

REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Atti amministrativi

GIUNTA REGIONALE

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

Luogo di adozione: BOLOGNA data: 02/10/2012

SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI IL RESPONSABILE

Premesso che

- gli eventi sismici del 20 e del 29 Maggio 2012 hanno causato vistosi effetti di liquefazione in corrispondenza di canali abbandonati dei fiumi Secchia, Panaro, Reno e Po in un'area estesa tra il settore occidentale della Provincia di Ferrara e l'attuale corso del fiume Secchia;
- i fenomeni di liquefazione hanno assunto particolare rilevanza nei centri abitati di San Carlo, frazione del Comune di Sant'Agostino, e di Mirabello (provincia di Ferrara), dove gli effetti secondari di post-liquefazione hanno reso temporaneamente inagibili alcuni edifici, tratti di strade e le reti di servizi presenti;
- a seguito della riunione tenuta a Sant'Agostino il giorno 26/5/2012 e degli accordi intercorsi tra il Presidente della Regione Emilia-Romagna e il Direttore dell'Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento della Protezione Civile è stato costituito un gruppo di lavoro interdisciplinare per la valutazione degli effetti di liquefazione a seguito del sisma del 20/5/2012 e 29/5/2012 (comunicazione del responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, prot. PG/2012/0134978 del 31 maggio 2012);
- il coordinamento del gruppo è stato affidato al dott. Raffaele Pignone, responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, e al prof. ing. Mauro Dolce, direttore dell'Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento della Protezione Civile, mentre il coordinamento tecnico è stato affidato al dott. Luca Martelli del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e al dott. Giuseppe Naso dell'Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento della Protezione Civile;

Considerato che questo Servizio ha tra le proprie competenze quelle in materia di gestione del sistema informativo regionale geologico e geotematico e che in

particolare realizza le cartografie geologiche e geotematiche, fra cui quelle relative alla valutazione della pericolosità sismica locale e microzonazione sismica;

Visti i rapporti del gruppo di lavoro sopra citato, consegnati al sindaco di Sant'Agostino nella riunione del 26/6/2012 (prot. PG/2012/1567860 del 26 giugno 2012) e al sindaco di Mirabello nella riunione del 2/8/2012 (prot. PG.2012.0189938 del 2 agosto 2012), nei quali erano, tra l'altro, individuate le aree di San Carlo, frazione del Comune di Sant'Agostino, e di Mirabello in cui sono stati osservati i maggiori effetti di liquefazione e si indicava l'opportunità di individuare tecniche di consolidamento del terreno per la mitigazione del rischio di liquefazione, oggetto di un successivo rapporto;

Visto il "Rapporto sugli interventi di mitigazione del rischio di liquefazione" redatto dai geotecnici del citato gruppo di lavoro afferenti al Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Ferrara e al Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, consegnato alla Regione Emilia-Romagna e al Dipartimento di Protezione Civile in data 31 luglio 2012, in cui sono indicate le tecniche di consolidamento del terreno ritenute più opportune, tenendo conto delle locali condizioni stratigrafiche e idrogeologiche, per i centri abitati di San Carlo, frazione di Sant'Agostino, e di Mirabello;

Vista la deliberazione di Giunta regionale n.2416 del 29 dicembre 2008 recante "Indirizzi in ordine alle relazioni organizzative e funzionali tra le strutture e sull'esercizio delle funzioni dirigenziali. Adempimenti conseguenti alla delibera 999/2008. Adeguamento e aggiornamento della delibera 450/2007.";

Attestata la regolarità amministrativa;

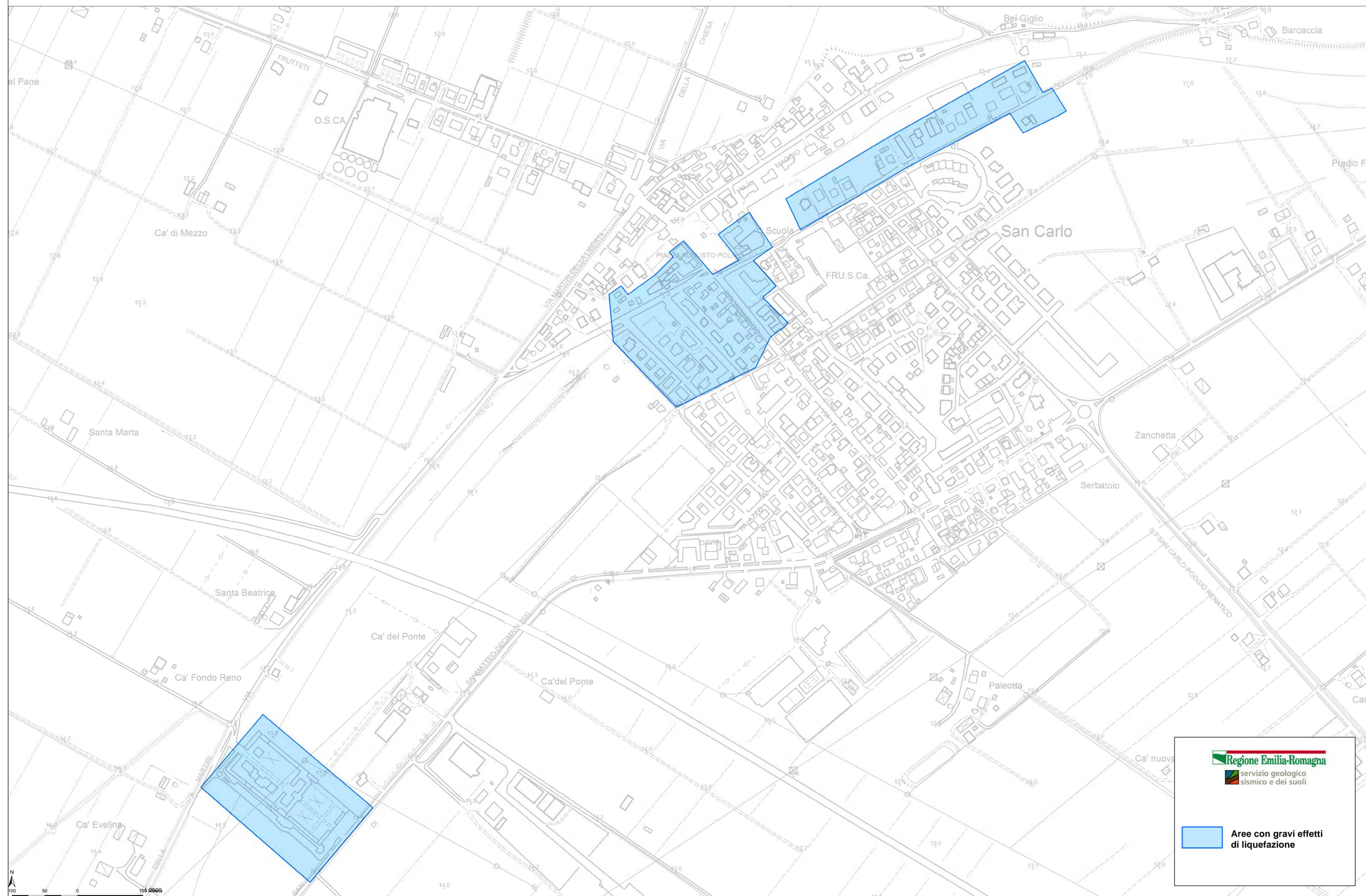
D E T E R M I N A

Per le motivazioni indicate in premessa che qui si intendono integralmente richiamate come parti integranti e sostanziali:

