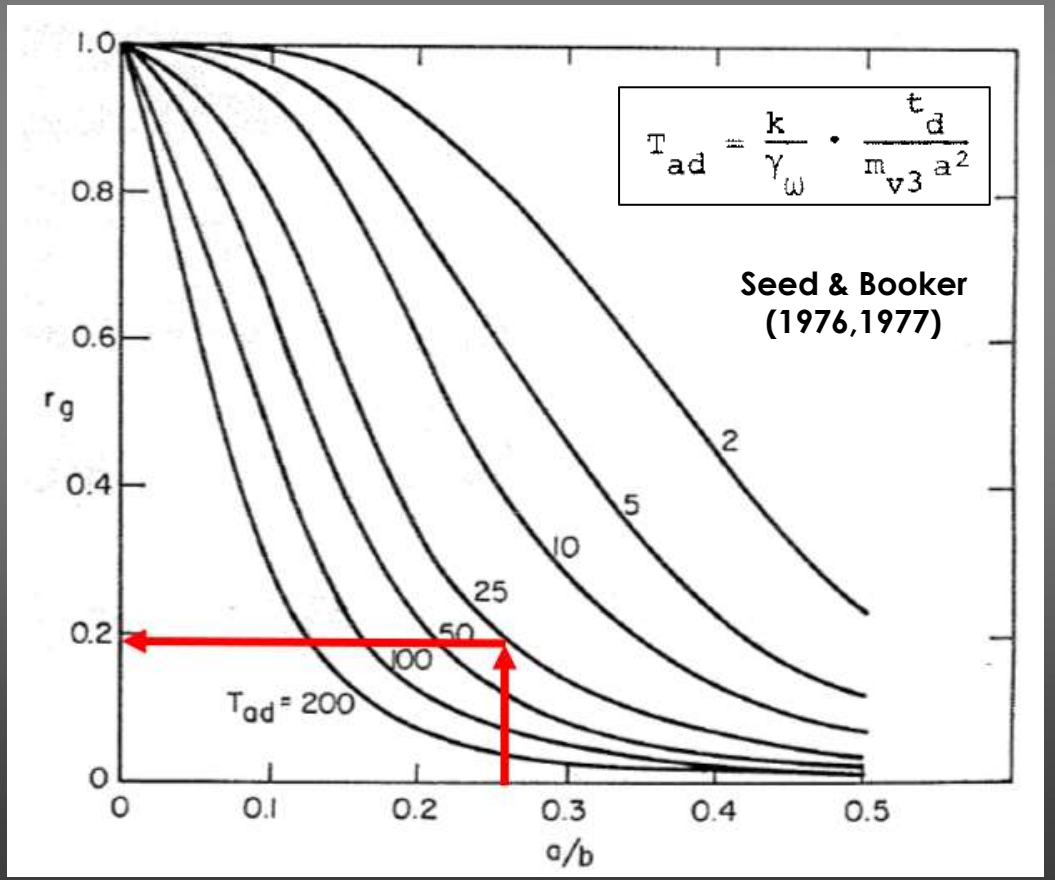


Intervento passivo mediante colonne in ghiaia con funzione di dreni verticali



Coefficiente di permeabilità del terreno soggetto a liquefazione: Kh = 5 x 10-5 m/s

