



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

# **Primo rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a S. Carlo, frazione di S. Agostino (Provincia di Ferrara)**

*A cura del gruppo di lavoro per la valutazione degli effetti di  
liquefazione a seguito dei terremoti del 20 e 29 maggio 2012  
(Regione Emilia-Romagna, PG.2012.0134978 del 31/5/2012)*

*Bologna 25 giugno 2012*



**PROTEZIONE CIVILE**  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 **Regione Emilia-Romagna**

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

## 1. INTRODUZIONE

A seguito dei terremoti che il 20 e 29 maggio scorso hanno colpito la pianura emiliana, in corrispondenza di alcuni antichi corsi d'acqua oggi abbandonati (paleoalvei), sono stati osservati diffusi fenomeni di liquefazione<sup>1</sup>.

Tali fenomeni, hanno avuto particolare rilevanza in alcuni centri abitati del settore occidentale della Provincia di Ferrara, soprattutto a S. Carlo, frazione di S. Agostino, dove hanno causato una temporanea inagibilità di alcuni edifici, la chiusura di alcune strade e l'interruzione di alcuni servizi per la rottura delle reti, e a Mirabello.

La liquefazione in questi centri abitati è stata innescata dalle scosse del 20 maggio, mentre le scosse successive, anche rilevanti come quelle del 29 maggio, non hanno causato effetti significativi, tali da produrre aggravamenti rilevabili tramite ispezione visiva.

Per una valutazione degli effetti post-sismici della liquefazione negli abitati di S. Carlo e Mirabello e permettere al più presto il recupero della funzionalità degli edifici, della viabilità e delle reti di sottoservizi dichiarati temporaneamente inagibili, la Regione Emilia-Romagna e il Dipartimento della Protezione Civile hanno istituito un gruppo di lavoro interdisciplinare.

Il Sindaco del Comune di S. Agostino, con Ordinanza n. 105 del 25 maggio 2012, ha ordinato lo sgombero di alcuni edifici della frazione di S. Carlo, definendo due "zone rosse", una lungo Via Rossini e l'altra nell'area di Via Risorgimento-Via Morandi-Via del Lavoro.

In questo rapporto è riportata la procedura stabilita dal Gruppo di lavoro per far fronte al problema, sono descritte le indagini svolte e le prime conclusioni finalizzate alla valutazione dell'agibilità sismica degli edifici di civile abitazione dichiarati temporaneamente inagibili per effetti di liquefazione del terreno di fondazione e/o delle aree limitrofe nell'abitato di S. Carlo.

La localizzazione dei siti, sia puntuali che lineari, in cui è stata osservata liquefazione nel centro abitato di S. Carlo è illustrata nella figura 1.

La descrizione delle indagini è riportata in Appendice 1 mentre in Appendice 2 sono descritti il modello geologico e l'andamento della falda freatica; in Appendice 3 è descritto il monitoraggio topografico.

## PROCEDURA DI LAVORO

Il Gruppo di lavoro ha stabilito di procedere con il seguente programma:

- verifica dell'eventuale danno strutturale degli edifici delle "zone rosse", classificandoli in tre classi: classe verde nessun danno, classe arancio da rivedere o danno lieve, classe rossa danno strutturale che rende l'edificio inagibile (fig. 2);

---

<sup>1</sup> Per un inquadramento e una descrizione dei fenomeni di liquefazione osservati consultare i documenti disponibili nella pagina web: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/notizie/notizie-2012/istituito-un-gruppo-di-lavoro-della-regione-e-del-dpc-per-la-valutazione-degli-effetti-di-liquefazione>

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

- sulla scorta di questa mappatura, per i soli edifici verdi (edifici senza danni strutturali), verifica di eventuali pericolosità di origine geotecnica che hanno interessato le fondazioni o comunque le aree di sedime degli edifici;
- stesura di un programma indagini, e realizzazione delle stesse, sia in un ambito areale (scala dell'intera frazione) per circoscrivere e caratterizzare il fenomeno, sia in un ambito di dettaglio (scala del manufatto) per fornire indicazioni sul pericolo geotecnico
- interpretazione dei dati e prime conclusioni.

Le quattro fasi descritte si sono concluse e i risultati sono riportati in questo documento.

Una quinta fase che prevede indagini di dettaglio per l'esplorazione delle fondazioni di tutti gli edifici classificati verdi è ancora in corso.

## 2. EFFETTI DELLA LIQUEFAZIONE

Un sisma induce nei terreni carichi ciclici dinamici. Il termine *liquefazione* indica una repentina perdita di resistenza al taglio e rigidità del terreno causata dai carichi ciclici dinamici indotti da un terremoto, con immediata manifestazione di deformazioni plastiche significative.

I terreni suscettibili di liquefazione sono le sabbie ed i limi sabbiosi non plastici, mentre i terreni più fini (limi plastici e argille) soggetti a carichi ciclici indotti dal sisma, subiscono un degrado della resistenza e della rigidità, con conseguenti deformazioni plastiche anche significative, ma senza dar luogo a liquefazione.

Generalmente gli effetti della liquefazione immediatamente osservabili sono:

- cedimenti uniformi e/o differenziali e rotazioni delle strutture,
- fuoriuscite di acqua e terreno nella tipica forma di vulcanelli (sand boils) e
- dislocazioni laterali del terreno (lateral spreading), questi ultimi in terreni stratificati o in condizioni di piano campagna non orizzontale.

Dopo l'occorrenza di un evento sismico, i terreni sperimentano una fase transitoria durante la quale dissipano le sovrappressioni dell'acqua interstiziale generate durante il sisma con conseguente riequilibrio delle condizioni di falda e delle tensioni efficaci del terreno.

La durata degli effetti transitori post-sismici dipende dalla stratigrafia e dalla natura dei terreni: in depositi sabbiosi omogenei il transitorio è piuttosto breve, ma la presenza di frazione fine può renderlo più lungo; in terreni stratificati la durata dipende dalle condizioni di drenaggio e dalla permeabilità degli strati. Durante la fase transitoria possono manifestarsi ulteriori deformazioni del terreno con conseguenti ulteriori cedimenti totali e differenziali degli edifici.

A seguito dell'evento sismico del 20 maggio, il Servizio Sismico della Regione Emilia-Romagna ed il Dipartimento di Protezione Civile, hanno incaricato un gruppo di esperti di valutare il rischio geotecnico post-sismico della località di S. Carlo, frazione del Comune di Sant'Agostino, interessata da estesi e significativi fenomeni di liquefazione. In Figura 1 sono mostrati i siti nel centro abitato di S. Carlo e dintorni in cui sono stati osservati i sopracitati effetti di liquefazione sia puntuali (vulcanelli, venute di acqua e sabbia, fuoriuscita da pozzi) che lineari (fratture nel terreno).