1. di approvare le mappe di San Carlo (Allegato 1), frazione del Comune di Sant'Agostino, e di Mirabello (Allegati 2 e 3), parti integranti e sostanziali della presente determinazione, dove sono cartografate le aree in cui sono stati osservati gravi effetti di liquefazione;
2. di approvare le "Indicazioni per gli interventi di

consolidamento del terreno di fondazione nelle aree di San Carlo, frazione del Comune di Sant'Agostino (FE), e Mirabello (FE) in cui sono stati osservati gravi effetti di liquefazione" (Allegato 4), parte integrante e sostanziale della presente determinazione.

RAFFAELE PIGNONE



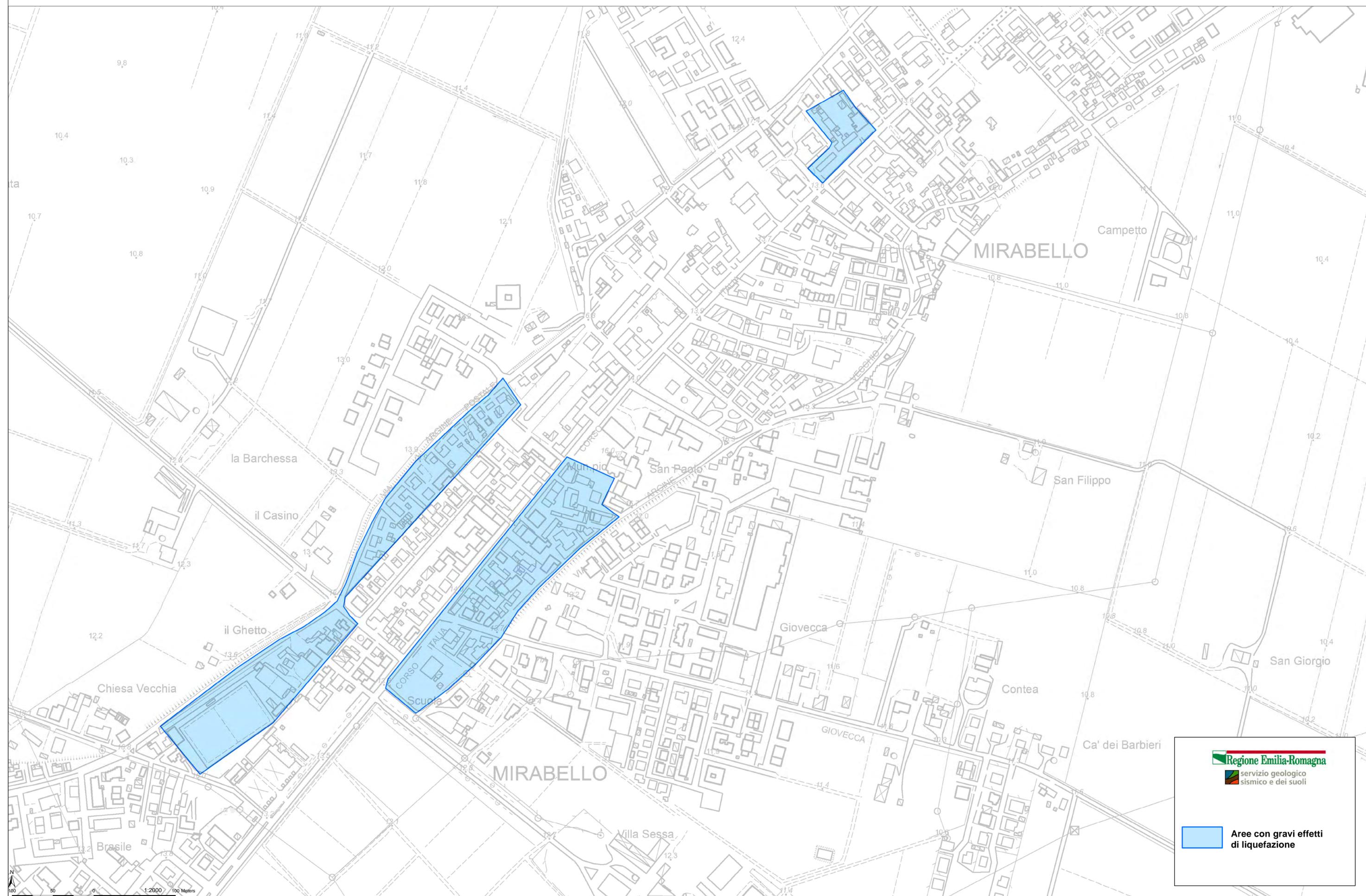
Regione Emilia-Romagna
servizio geologico
sismico e dei suoli

 Aree con gravi effetti di liquefazione



Regione Emilia-Romagna
 servizio geologico
 sismico e dei suoli

 Aree con gravi effetti di liquefazione



ALLEGATO 4

INDICAZIONI PER GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO DI FONDAZIONE NELLE AREE DI SAN CARLO, FRAZIONE DI SANT'AGOSTINO (FE), E MIRABELLO (FE) IN CUI SONO STATI OSSERVATI GRAVI EFFETTI DI LIQUEFAZIONE

1. PREMESSA

Gli eventi sismici del 20 e del 29 Maggio 2012 hanno causato vistosi effetti di liquefazione in varie località, localizzate in corrispondenza di canali abbandonati dei fiumi Secchia, Panaro, Reno e Po, in un'area estesa tra il settore occidentale della Provincia di Ferrara e l'attuale corso del fiume Secchia. I fenomeni di liquefazione hanno assunto particolare rilevanza nei centri abitati di San Carlo, frazione di Sant'Agostino, e di Mirabello, in provincia di Ferrara, in corrispondenza del paleocanale del Reno.