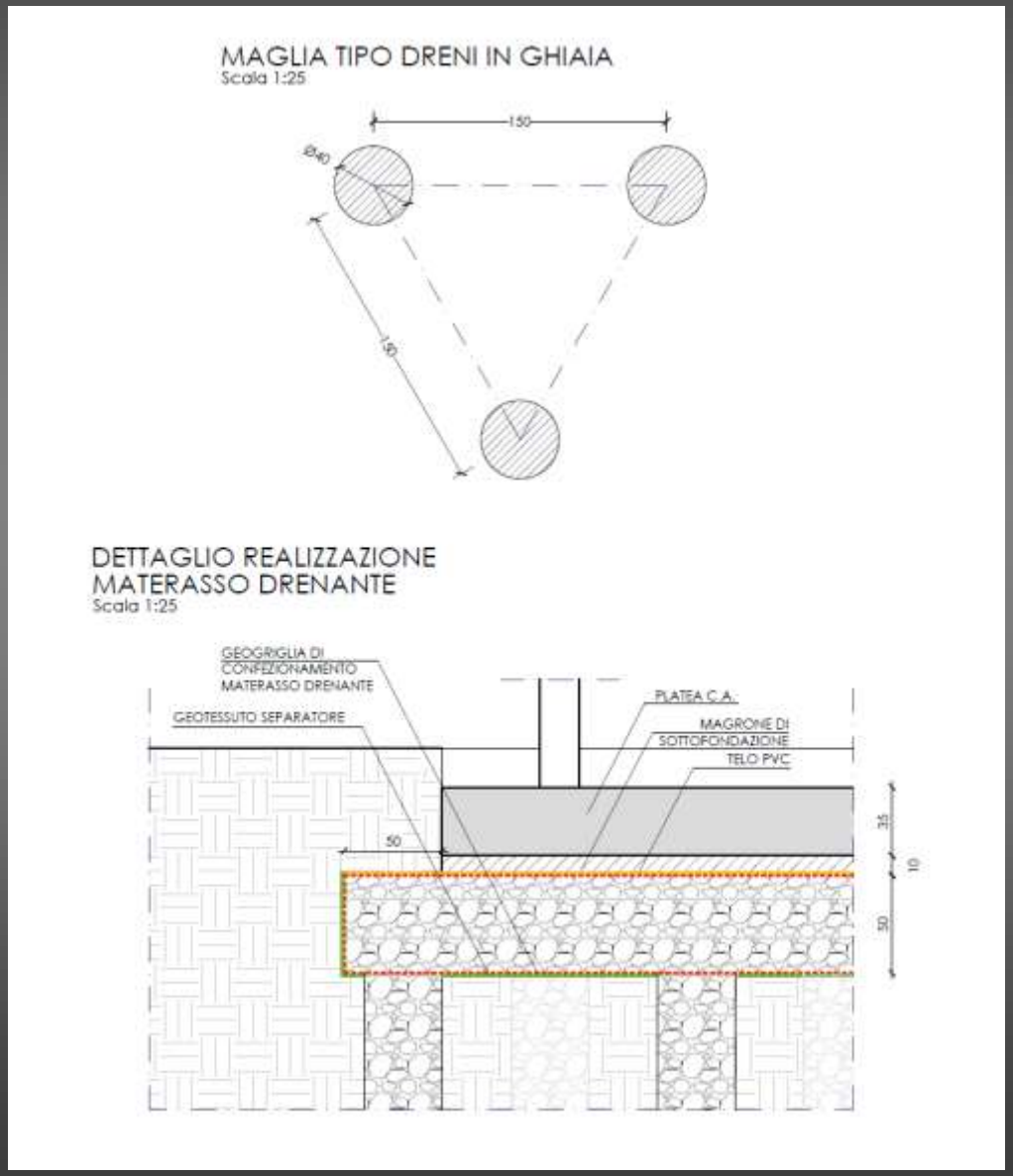
Coefficiente di compressibilità volumetrica del terreno: mv = 6 x 10-5 m2/kN