I sopralluoghi effettuati in data 24 e 25 maggio hanno permesso di evidenziare diversi effetti di tipo geotecnico provocati dal sisma.

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

In gran parte dell'abitato sono stati rilevate importanti fuoriuscite di sabbia attraverso i pozzi per l'emungimento dell'acqua. Laddove la sabbia non ha trovato la via di uscita preferenziale costituita dai pozzi, sono state osservate forti venute di acqua e terreno: in forma di vulcanelli all'esterno degli edifici, in forma di sollevamento del pavimento nei piani seminterrati e piano terra degli edifici, con trasporto prevalente del terreno di fondazione più superficiale, in genere fine, e parte del sottostante strato di terreno grossolano liquefatto.

In corrispondenza degli antichi argini fluviali, morfologicamente più elevati rispetto alla quota media del piano campagna, le fuoriuscite di sabbia, sia esterne che interne agli edifici, sono state accompagnate da diffusi fenomeni di instabilità locali e globali, con conseguenze talora gravi sulla stabilità degli edifici presenti.

Nelle aree morfologicamente più piane si sono formate fratture profonde, talora caratterizzate da dislocazione solo orizzontali anche decimetriche, talora anche da dislocazioni verticali da centimetriche a decimetriche. Gli edifici circostanti hanno subito conseguenti rotazioni e cedimenti.

A seguito dei primi sopralluoghi effettuati, sulla base delle evidenze superficiali e dell'osservazione qualitativa dei terreni di fondazione (ma in assenza di dati oggettivi concernenti la sequenza litostratigrafica dei terreni interessati dai fenomeni di instabilità co-sismica), sulla base del raffronto tra le osservazioni qualitative effettuate e le conoscenze geologiche e geomorfologiche pregresse, non potendo infine escludere il verificarsi di effetti post-sismici differiti nel tempo, è stato ritenuto prudenzialmente opportuno dichiarare temporaneamente inagibili alcune aree per rischio geotecnico.

Come anticipato nell'introduzione, per meglio identificare le aree interessate da rischio geotecnico elevato dove concentrare le successive indagini e verifiche, è stata realizzata una cartografia di agibilità degli edifici nelle aree con problemi di tipo geotecnico (Figura 2). In tale carta, gli edifici sono stati classificati in base all'esito delle verifiche di agibilità eseguite da squadre di ingegneri preposti al rilievo del danno e dell'agibilità, affiancati da ingegneri geotecnici esperti di liquefazione.

A seguito di questa mappatura è stato ritenuto necessario intraprendere un programma di indagini conoscitive sulla natura e le proprietà meccaniche dei terreni mediante una campagna di prove in sito e di laboratorio (Appendice 1, Appendice 2); è stato inoltre predisposto un sistema di monitoraggio piezometrico per valutare le variazioni del livello della falda freatica durante la fase transitoria post-sisma (Appendice 2); è stato infine allestito un sistema di monitoraggio topografico, mediante livellazione ad alta precisione, per misurare eventuali spostamenti post-sismici degli edifici "verdi" (Appendice 3). I rilievi e le indagini sono stati finalizzati a verificare lo stato dei terreni di fondazione dopo gli effetti di liquefazione e individuare la *fine del periodo transitorio* post-sismico.



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico



Figura 1. Effetti della liquefazione osservati a S. Carlo.

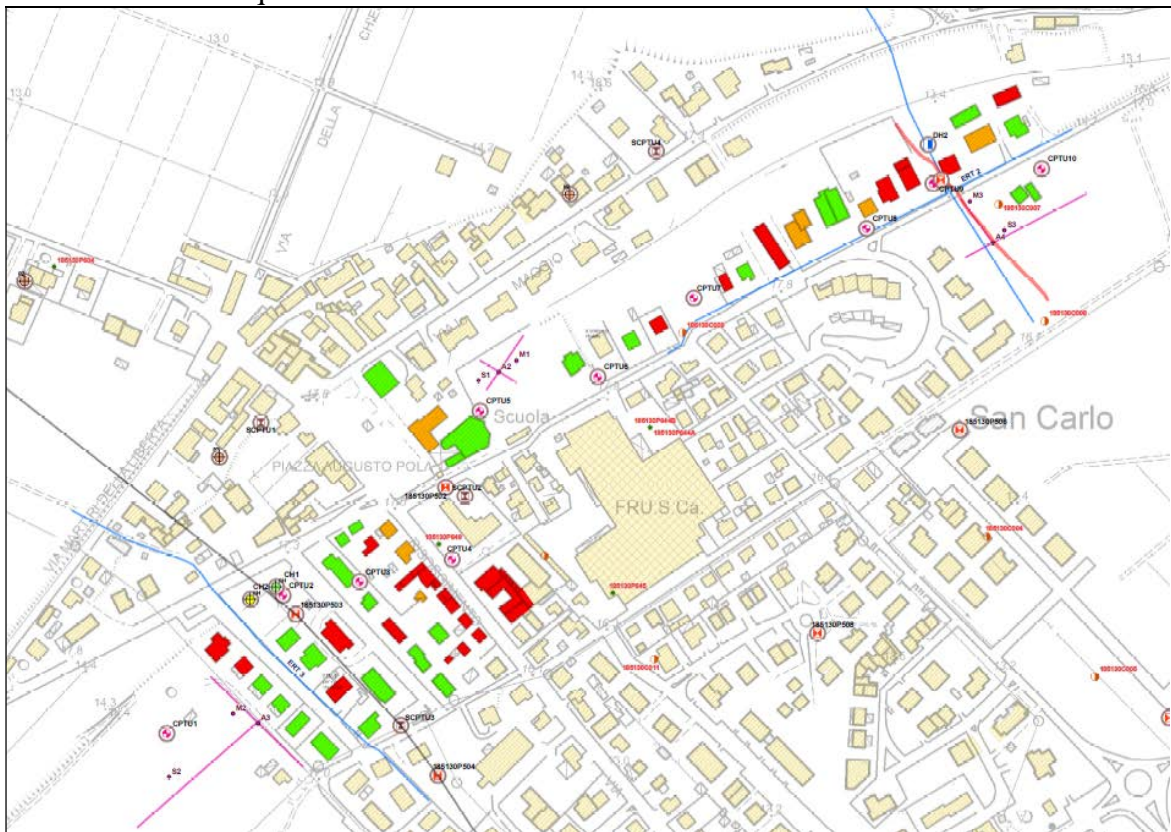


Figura 2. Classi di agibilità degli edifici.