Per una valutazione approfondita degli effetti della liquefazione e per il ripristino della funzionalità degli edifici, della viabilità e delle reti di servizi temporaneamente inagibili, la Regione Emilia-Romagna (RER) e il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) hanno istituito un gruppo di lavoro interdisciplinare costituito da geologi, geotecnici e ingegneri (lettera del responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, prot. PG.2012.0134978 del 31 maggio 2012).

Sulla base della distribuzione e tipologia degli effetti e delle indagini disponibili, sono state eseguite indagini geotecniche e geofisiche di approfondimento.

I risultati delle indagini eseguite sono alla base dei rapporti pubblicati sul sito dedicato della RER (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>).

Nel presente documento si riferisce sugli interventi di mitigazione del rischio di liquefazione ritenuti più idonei sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche, idrogeologiche, geotecniche e morfologiche del territorio, che possono essere effettuati, alla scala dell'edificio, in fase di ricostruzione o adeguamento strutturale per evitare i danni che il ripetersi del fenomeno potrebbe causare sulle strutture civili ed industriali.

2. BREVI RICHIAMI SUI POSSIBILI EFFETTI DELLA LIQUEFAZIONE SUGLI EDIFICI

Con il termine 'liquefazione' si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione), osservati nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi durante terremoti significativi ($M > 5.5$), che hanno come elemento comune il fatto che, per effetto dell'instaurarsi di condizioni non drenate, si verifica un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali che può provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In un terreno pianeggiante, omogeneo o con stratificazioni orizzontali, in assenza di carichi esterni (ad esempio trasmessi da fondazioni di strutture o di rilevati), (condizioni di "free field"), le tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche sono assenti. Se nel sottosuolo, a

profondità inferiori a 15-20 m, vi sono strati di terreno liquefacibile (sabbie sciolte sotto falda), durante un forte terremoto può verificarsi il fenomeno della liquefazione ciclica, con deformazioni volumetriche di contrazione e quindi con cedimenti del terreno pressoché uniformi.

Se invece il terreno non è pianeggiante o è soggetto a carichi esterni, per l'equilibrio in condizioni statiche sono mobilitate tensioni di taglio. Durante il terremoto, negli strati liquefacibili si ha una riduzione di resistenza al taglio, non necessariamente l'annullamento della stessa, per l'incremento della pressione interstiziale. Al termine del terremoto le sovra-pressioni interstiziali si dissipano e la resistenza al taglio assume il valore residuo.

Se durante il terremoto le deformazioni di taglio sono limitate e se la resistenza al taglio residua è superiore al valore delle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche, la massa del terreno rimane stabile, si possono avere movimenti di pendio, cedimenti delle fondazioni e spostamenti laterali, che tuttavia si esauriscono in tempi brevi, con il dissiparsi delle sovra-pressioni interstiziali (mobilità ciclica).

Gli effetti della mobilità ciclica sugli edifici dipendono dall'entità e dalla distribuzione dei cedimenti assoluti e differenziali. In particolare se le strutture di fondazione sono ben collegate e rigide, e il carico trasmesso dall'edificio non è molto eccentrico, il cedimento è di traslazione rigida e uniforme, e non determina alcun danno strutturale se non ai collegamenti con le reti di distribuzione dell'acqua o del gas. Nel caso di edifici con fondazioni ben collegate e rigide ma con risultante del carico eccentrica (a causa per esempio di porzioni del fabbricato di diversa altezza) si può avere un movimento di roto-traslazione rigida che, a meno di valori molto elevati della rotazione, può compromettere la funzionalità più che la statica dell'edificio. Nel caso di edifici attigui di differente peso e rigidezza possono verificarsi scorrimenti verticali in corrispondenza della zona di giunzione. Se le fondazioni sono isolate e di scarsa rigidezza i cedimenti differenziali possono produrre lesioni nei tramezzi e nelle strutture in elevazione, o comunque determinare un'alterazione nello stato di tensione e quindi una riduzione del margine di sicurezza rispetto alla rottura anche senza lesioni evidenti (danno occulto).

Infine se il terreno non è pianeggiante o è soggetto a carichi esterni e se durante il terremoto le deformazioni di taglio sono elevate e la resistenza al taglio residua è inferiore al valore delle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche, si ha liquefazione con perdita della stabilità (fluidificazione). Durante e subito dopo il terremoto si possono verificare fenomeni vistosi di instabilità (affondamento di edifici pesanti e il loro ribaltamento, se la risultante del carico è eccentrica, galleggiamento di serbatoi interrati, scorrimento di frane). Inoltre, anche dopo che si sono dissipate le sovra-pressioni interstiziali, poiché la resistenza al taglio residua permane inferiore al valore necessario per l'equilibrio, i movimenti di pendio e i cedimenti delle fondazioni continuano. Gli effetti della fluidificazione sugli edifici possono essere devastanti o comunque gravissimi.

Naturalmente il verificarsi dell'uno o dell'altro fenomeno (mobilità ciclica o fluidificazione) dipende sia dalle condizioni geotecniche (fattori predisponenti) sia dalle caratteristiche dell'azione sismica (fattore scatenante).

Il danno strutturale agli edifici durante un evento sismico che ha prodotto mobilità ciclica del terreno di fondazione non sono dovuti solo al fenomeno della liquefazione ma anche alle azioni sismiche inerziali, alla rigidezza, resistenza e duttilità della struttura. La risposta sismica locale e l'interazione dinamica terreno-struttura dipendono dall'azione sismica al bedrock, dalle condizioni morfologiche, stratigrafiche e geotecniche e dalle caratteristiche geometriche e inerziali della struttura.

In particolare il maggiore scuotimento per un dato accelerogramma di input si ha per quegli edifici il cui periodo proprio è prossimo al periodo proprio del deposito di terreno. La liquefazione di uno strato di terreno modifica lo spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione del deposito e ne riduce le frequenze di massima amplificazione rispetto al caso di assenza di liquefazione.

3. EVIDENZE DI LIQUEFAZIONE E COMPORTAMENTO DEGLI EDIFICI DI SAN CARLO E DI MIRABELLO

Gli effetti della liquefazione a San Carlo e a Mirabello sono molto evidenti e molto estesi. Il territorio è pianeggiante, salvo i modesti rilievi degli argini.

Nei campi e negli spazi aperti anche nei centri abitati (piazze, campi sportivi e giardini pubblici e privati) in condizioni di free field si è sovente verificata liquefazione ciclica.