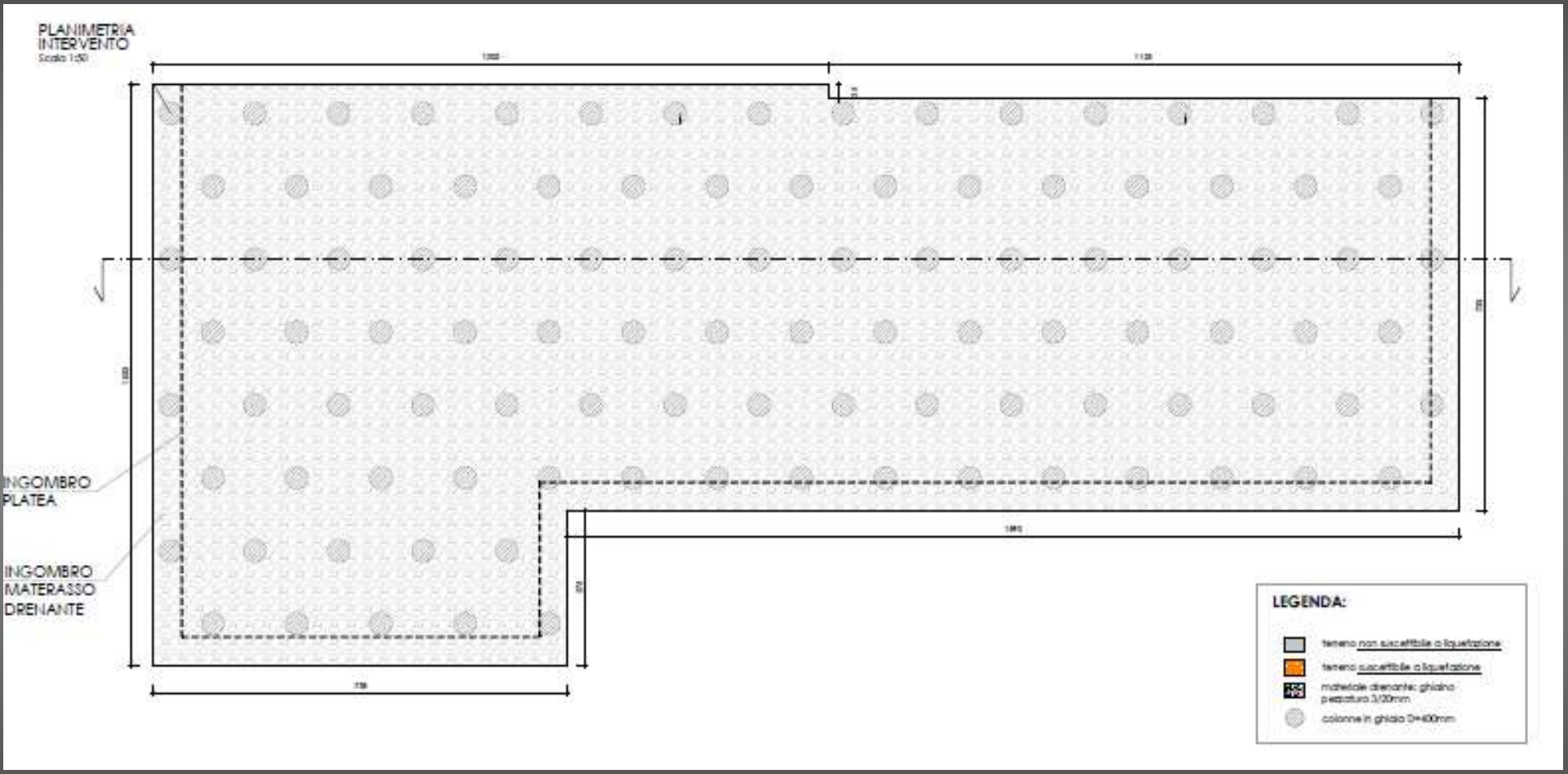
Durata del terremoto:
td = 20 sec definito sulla base delle registrazioni sismiche degli eventi del 2012 (valore assunto in maniera estremamente cautelativa data che la durata di picco risulta essere decisamente inferiore)

Raggio del dreno:
a = 0.2 m (dreni in ghiaia installati mediante trivellazione, di diametro pari a 0.4m)
Raggio di influenza del dreno:
b = 0.75 m (metà dell'interasse previsto della maglia triangolare con lato pari a 1.5m)