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

### 3. INDICAZIONI OPERATIVE

Alla luce dei risultati sino ad ora acquisiti, sulla base:

- ✓ dei rilievi topografici che non hanno misurato spostamenti significativi in atto,
- ✓ del monitoraggio del livello di falda, che è ritornato ai normali valori stagionali,
- ✓ dei risultati delle indagini con georadar che non hanno evidenziato disuniformità dei terreni in corrispondenza ed al di sotto delle fondazioni,
- ✓ delle interpretazioni preliminari dei risultati delle prove geotecniche in sito e di laboratorio per la definizione delle proprietà dei terreni in condizioni di carico monotono e ciclico,
- ✓ delle interpretazioni preliminari dei risultati delle indagini geofisiche puntuali e lineari, che hanno mostrato discontinuità solo in corrispondenza delle principali fessure,
- ✓ delle osservazioni preliminari delle trincee, che suggeriscono che l'orizzonte che ha subito liquefazione è con ogni probabilità quello costituito da sabbie fini e medie di canale posto a quote comprese tra 6 e 10 m slm (tetto a profondità di circa 6-7 m nella zona di paleoargine e a profondità di circa 4 m nella zona di piana),

si può ritenere che gli effetti transitori di post-sisma del 20 e 29 maggio, dovuti alle dissipazione delle sovrappressioni interstiziale, siano esauriti, e con essi il rischio geotecnico post-sismico. L'agibilità sismica degli edifici classificati verdi verificati è quindi confermata.

Il rischio che il fenomeno della liquefazione possa prodursi di nuovo a seguito di un sisma di uguale o maggiore intensità, risulta comunque presente. Per questo si ritiene opportuno determinare con quali tecniche adottare interventi di mitigazione del rischio di liquefazione; tale argomento sarà oggetto di un successivo documento.

Si ritiene molto utile continuare il monitoraggio topografico degli edifici e del livello di falda, fino al completamento dello sciami sismico e oltre; inoltre il monitoraggio topografico potrà essere utilizzato per verificare i successivi interventi di consolidamento dei terreni.



**PROTEZIONE CIVILE**  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 **Regione Emilia-Romagna**

 servizio geologico  
sismico e dei suoli



## APPENDICE 1

### INDAGINI GEOTECNICHE E GEOFISICHE

In Figura 3 sono riportate le ubicazioni delle indagini disponibili prima dell'evento sismico e delle nuove indagini realizzate, e in corso di esecuzione, per le finalità sopra descritte. Di seguito sono descritte le indagini di nuova realizzazione.

#### *Sondaggi geognostici*

I sondaggi di nuova realizzazione sono complessivamente 20, 16 dei quali già stati realizzati e altri 4 in corso di esecuzione; la profondità indagata varia tra i 7,6 ed i 40 metri.

Questi sondaggi sono stati eseguiti per la definizione della litostratigrafia, la messa in opera di piezometri per il monitoraggio della falda freatica, l'esecuzione di prove geotecniche e geofisiche in foro, il prelievo di campioni indisturbati per analisi di laboratorio.

Tutti i sondaggi sono stati eseguiti dalla SOGEO srl di Lugo (RA).

In particolare:

Sondaggi già realizzati (16 in totale) :

- 9 sondaggi a carotaggio continuo profondi da 7.6 a 13.5 metri con prelievo di campioni indisturbati (12 in totale) per le successive indagini di laboratorio ed installazione di piezometri per il monitoraggio della falda freatica (9 in totale);
- 5 sondaggi a distruzione di nucleo profondi da 10 a 13 metri con installazione di piezometri per il monitoraggio della falda freatica (5 in totale);
- 1 sondaggio a carotaggio continuo profondo 40 metri con prelievo di campioni indisturbati (3 in totale) per le successive indagini di laboratorio, esecuzione di 14 prove geotecniche in foro (12 tipo SPT e 2 tipo Le Franc) ed allestimento per le successive indagini geofisiche (prova cross-hole);
- 1 sondaggio a distruzione di nucleo profondo 40 metri, con allestimento per le successive indagini geofisiche (prova cross-hole).

Sondaggi in corso di realizzazione (4 in totale):

- 4 sondaggi a distruzione di nucleo profondi da 8 a 12 metri con installazione di piezometri per il monitoraggio della falda freatica (4 in totale).

#### *Prove penetrometriche statiche con piezocono e piezocono sismico*

Le prove penetrometriche di nuova realizzazione (tutte già eseguite) sono complessivamente 14, spinte a profondità variabile tra 20 e 30 metri.

In particolare:

- 10 prove penetrometriche con piezocono (CPTU) per la definizione della litostratigrafia e delle caratteristiche geomeccaniche del terreno, spinte fino alla profondità di 20 m, eseguite dalla PerGeo srl di Ro Ferrarese;
- 4 prove penetrometriche con piezocono e cono sismico (SCPTU) per la definizione della litostratigrafia, delle caratteristiche geomeccaniche del terreno e per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio Vs, spinte fino alla profondità di 30 m, eseguite dalla ISMGEO srl di Seriate (BG).



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

### Prove geofisiche

Sono state realizzate 6 misure di vibrazione ambientale a stazione singola, per la definizione della frequenza fondamentale dei depositi di terreno e per l'individuazione di superfici di contrasto di impedenza nel sottosuolo, e 3 prove di sismica passiva in configurazione di antenna sismica (ESAC), per la definizione di profili di Vs; tutte le prove di sismica passiva sono state effettuate dal Dipartimento di Scienze Geologia della Terra dell'Università di Siena.

Sono stati inoltre realizzati 3 profili sismici a rifrazione per la correlazione dei dati stratigrafici puntuali; tali prove sono state eseguite dall'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR di Napoli.

In aggiunta, l'IMAA del CNR di Tito (PZ) ha realizzato 4 profili di resistività elettrica per la correlazione dei dati stratigrafici puntuali.

Infine, lungo il perimetro e all'interno di alcuni edifici sono stati eseguiti anche 7 rilievi con il georadar per la valutazione dello stato del terreno di fondazione e dei sottoservizi; tali rilievi sono stati effettuati dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano (questa indagine è in via di completamento).