In corrispondenza degli edifici, ed in particolare perimetralmente ad essi, si è verificata mobilità ciclica. Gli edifici civili sono perlopiù costruzioni in muratura o in cemento armato della seconda metà del XX secolo a due o tre piani, di forma regolare in pianta e in altezza, con fondazioni superficiali. I piani interrati sono rari. Il grado di danneggiamento agli edifici civili è variabile, anche se complessivamente inferiore a quanto ci si sarebbe potuto attendere dal numero e dall'estensione areale delle manifestazioni (vulcanelli, crateri, rigonfiamenti e rotture del terreno, cedimenti, sollevamenti dei marciapiedi, spostamenti laterali, ecc. ...) e dal grande volume di terreno fuoriuscito. Molti edifici hanno subito cedimenti di traslazione rigida, talvolta anche di debole rotazione. Si sono creati giunti di distacco con costruzioni minori e strutturalmente deboli, adibite a garage, rimesse o deposito attrezzi, annesse alla costruzione principale. Tali costruzioni minori sono spesso gravemente danneggiate e inagibili. Sono diffusi i danni alle pavimentazioni del piano terra, ai tramezzi, ai collegamenti con le tubazioni, più rari i danni alle strutture resistenti, verticali e orizzontali.

Non risultano evidenze di fenomeni di fluidificazione.

4. PERICOLOSITÀ SISMICA, VULNERABILITÀ, ESPOSIZIONE E RISCHIO PER GLI EDIFICI ESISTENTI

Come è noto per pericolosità sismica di base si intende la probabilità che in campo libero (free field), su sito di riferimento rigido e in un prefissato intervallo di tempo, detto periodo di riferimento, si verifichi un evento sismico di entità pari ad un valore prefissato. La pericolosità sismica effettiva (P) in un sito dipende dalla pericolosità sismica di base, ma anche dalle modifiche dell'azione sismica attesa nei terreni stabili per effetto delle condizioni stratigrafiche, geotecniche, morfologiche e topografiche (risposta sismica locale) e dai fenomeni associati alla rottura nei terreni instabili (franosità e liquefazione). La pericolosità sismica di base è un fatto naturale su cui è impossibile intervenire. È però possibile intervenire per modificare la risposta sismica locale e per accrescere la resistenza al taglio dei terreni.

La vulnerabilità (V) è definita come il livello di danno atteso in un sito a seguito di un evento sismico di assegnata intensità.

L'esposizione (E), prima dell'evento è la quantità e qualità dei beni esposti, dopo l'evento esprime il valore delle perdite umane (morti, feriti e senzatetto), nonché delle perdite economiche, artistiche e culturali causate dal terremoto.

Il rischio sismico (R) è il prodotto di pericolosità sismica, vulnerabilità ed esposizione: $R = P \times V \times E$

Per mitigare il rischio associato alla liquefazione del terreno di edifici esistenti si può intervenire sulla pericolosità e sulla vulnerabilità.

Per ridurre la pericolosità di liquefazione si può intervenire sui fattori predisponenti, modificando le condizioni geotecniche con tecniche volte ad addensare il terreno, a variare le condizioni di drenaggio, a creare cementazione fra i grani, o a desaturare il terreno.

Per ridurre la vulnerabilità agli effetti della liquefazione si può intervenire sulle fondazioni, rendendole più rigide e capaci di schermare la struttura in elevazione dai cedimenti differenziali, oppure con pali di fondazione che trasferiscano il carico a strati profondi non liquefacibili.

5. IDENTIFICAZIONE DELLE AREE IN CUI SI RITIENE NECESSARIO INTERVENIRE

L'identificazione delle aree nelle quali si ritiene necessario intervenire è il risultato di analisi che hanno tenuto conto di:

1. indagini geotecniche e geofisiche e sintesi delle condizioni litostratigrafiche, idrogeologiche e morfologiche locali;
2. mappa dell'evoluzione storica dell'uso del territorio, con evidenziate le zone di paleo-alveo, colmata, argini naturali e artificiali, ecc. ...;
3. mappa degli edifici danneggiati e schede descrittive di ciascuno di essi, compresa la tipologia e la geometria delle fondazioni;
4. spessori e profondità degli strati liquefacibili.

6. METODICHE DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI EDIFICI ESISTENTI

Gli interventi di consolidamento dei terreni di fondazione possono essere distinti in trattamenti "attivi" e trattamenti "passivi".

6.1. Trattamenti "attivi"

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

Le tecnologie di intervento di tipo "attivo" per la mitigazione del rischio liquefazione in presenza di edifici esistenti devono utilizzare attrezzature di limitato ingombro che operino possibilmente solo all'esterno della struttura realizzando raggiere di perforazioni di piccolo-diametro sub-verticali o curvilinee direzionate o sub-orizzontali e tali da non produrre vibrazioni che compromettano la statica della costruzione.

Per i terreni alluvionali oggetto di studio, sono possibili differenti tipi di interventi. Ciascuno di essi presenta dei limiti e/o controindicazioni legati a diversi fattori quali, ad esempio, caratteristiche granulometriche e di permeabilità dei terreni, profilo stratigrafico, profondità e spessori degli strati liquefacibili, grado di miglioramento da ottenere, accessibilità alle zone di sottosuolo da trattare, ingombro delle apparecchiature, vibrazioni indotte in fase di lavorazione, costo dell'intervento, ecc.

Occorre sottolineare che 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.

Sulla base delle conoscenze sinora acquisite, con riferimento alle litologie di terreno sottostanti agli edifici, i metodi più idonei e sui quali esiste anche una esperienza maggiormente consolidata sono i seguenti:

6.1.a Iniezioni di permeazione con miscele leganti ("permeation grouting", Figura 1)

Lo scopo della tecnica è generare una leggera cementazione o coesione vera tra i grani del terreno facendo penetrare nei pori interstiziali una miscela "legante" opportunamente calibrata (es. soluzioni o sospensioni silicatiche). La cementazione provoca un aumento della resistenza a liquefazione, una riduzione della permeabilità ed un incremento della rigidità.