Intervento passivo mediante colonne in ghiaia con funzione di dreni verticali

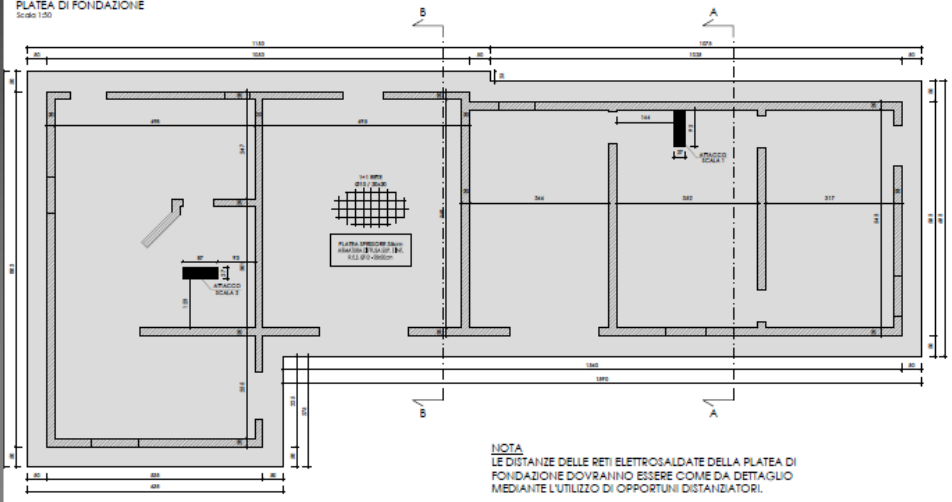


Intervento passivo mediante colonne in ghiaia con funzione di dreni verticali



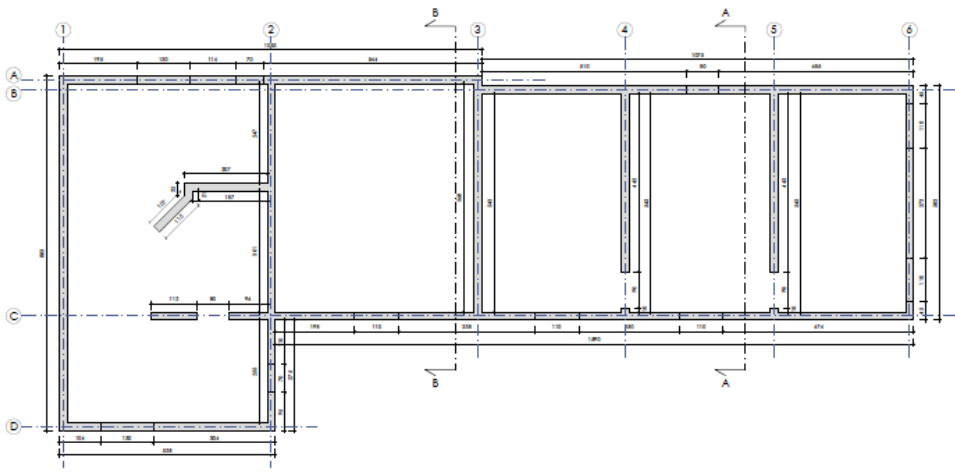
Nuova struttura rigida in elevazione

PLATEA DI FONDAZIONE
Scala 1:50

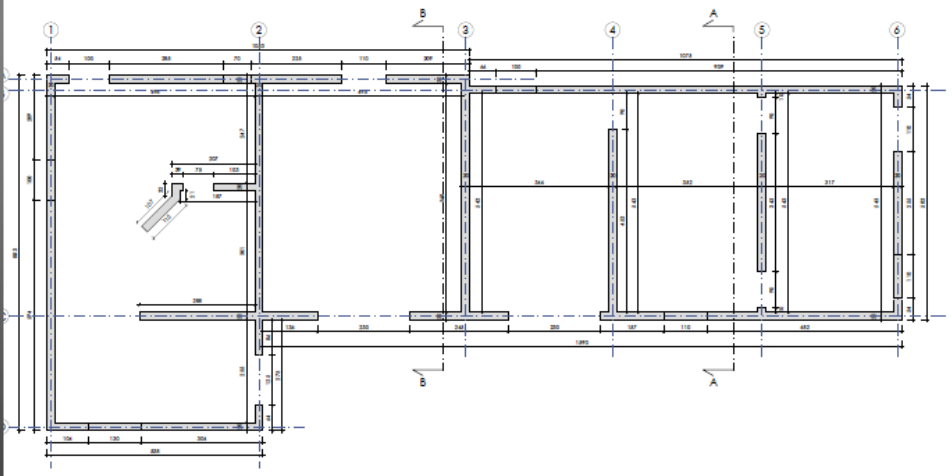


NOTA
LE DISTANZE DELLE RETI ELETTROSALDATE DELLA PLATEA DI FONDAZIONE DOVRANNO ESSERE COME DA DETTAGLIO MEDIANTE L'UTILIZZO DI OPPORTUNI DISTANZIATORI.