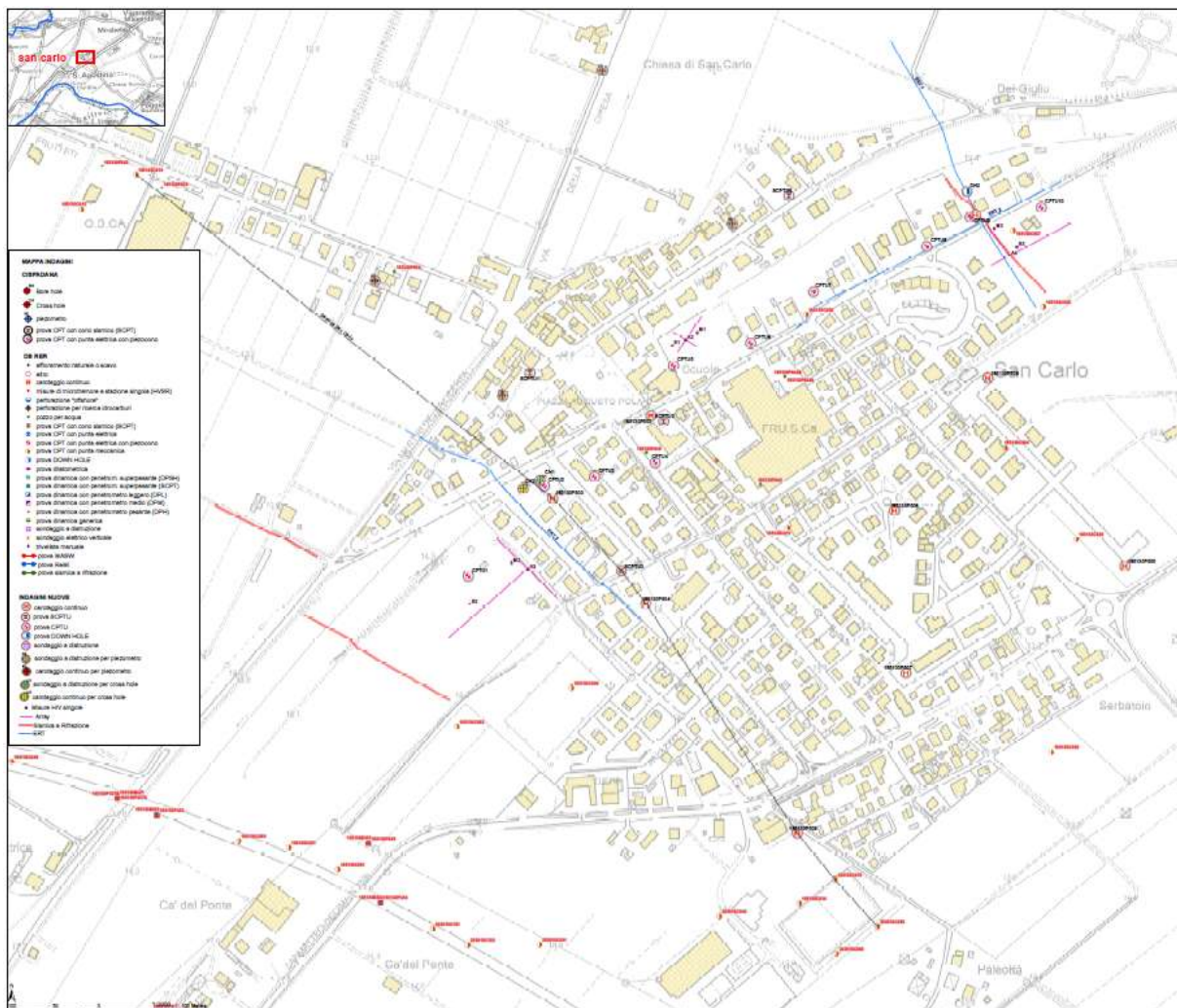


Figura 3. Carta delle indagini geognostiche in sito.

### ***Prove geotecniche di laboratorio***

Sui campioni indisturbati prelevati nel corso dei sondaggi a carotaggio continuo profondi 12 m e su campioni di terreno fuoriusciti prelevati in corrispondenza di alcuni siti ritenuti significativi, sono state fino ad ora eseguite (nei laboratori dell'Istituto Sperimentale Modelli GEOTecnici ISMGEO anche per conto dell'Università di Ferrara) le prove di laboratorio di seguito elencate:

- 29 analisi granulometriche Gr per vagliatura e sedimentazione, per la definizione della distribuzione granulometrica dei terreni campionati, di cui 26 misure su campioni indisturbati e 3 misure su campioni rimaneggiati;
- 3 prove per la valutazione delle proprietà indice dei terreni (Limiti di Atterberg)
- 4 misure di peso dell'unità di volume secco massimo e minimo;
- 2 misure del peso specifico dei grani G<sub>s</sub>;
- 4 prove triassiali monotoniche (su coppie o terne di provini indisturbati, a seconda della disponibilità di materiale dei campioni indisturbati) con consolidazione isotropa e rottura non drenata TxCIU, per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio dei terreni in condizioni statiche; 1 misura di velocità di propagazione delle onde di taglio tramite bender elements V<sub>s</sub>;
- 2 prove triassiali monotoniche con consolidazione isotropa e rottura non drenata TxCIU su terne di campioni ricostruiti con lo stesso indice dei vuoti di sito, per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio dei terreni in condizioni statiche;
- 2 prove di taglio diretto DS (due terne di provini indisturbati), per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio dei terreni in condizioni statiche;
- 1 prova di taglio anulare RS (una terna di provini indisturbati) per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio dei terreni in condizioni statiche;
- 3 prove di colonna risonante RC su provini indisturbati per la determinazione della rigidità del terreno a piccolissime deformazioni e della curva di decadimento del modulo di rigidità al taglio dei terreni e di incremento del damping;
- 12 prove triassiali con consolidazione isotropa e rottura ciclica non drenata CTXCIU su provini indisturbati per la determinazione della resistenza ciclica a liquefazione dei terreni;
- 9 prove triassiali con consolidazione isotropa e rottura ciclica non drenata CTXCIU su campioni ricostruiti con lo stesso indice dei vuoti di sito, per la determinazione della resistenza ciclica a liquefazione dei terreni;
- 2 prova edometrica EDO per la determinazione dei parametri di compressibilità del terreno e la stima della storia tensionale.

Una serie di prove di taglio semplice ciclico di campioni indisturbati e ricostruiti, sono in corso.

Altre prove di laboratorio per la determinazione della granulometria delle sabbie raccolte liquefatte sono state eseguite dai laboratori geotecnici delle Università di Urbino e Firenze.

Infine, il CNR IGAG ha contribuito a costruire un modello del sottosuolo geologico-tecnico per implementare alcune simulazioni numeriche allo scopo di definire la risposta sismica locale in superficie.