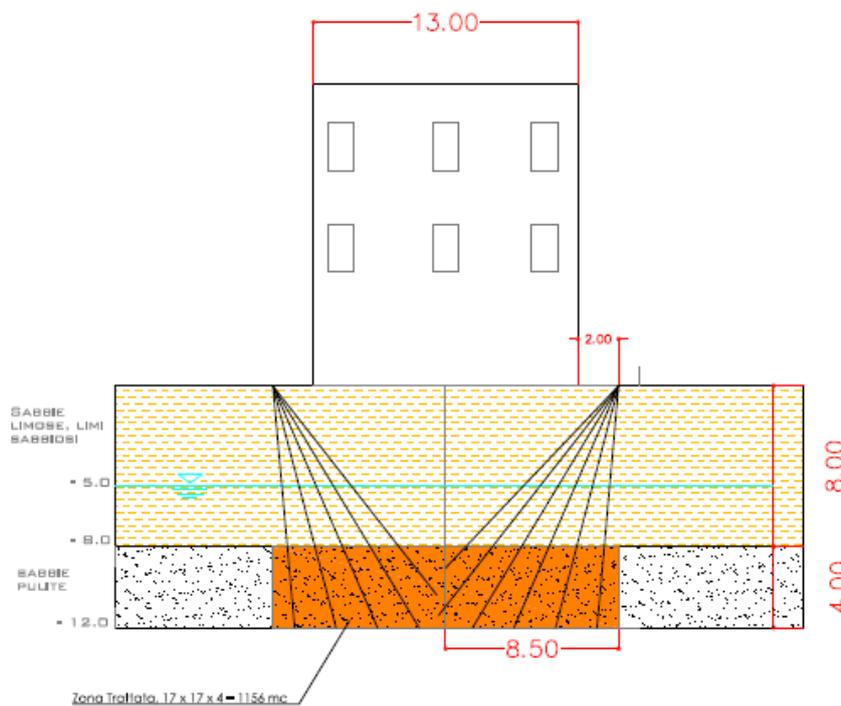


Figura 1. Schema trattamento edifici esistenti con permeazione di miscele leganti.

La riuscita del trattamento dipende dalla permeabilità dello strato di terreno e dalla penetrabilità della miscela all'interno dello strato. È quindi necessaria una accurata scelta del prodotto da iniettare che non deve spostare i grani di terreno (spiazzamento, fenomeni di claquage), ma deve permearli. In genere le soluzioni o le sospensioni di silicati sono altamente penetranti, mentre le miscele a base di cemento hanno un campo di impiego limitato ai soli terreni a grana grossa.

La sabbia sciolta trattata dovrà raggiungere la resistenza ciclica e la rigidità iniziale in campo elastico tipiche della stessa sabbia addensata, mentre la rigidità a medie e grandi deformazioni non dovrà cambiare significativamente. Infine il trattamento dovrà risultare

irreversibile, stabile nel tempo e la miscela iniettata dovrà essere completamente inerte nei confronti di agenti aggressivi, non dovrà avere interazioni di tipo chimico o alterare il chimismo dell'acqua interstiziale.

6.1.b Iniezioni di compattazione ("compaction grouting", Figura 2)

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.

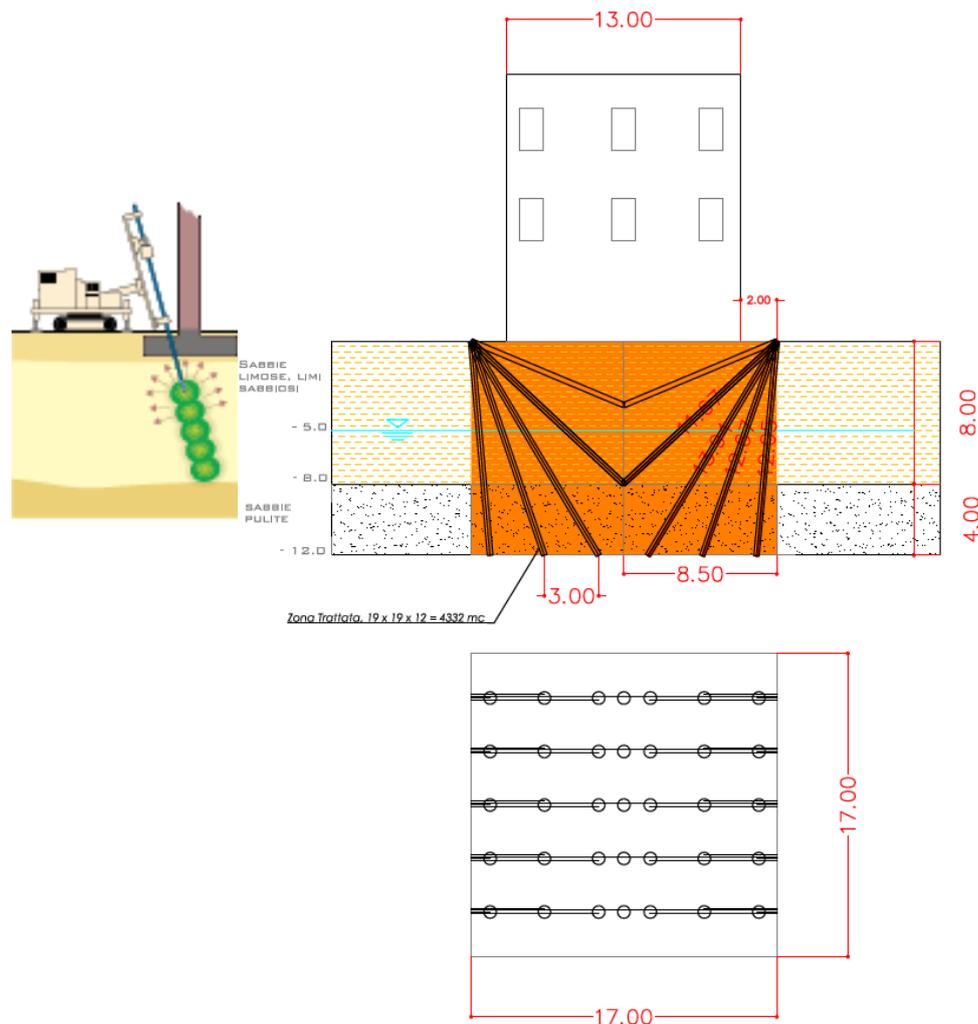


Figura 2. Schema trattamento edifici esistenti con iniezioni di compattazione.

Una boiacca di malta viene pompata a pressioni elevate fino a 3.5 MPa dal basso verso l'alto da tubi di acciaio infissi o trivellati nel terreno secondo una griglia con interasse 1.5 – 3.0 m. Il volume di boiacca immesso può variare dal 3 al 20% del volume di terreno trattato.

Le iniezioni di compattazione generano elementi colonnari "consolidati" che hanno funzione portante se realizzati sotto le fondazioni di edifici esistenti o di nuova costruzione; possono essere utilizzate per riportare in piano edifici che hanno subito rotazioni anche significative; inoltre rappresentano un ulteriore fattore di miglioramento delle proprietà meccaniche del sottosuolo.

Con l'ausilio di opportuni accorgimenti, quali l'impiego di dreni verticali, è possibile utilizzare con successo il compaction grouting anche in terreni a grana fine.

6.2. Trattamenti di tipo "passivo"

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).

6.2.a Parziale saturazione ("Induced Partial Saturation", IPS, Figure 3a e 3b)

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. Recenti ricerche condotte mediante prove di laboratorio hanno dimostrato che le bolle di gas generate tra i grani rimangono intrappolate anche in presenza di gradienti verticali o orizzontali.