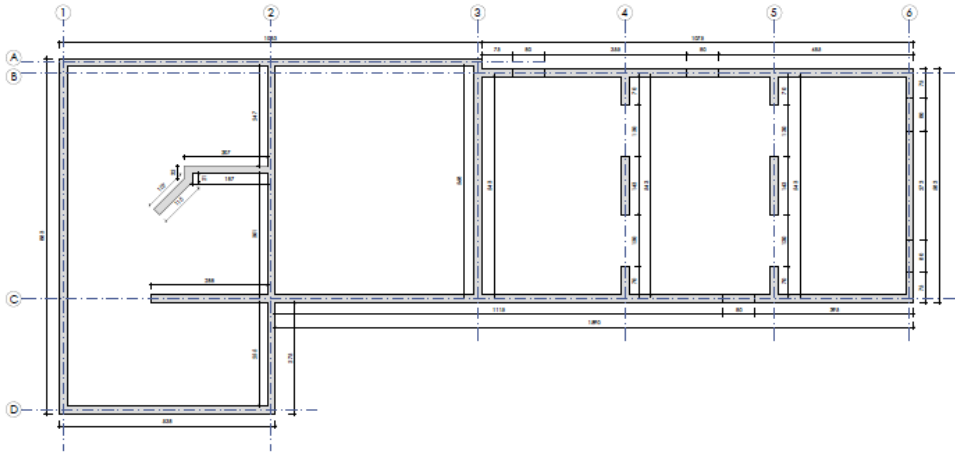
PARETI PIANO PRIMO
Scala 1:50



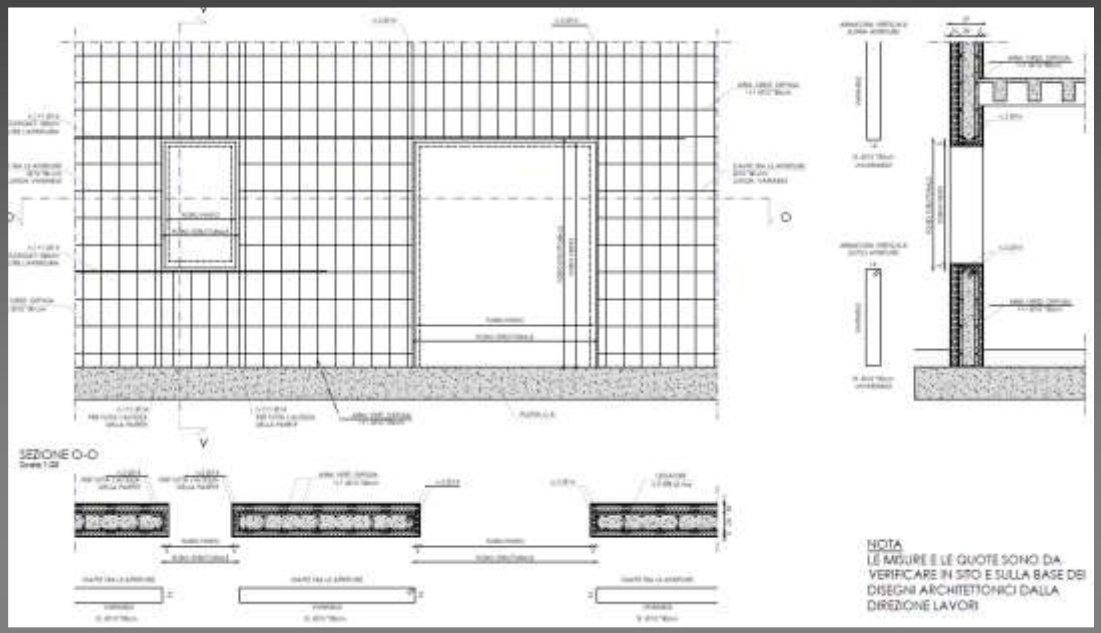
PARETI PIANO TERRA
Scala 1:50

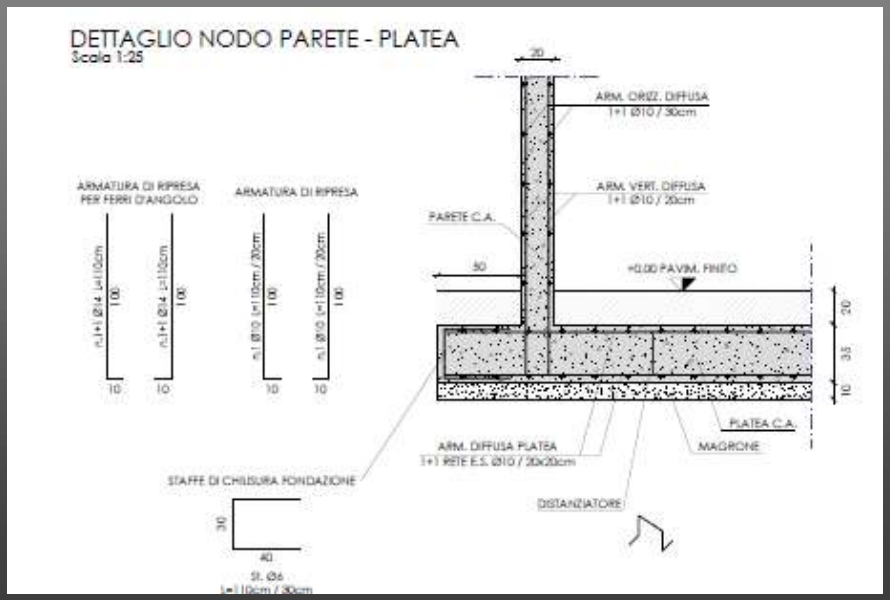


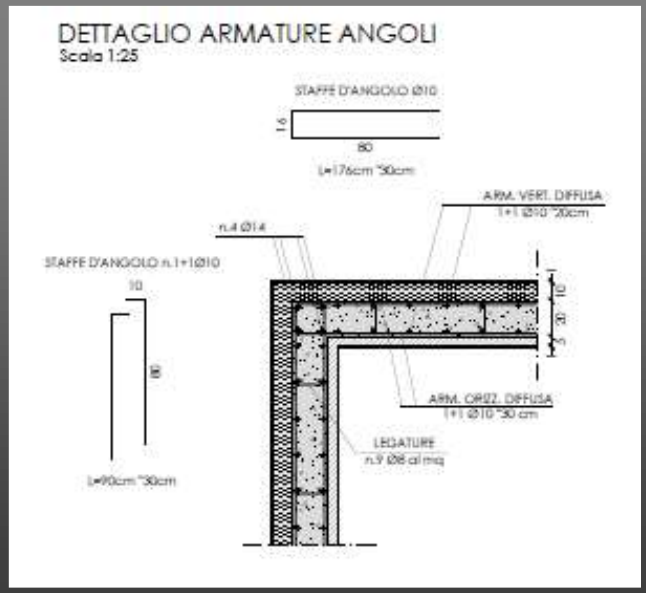
PARETI SOTTOTETTO
Scala 1:50



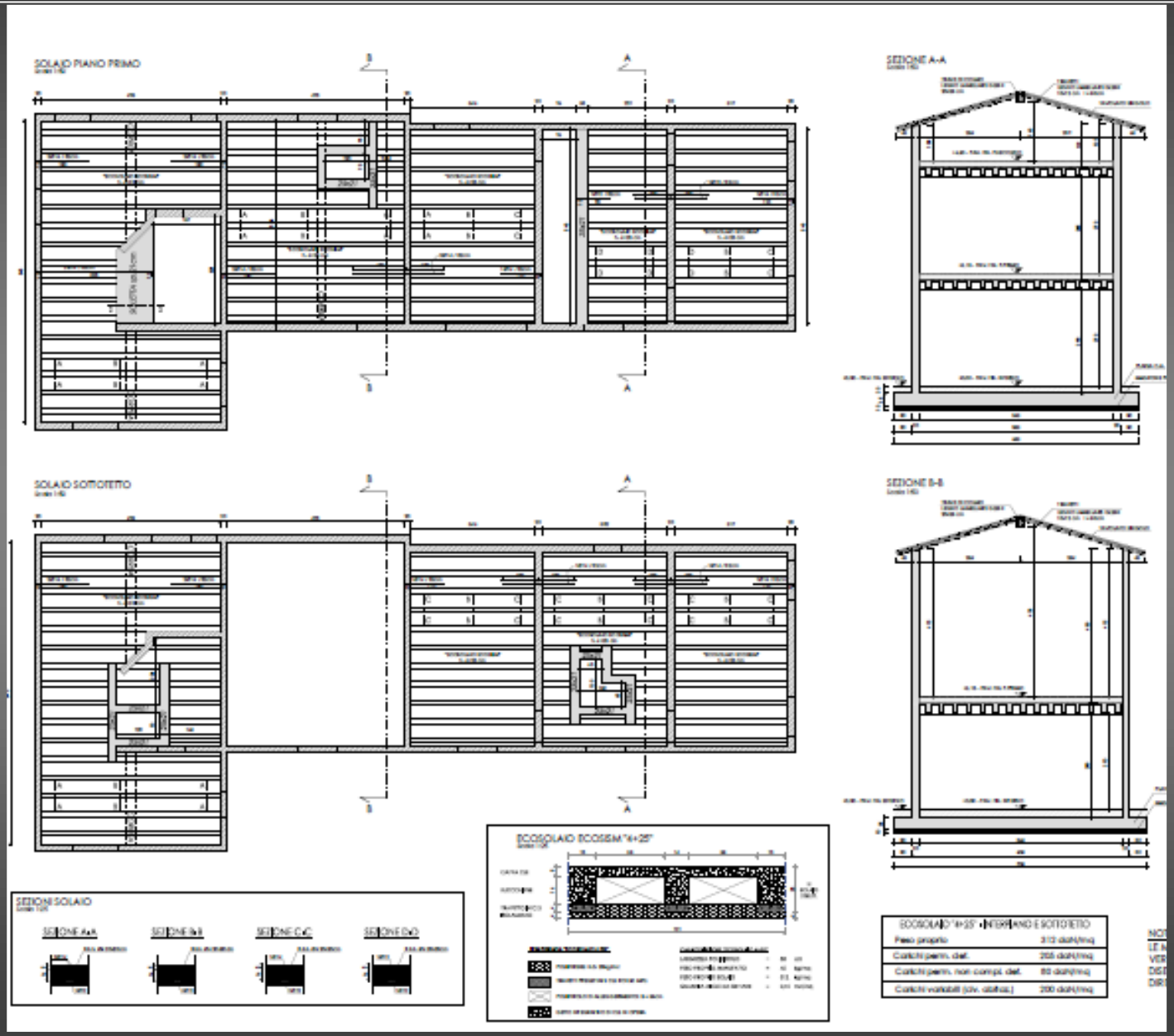
Nuova struttura rigida in elevazione







Nuova struttura rigida in elevazione



Lavorazioni in cantiere



Lavorazioni in cantiere





Lavorazioni in cantiere



Lavorazioni in cantiere



Lavorazioni in cantiere





Lavorazioni in cantiere





INTERVENTO DI TIPO ATTIVO CON COLONNE DI GHIAIA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE



Colonne in ghiaia vibroinfisse



Colonne in ghiaia vibroinfisse



Colonne in ghiaia vibroinfisse



Colonne in ghiaia vibroinfisse



Colonne in ghiaia vibroinfisse



Colonne in ghiaia vibroinfisse



Colonne in ghiaia vibroinfisse