**PROTEZIONE CIVILE**  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 **Regione Emilia-Romagna**

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

## MODELLO GEOLOGICO

Grazie ai risultati delle indagini disponibili è stato possibile definire il modello geologico fino alla profondità di interesse per il fenomeno della liquefazione (15-20 m).

La Figura 4 mostra una sezione orientata circa NW-SE, tracciata attraverso la zona ovest di S. Carlo (come evidenziato dalla traccia in Figura 2) e ritenuta significativa per l'area più interessata dai fenomeni di liquefazione. Tale sezione è stata realizzata utilizzando i dati litostratigrafici ottenuti dai sondaggi e dalle prove penetrometriche, correlati grazie anche ai profili derivati dalle prove geofisiche lineari.

A partire dalla superficie è presente una zona rilevata, corrispondente ai paleoargini e al paleoalveo, costituita prevalentemente da sabbia fine alternata a limi sabbiosi. Lo spessore di questa unità raggiunge i 4 m in corrispondenza della sommità dell'argine; la base è alla quota di circa 14 m s.l.m. Segue un orizzonte continuo di limi sabbiosi alternati a sabbie limose. La base di questo orizzonte è alla quota di circa 7 m s.l.m; lo spessore varia da circa 4 a circa 6 m.

In questa unità limoso-sabbiosa si intercala localmente un corpo lenticolare costituito da sabbie fini e medie, corrispondente ad un riempimento di paleoalveo. Tale inclusione ha uno spessore di circa 4 m e si trova a profondità variabili da circa 3 nelle zone altimetricamente più basse (di piana) e a circa 7 m nelle zone dei paleoargini. La base di tale unità è ad una quota di circa 6 m s.l.m.

Al di sotto delle alternanze di limi e sabbie è presente un orizzonte continuo di argille e limi, con abbondante frazione organica, di spessore circa costante compreso tra 9 e 10 m. Il tetto di questo orizzonte fine è ad una profondità di circa 6 nella zona di piana e di circa 11-12 m sotto i paleoargini. La base dicorrispondente al passaggio Olocene-Pleistocene, si trova ad una quota di circa -2 m s.l.m, cui corrisponde una profondità di circa 15 m nella zona di piana e di quasi 19 m sotto i paleoargini.

Segue un'alternanza di limi sabbiosi e sabbie limose con intercalazione di un orizzonte di sabbia media e fine, di spessore fino a circa 4 m, ad una profondità dell'ordine dei 20 m sotto i paleoargini e circa 16-17 m nella zona della piana.

Il tetto della falda freatica, alla data dell'8 giugno, era ad una quota di circa 11-12 m s.l.m, ovvero ad una profondità di 1-2 m nella zona della piana e di circa 4-5 m nella zona dei paleoargini.

Per osservare direttamente la stratigrafia e le condizioni post-evento dei primi metri di sottosuolo sono state aperte 2 trincee trasversali a fratture con risalite di sabbia. La prima è stata aperta dal Dipartimento della Protezione Civile lungo il lato sud di via Rossini (zona est di S. Carlo), la seconda è stata eseguita da un gruppo di lavoro del Dipartimento Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, coordinato dal prof. Riccardo Caputo, sul paleoargine tra il cimitero di S. Agostino e la SP Cispadana (ad ovest di S. Carlo). La prima ha permesso di osservare i primi 3 m di sottosuolo, mentre la seconda ha permesso osservazioni fino alla profondità di quasi 6 m.

Grazie a tali scavi è stato possibile osservare direttamente che:

- il paleoargine è costituito da prevalenti limi sabbiosi con intercalazioni di livelli centimetrici e decimetrici di sabbie fini,
- che le fratture che hanno permesso la risalita delle sabbie sono subverticali,
- che la sabbia di riempimento di queste fratture, e quindi quella risalita e fuoriuscita lungo tali fratture, ha una granulometria maggiore (fino a sabbie medie) dei livelli sabbiosi del paleoargine,
- che le fratture continuano al di sotto della base degli scavi.

L'insieme di questi dati indica che l'orizzonte che ha subito liquefazione è a profondità maggiore di 6 m e, con ogni probabilità, è l'orizzonte costituito da sabbie fini e medie, facies di canale, posto a quote comprese tra 6 e 10 slm (tetto a profondità di circa 6-7 m nella zona di paleoargine e a profondità di circa 4 m nella zona di piana).