Le tecniche IPS sono ancora sperimentali, ben caratterizzate con modelli di laboratorio, ma ancora poco sperimentate in sito; la più innovativa ed efficace sembra essere la terza: il processo consiste nel dissolvere in acqua una bassa concentrazione di soluzione chimica eco-compatibile (percarbonato di sodio) e nell'iniettare la soluzione nel terreno da trattare, con una pompa, mediante tubi finestrati opportunamente dimensionati e spazati. La miscela percola e si diffonde nel terreno rilasciando piccole bolle di ossigeno, le quali sono intrappolate nei pori tra le particelle di sabbia senza disturbare il terreno.

Per verificare il permanere della condizione di parziale saturazione, è ritenuto necessario un monitoraggio periodico mediante la misura della velocità di propagazione di onde elastiche di compressione nel terreno, il cui valore è particolarmente sensibile al grado di saturazione. Potrebbero, infine, essere richiesti periodici interventi di ripristino nel caso il terreno si saturasse, per questo motivo le canne di iniezione dovranno essere ben protette da rotture incidentali e risultare accessibili e riutilizzabili nel corso degli anni.

Le tecniche IPS sono molto meno costose rispetto alle tecniche di tipo attivo, ma per essere utilizzate nei siti in esame, devono essere calibrate mediante un campo prova.

In Figura 3a si riporta uno schema del trattamento IPS su un'area limitata, in corrispondenza di un edificio esistente in aree estese in condizioni di campo libero, mentre in Figura 3b si riporta uno schema del trattamento IPS su aree estese in condizioni di campo libero.

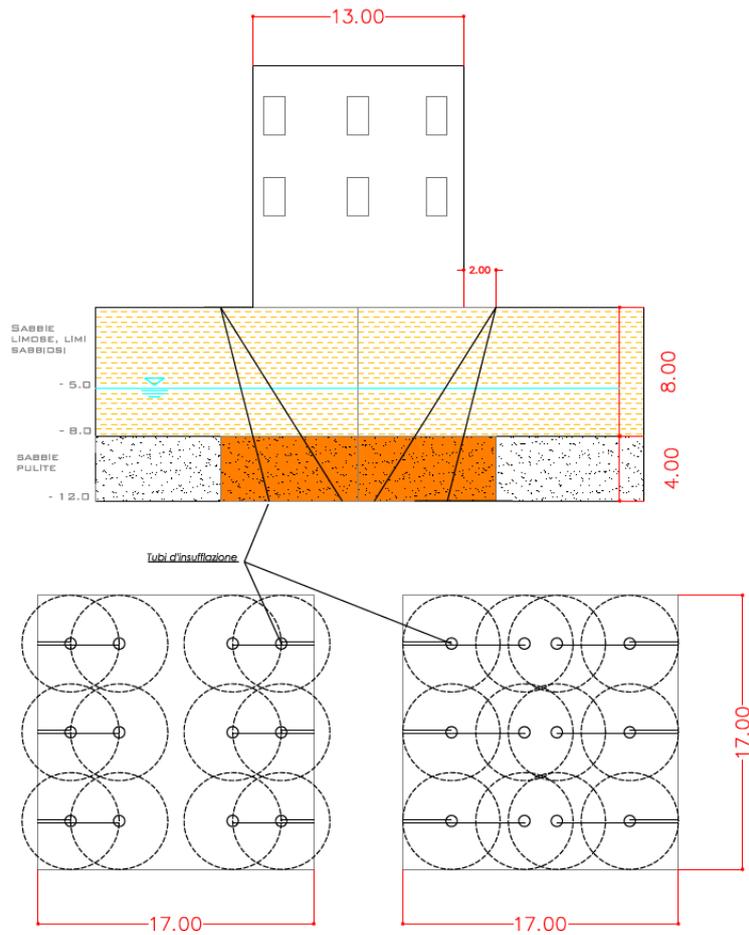


Figura 3a. Schema trattamento IPS su edifici esistenti

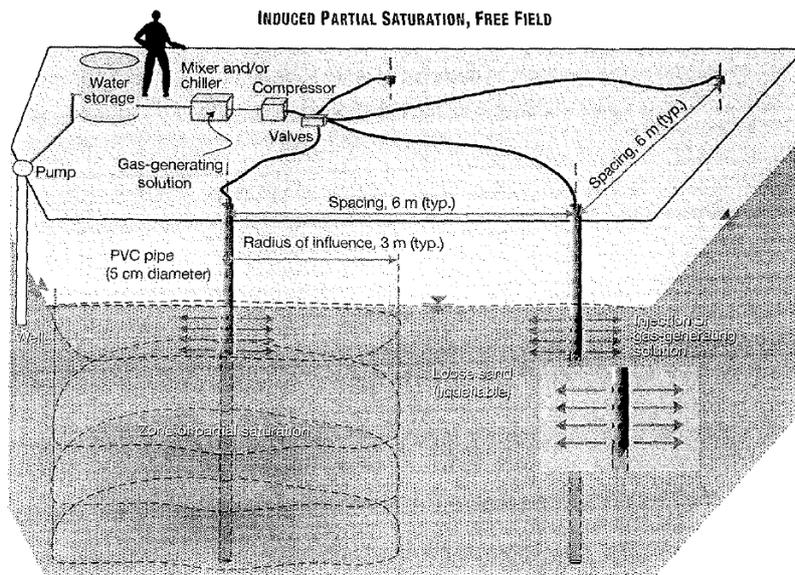


Figura 3b. Schema trattamento IPS su aree estese.

6.2.b Drenaggi (Figura 4)

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 (fig. 4). 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. ...