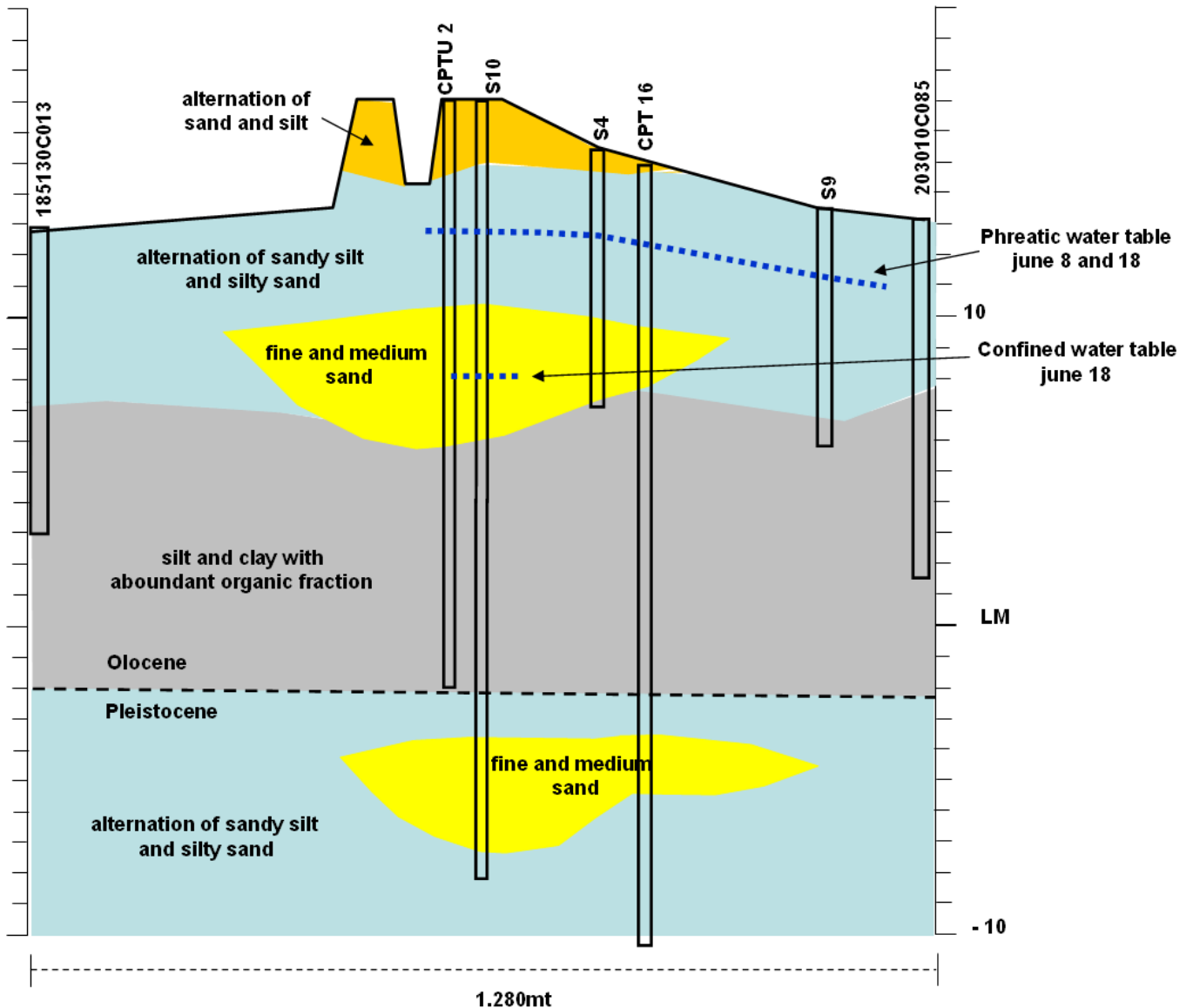


Figura 4. Sezione litostratigrafica.



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

## ANDAMENTO DELLA FALDA FREATICA

L'acquifero freatico nella zona di San Carlo è costituito da tutti i sedimenti sabbiosi e limoso sabbiosi, di spessore variabile tra 7 e 12 metri circa, che poggiano al di sopra delle argille e limi ricchi in sostanza organica evidenziati in Figura 4.

L'andamento della falda freatica è stato ricostruito a seguito di due letture di livello piezometrico effettuate in data 8 giugno e 18 giugno nei piezometri di nuova installazione. Per riferire tra loro in modo geometricamente corretto le diverse misure, si è provveduto ad effettuare una quotatura di precisione di ciascun piezometro. La Figura 5 mostra la ricostruzione del livello della falda freatica in data 8 giugno 2012, riferita al livello del mare. Si precisa che tale andamento è valido anche per il 18 giugno, data in cui il livello di falda è risultato di poco inferiore rispetto alle misure dell'8 giugno. Le fasce di colore e le linee in nero indicano le aree in cui la falda ha la stessa quota; le frecce gialle indicano la direzione di moto della falda, il quale è risultato diretto dalla zona topograficamente più rilevata verso l'area più depressa.

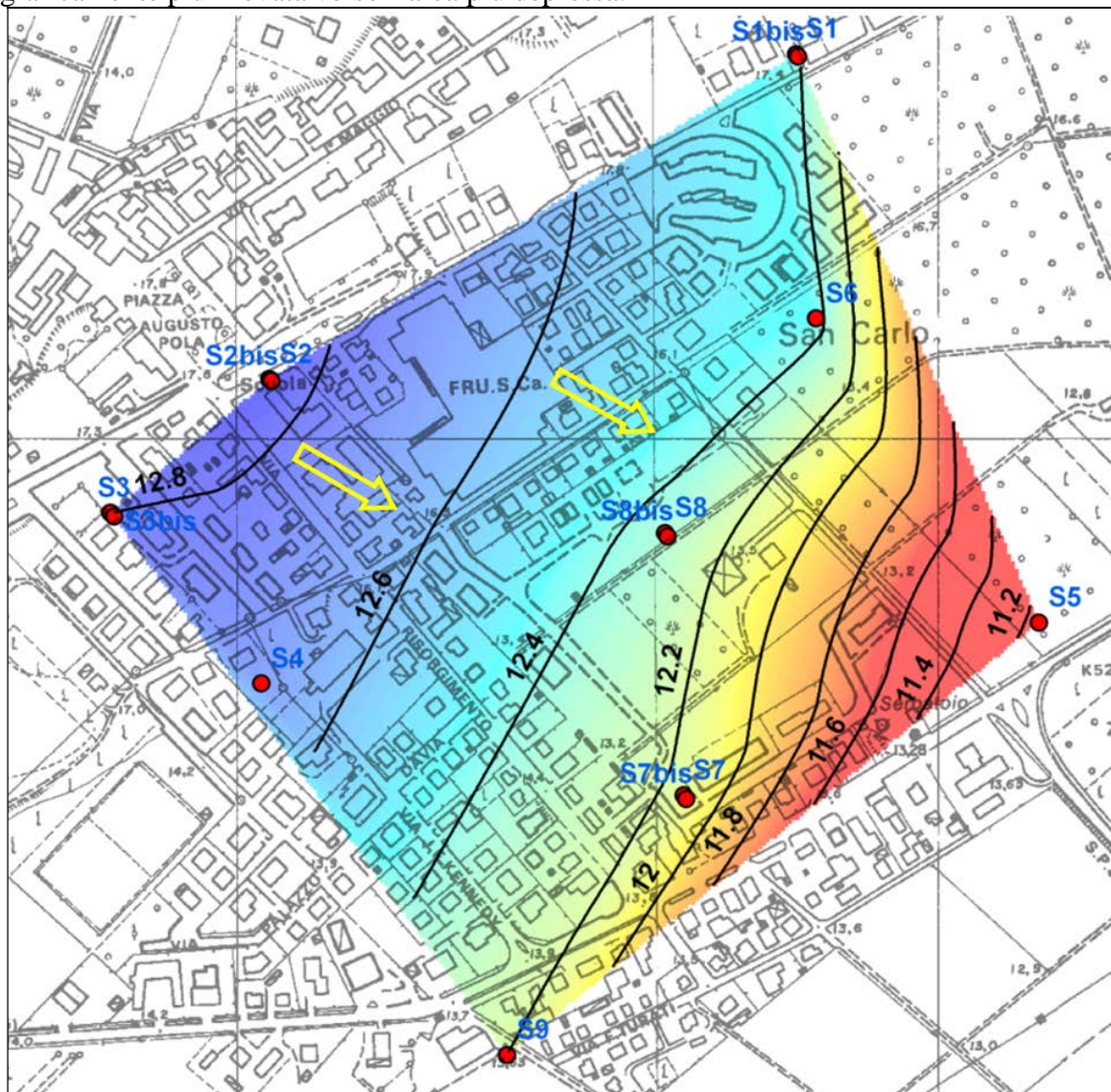


Figura 5. Andamento della falda freatica riferito al livello del mare l'8 giugno 2012



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

In Figura 6 è rappresentata invece la profondità rispetto al piano campagna locale della falda freatica, misurata in data 8 giugno 2012. Come si vede la profondità della falda è maggiore (fino a 4.6 metri) nella zona dei paleo argini, e diminuisce verso sud est (fino a 1.4 metri), come precedentemente evidenziato.

Le Figure 5 e 6 indicano anche i punti in cui sono installati i piezometri per la misura della quota di falda (S1, S2, etc.); si noti che in alcuni casi sono presenti dei punti sovrapposti indicati come S1S1bis, S2S2bis; si tratta di piezometri distanti tra loro solo pochi metri utilizzati per verificare nel dettaglio il livello della falda freatica.

Le indagini in corso di realizzazione permetteranno di posizionare altri piezometri nella zona ovest di San Carlo al fine di definire in modo completo l'andamento della falda in tutta la frazione.

Si sottolinea infine che il livello della falda freatica è di circa 4.5 metri più alto rispetto a quello della falda confinata presente nelle sabbie fini e medie presenti a 20 metri di profondità circa dal piano campagna, intercettate dal sondaggio S10 e dalla CPTU 16 (vedi Figura 4).

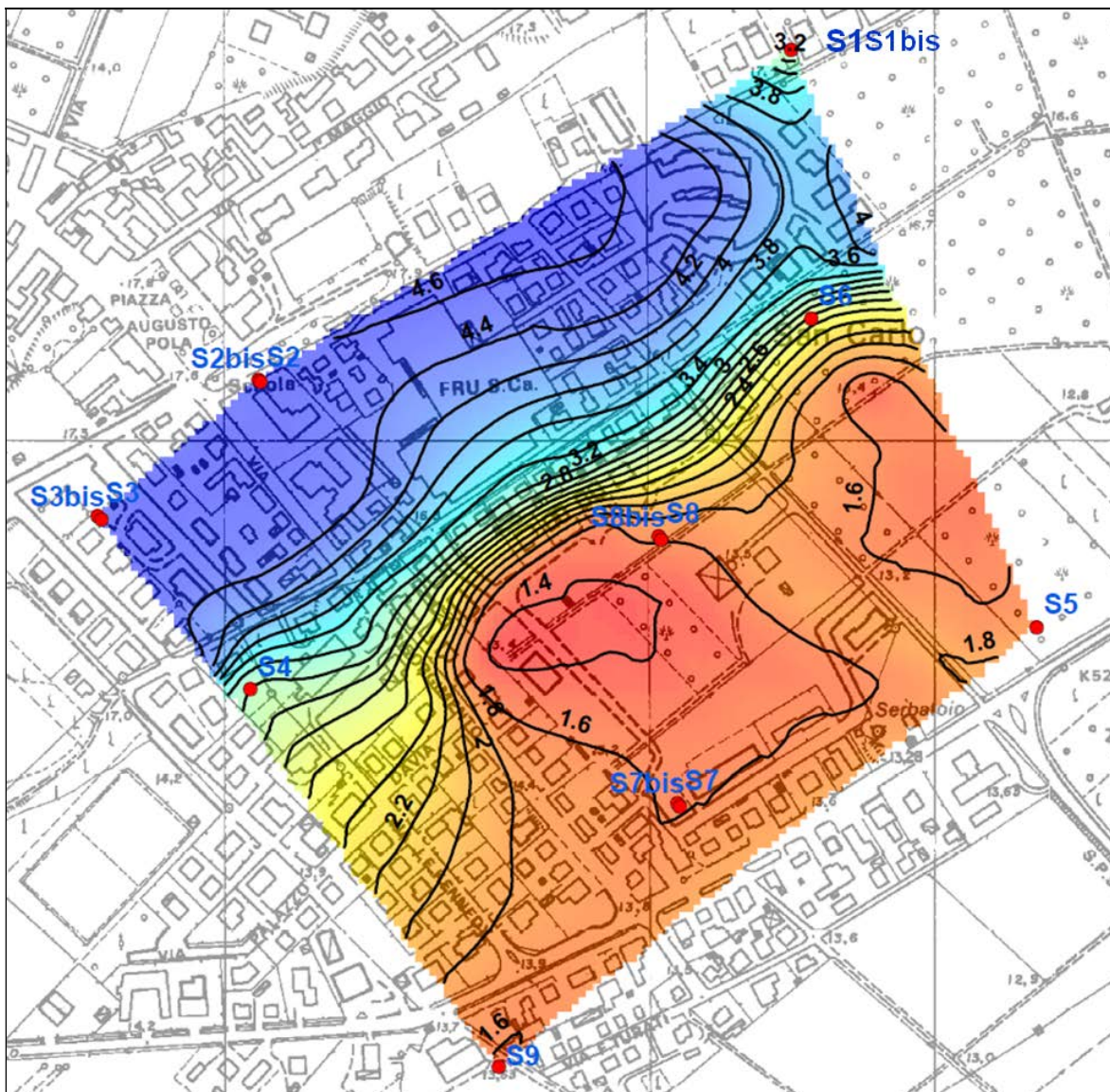


Figura 6. Profondità della falda freatica rispetto al piano campagna locale, in data 8 giugno 2012.



## APPENDICE 3

### MONITORAGGIO TOPOGRAFICO

L'attività di monitoraggio geodetico, svolta dal Gruppo di Topografi dell'Università di Ferrara, nell'area di San Carlo ha avuto lo scopo di determinare eventuali movimenti verticali di diversi edifici adibiti ad uso residenziale, per la maggior parte, ed attività commerciali e di culto in misura minore. I fabbricati monitorati riguardano un primo gruppo di edifici ubicati lungo la via Rossini e in piazza Augusto Pola ed un secondo gruppo nella zona delimitata dalle vie Risorgimento, Gramsci, del Lavoro, De Gasperi (Tavola 1). In coda si riportano le planimetrie di dettaglio dei fabbricati posti sotto controllo con il codice attribuito ad ogni caposaldo.

Il monitoraggio, basato su livellazione geometrica digitale di alta precisione, è consistito nella determinazione nel tempo delle variazioni di quota di caposaldi (chiodi in acciaio inossidabile) direttamente infissi nelle strutture portanti dei manufatti controllati.