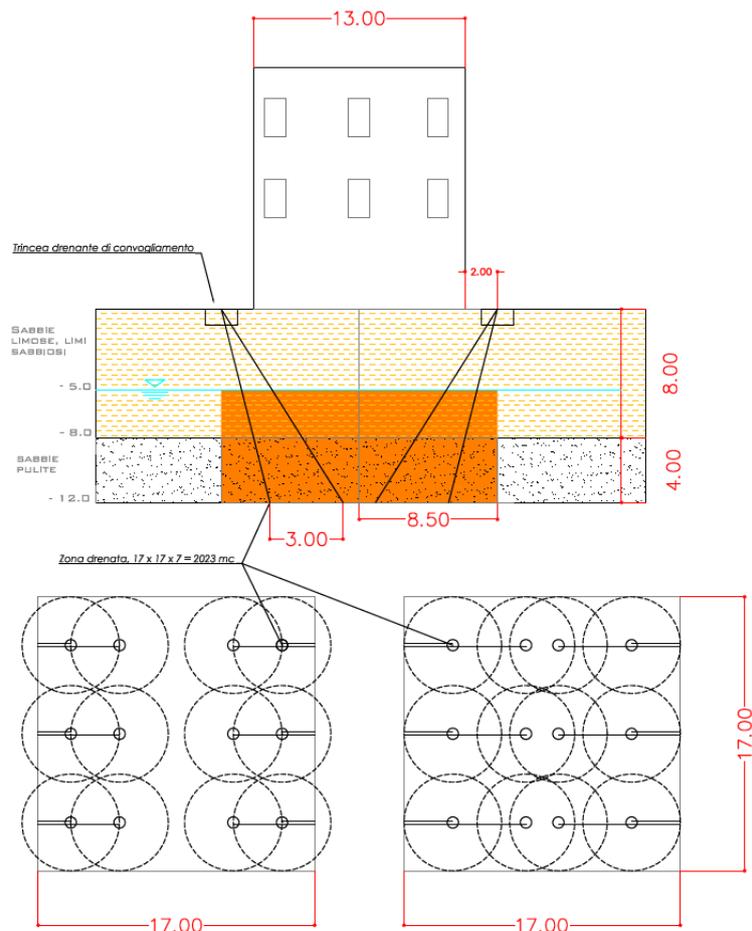


Figura 4. Schema trattamento su edifici esistenti con dreni

La tecnica di drenaggio può avere il duplice effetto di limitare l'occorrenza del fenomeno della liquefazione, favorendo la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali che ne sono la causa, e ridurre le eventuali deformazioni indotte.

In particolare, nei siti in cui uno strato di bassa permeabilità presente al di sopra di uno strato liquefacibile può provocare l'intrappolamento dell'acqua in pressione con formazione di un'interfaccia di bassissima resistenza o addirittura di un film d'acqua, la dissipazione e la redistribuzione delle sovrappressioni interstiziali ad opera dei dreni può essere fondamentale nel prevenire rotture per scorrimento e per ridurre le deformazioni laterali.

L'efficacia della tecnica di drenaggio dipende dalla permeabilità e dalla densità del terreno, dall'interasse e dalla permeabilità verticale dei dreni, dal tipo di filtro utilizzato, dalla distanza tra la superficie libera di falda e la zona di scarico dei dreni, dalla velocità del carico sismico rispetto alla resistenza a liquefazione del terreno.

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.

7. 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.

I campi prova avranno lo scopo di verificare da un lato la fattibilità dell'intervento e dall'altro il grado di miglioramento indotto nel terreno, nei confronti della suscettibilità alla liquefazione. L'efficacia del trattamento dovrà essere verificata mediante prove in sito e prove di laboratorio eseguite su campioni rappresentativi dei terreni trattati.

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: ciò garantirà l'ottimizzazione dell'intervento in relazione alle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche locali ed ai livelli di miglioramento che si intendono raggiungere.

Per la corretta esecuzione dei campi prova si ritiene necessario programmare preventivamente una serie di indagini e prove geotecniche, da effettuare sia prima che dopo l'esecuzione degli interventi di mitigazione, allo scopo di verificare i risultati ottenuti. Si ricorda a questo proposito che alcuni dei terreni presenti nelle aree interessate dai fenomeni di liquefazione potrebbero non rientrare tra quelli per i quali risulta possibile condurre un'analisi di liquefazione semplificata basata sulle sole prove in sito e che le prove di laboratorio per la verifica della suscettibilità alla liquefazione necessitano di campioni indisturbati di elevata qualità.

Il metodo di verifica dei risultati conseguiti dalla tecnica di mitigazione dipenderà dalle caratteristiche dell'intervento stesso e dovrà considerare il miglioramento delle caratteristiche meccaniche (resistenza e rigidità) dei terreni trattati sia nei confronti delle sollecitazioni statiche che cicliche/dinamiche.

I siti adibiti a campo prova dovranno essere ben caratterizzati geotecnicamente: sarà necessario conoscere la sequenza lito-stratigrafica dei terreni del sottosuolo, nonché la natura, la permeabilità e le caratteristiche di resistenza (in condizioni di sollecitazioni sia monotoniche che cicliche) e di deformabilità (dalle piccole alle grandi deformazioni) di ciascun litotipo.

I metodi di "indotta parziale saturazione" IPS, dovranno essere oggetto di uno studio approfondito prima della loro applicazione per valutare in particolare la loro reale efficacia e la durabilità nel tempo.

7.1. 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.

7.2. 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.

8. 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, ma sono inefficaci in caso di fluidificazione, o comunque se gli spostamenti orizzontali (lateral spreading) e i cedimenti sono molto grandi.

Il consolidamento strutturale delle fondazioni mira ad allargare l'impronta dell'area di carico e a rendere collaboranti fondazioni isolate. L'allargamento dell'impronta dell'area di carico incrementa la capacità portante del sistema fondazione - terreno, così da compensare, in tutto o

in parte, l'effetto della riduzione di resistenza al taglio dei terreni durante e a seguito del fenomeno di liquefazione. La messa in opera di cordoli che rendano collaboranti fondazioni isolate, conferisce al sistema fondale un incremento di rigidità tale da ridurre l'apertura di lesioni e l'alterazione dello stato di tensione nella struttura in elevazione, prodotte dalle deformazioni indotte dalla liquefazione.

Nel caso delle fondazioni continue in muratura, frequentemente ricorrenti per la tipologia edilizia prevalente negli abitati di San Carlo e Mirabello, la sottofondazione realizzata con cordoli strutturali in conglomerato cementizio armato, sottopassanti a tratti le murature portanti, produce anche e soprattutto una resistenza a trazione dei sistemi fondali, oggi assente nelle fondazioni ordinarie. Tale resistenza a trazione aggiuntiva può essere trattata come funzione obiettivo per il dimensionamento dell'intervento, a partire da una stima delle deformazioni impresse dall'evento sismico. Caso per caso andrà poi valutata l'opportunità/necessità di inserire a livello del piano fondale anche elementi di controvento che siano in grado di produrre un atteso effetto di "piano rigido" anche nei sistemi fondali di tipo superficiale a maglia tipicamente quadrata/rettangolare.

Una ulteriore variante migliorativa al sistema fondale esistente, sempre con riferimento alla tipologia strutturale delle murature portanti è quella di introdurre con la sottofondazione, anche un aumento di rigidità nei confronti dei cedimenti differenziali, in direzione verticale, che si accompagna ovviamente anche ad una maggiore rigidità nei confronti delle azioni orizzontali di tipo sismico. Tale irrigidimento può essere ottenuto sia attraverso la realizzazione di cordoli che affiancano la fondazione esistente per tutta la sua altezza al di sotto del piano di calpestio del piano terra, sia attraverso l'irrigidimento dell'intero piano terra. In tale ultimo caso l'effetto ricercato può essere ottenuto con trattamenti di spritz-beton applicato su rete elettrosaldata fissata su entrambe le facce della muratura portante di piano terra, con connettori opportunamente dimensionati.

I benefici prodotti dagli interventi sul sistema fondale sopra indicati, consistono quindi sostanzialmente nel limitare o annullare gli effetti prodotti dalla liquefazione, qualora il terreno mantenga una seppur residua capacità resistente e non sia soggetto a spostamenti orizzontali (lateral spreading) e a cedimenti molto grandi. Da qui la constatazione che tali interventi sono pressoché inefficaci, qualora sia concreto il rischio di fluidificazione ciclica (non evidenziatosi nelle aree in oggetto a seguito degli eventi sismici del maggio 2012).

Il consolidamento di sistemi fondali esistenti tramite la messa in opera di sottofondazioni profonde (micropali), pur configurandosi ancora come un intervento di tipo passivo, non in grado di ridurre la probabilità di evenienza, consente di "ancorare" la struttura in elevazione a strati di terreno più profondi non liquefacibili, a cui sono trasmessi i carichi. In questo caso si devono mettere in conto, nella progettazione, le azioni di attrito negativo e di interazione dinamica lungo il fusto dei pali, che si producono in particolare alla base dello strato di terreno liquefatto. Particolare cura e attenzione dovrà essere adottata nella progettazione e realizzazione dei sistemi di collegamento tra i micropali e le fondazioni esistenti. A tale ultimo proposito valgono le considerazioni espresse circa i sistemi di sottofondazione delle fondazioni superficiali con cordoli armati, che dovranno essere necessariamente adottati, in funzione di elementi di interfaccia fondazione superficiale/micropalo. Non è in altre parole auspicabile, ovvero è vietato l'uso di micropali direttamente inseriti nelle murature portanti attraverso un meccanismo di trasferimento del carico di tipo attritivo tra muratura e tubolare di acciaio.

Gli interventi di sottofondazione profonda sono in genere risolutivi per le finalità proposte, ma si caratterizzano come più costosi e invasivi della integrità delle finiture nei locali in cui si va ad operare.

9. METODICHE DI INTERVENTO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE PER EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE IN ADIACENZA AD EDIFICI ESISTENTI

Per ridurre la suscettibilità a liquefazione dei terreni interessati da nuove costruzioni da realizzarsi in adiacenza a strutture esistenti, si potrà addensare il terreno di fondazione per spiazzamento, mediante l'inserimento di colonne di materiale granulare (displacement columns). Dovendo evitare di trasmettere vibrazioni significative agli edifici adiacenti, la tecnologia consolidata e ritenuta più opportuna è il "save composer".

Quest'ultima tecnologia (fig. 5), messa a punto di recente ed utilizzata in Giappone, ha il vantaggio del possibile riutilizzo delle macerie di demolizione che ne riduce i costi. Le fasi della lavorazione prevedono una fase di perforazione, durante la quale viene spinto e ruotato un tubo metallico di diametro opportuno (400 - 500 mm), alla base del quale è fissata una punta a perdere. Una volta raggiunta la base dello strato di sabbia interessato dalla liquefazione, il tubo è estratto mediante una sequenza regolare che alterna risalita di 2 m e nuova discesa di 1 m, mentre gli aggregati sono versati all'interno del tubo metallico. Questa azione alternata di salita e discesa determina, oltre all'allargamento del diametro finale della colonna di materiale inerte, una azione di ricompattazione del terreno circostante del tutto analoga a quella ottenibile con l'ausilio della vibrazione senza però creare disturbo alle costruzioni confinanti.

Gli aggregati utilizzati possono essere costituiti da ghiaia, sabbia oppure anche macerie opportunamente macinate. L'interasse di trattamento generalmente utilizzato è a maglia quadrata o a quinconce di lato 1,5-2 m.

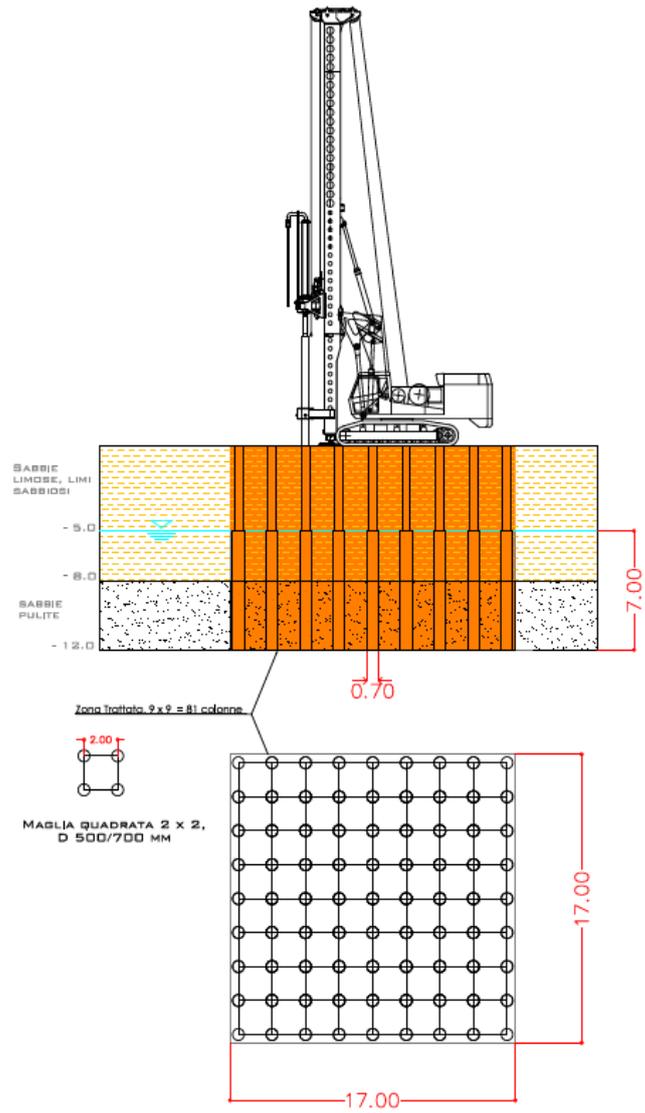


Figura 5. Schema di intervento per edifici di nuova costruzione: colonne a spostamento "save composer" – maglia 2 m x 2 m

REGIONE EMILIA-ROMAGNA
Atti amministrativi

GIUNTA REGIONALE

Raffaele Pignone, Responsabile del SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI esprime, contestualmente all'adozione, ai sensi della deliberazione della Giunta Regionale n. 2416/2008, parere di regolarità amministrativa in merito all'atto con numero di proposta DPG/2012/13201

IN FEDE

Raffaele Pignone