Le campagne di misura effettuate fino ad ora sono state le seguenti:

- 05 giugno 2012, primo rilievo, denominato rilievo di zero, dei caposaldi del primo gruppo di edifici e collegamento al caposaldo di riferimento;
- 08 giugno 2012, prima ripetizione del rilievo dei caposaldi appartenenti al primo gruppo, e rilievo di zero dei caposaldi appartenenti al secondo gruppo;
- 15 giugno 2012, ripetizione del rilievo di tutti i caposaldi.

Nelle tre campagne di misura le quote sono state determinate assumendo come caposaldo di riferimento il caposaldo n. 078060 del Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara con quota apri a +13.9902 m. posto a circa 500 metri dalla via Rossini e dalla Zona Rossa. Nella livellazione è stato inoltre inserito un secondo caposaldo del Consorzio Pianura di Ferrara (n. 078070): il confronto tra il dislivello noto fornito dal Consorzio ed il dislivello da noi misurato ha permesso di verificare la sostanziale stabilità del CS di riferimento.

In tutte le campagne di misura i caposaldi sono stati collegati da una rete di linee di livellazione la cui compensazione con il classico metodo dei minimi quadrati ha permesso di determinare le quote compensate con le relative incertezze; queste ultime sono risultate non superiori a 2 mm, al livello di significatività del 95% (Tabella 1)

In Tabella 2 sono riportate le variazioni di quota dei capisaldi nei periodi 05-08 giugno e 08-15 giugno. Tali variazioni sono poste a confronto con le relative tolleranze al livello di significatività del 95%.

Come è possibile osservare, tutte le variazioni di quota sono inferiori o uguali (in pochissimi casi) alle tolleranze indicate. Ciò significa che le suddette variazioni non possono essere attribuite, per ora, ad un effettivo movimento delle strutture di fondazione dei fabbricati.



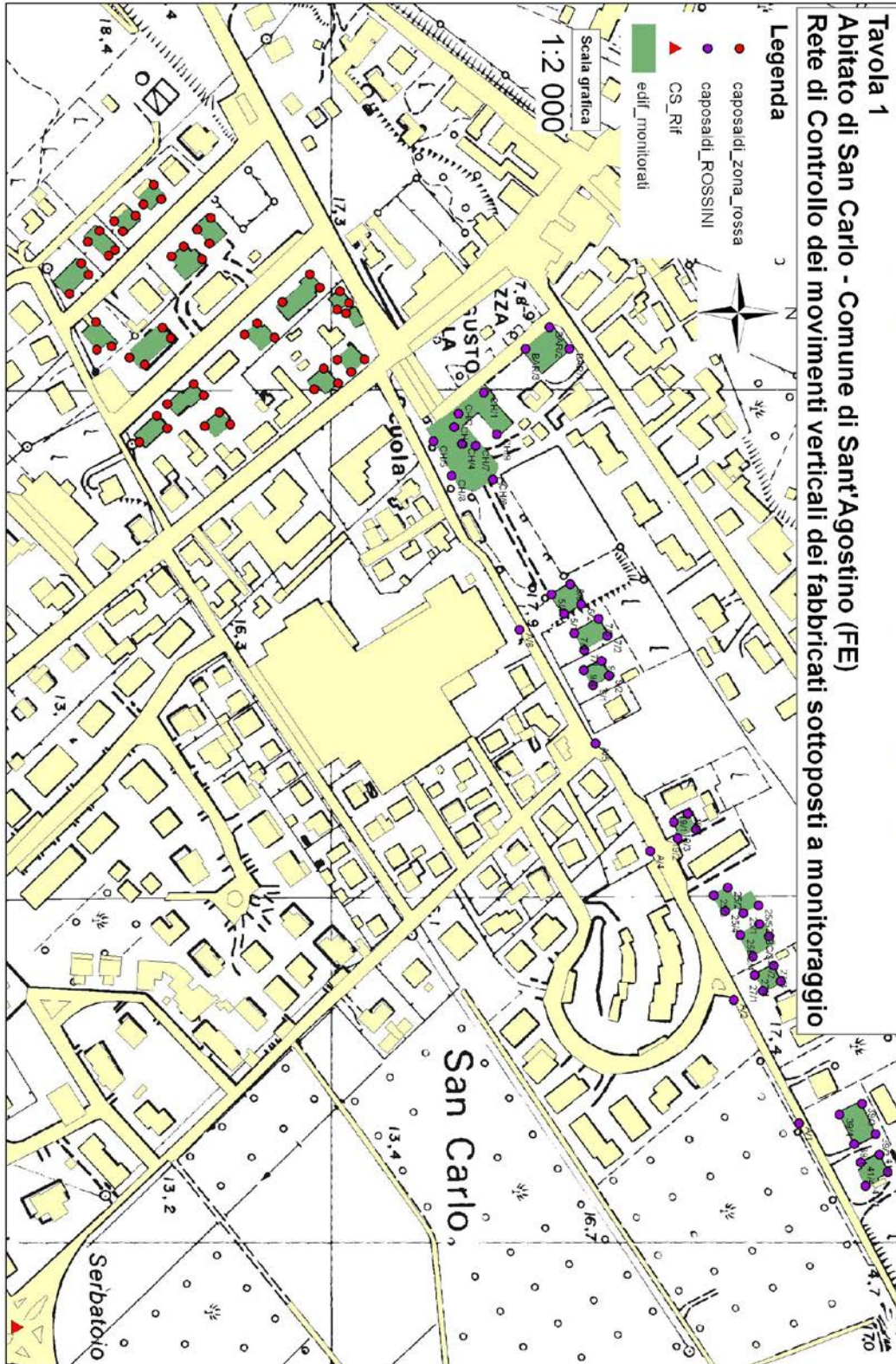
PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

Tavola 1. Ubicazione della rete di monitoraggio topografico.





PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

**Tabella 1: quote compensate dei caposaldi della Rete Altimetrica di Monitoraggio**

	05/06/12	08/06/12	15/06/12
Caposaldo	Quota (m)	Quota (m)	Quota (m)
078060	13.9902	13.9902	13.9902
A/5	17.5762	17.57625	17.5763
A/6	18.2521	18.25301	18.2529
A/4	17.61035	17.61063	17.6108
A/2	17.4708	17.47088	17.4709
A/1	17.4018	17.40149	17.3912
BAR/1	17.5643	17.56343	17.5644
BAR/2	17.5146	17.51399	17.5147
BAR/3	17.5193	17.5194	17.5203
CH/1	17.7296	17.73001	17.7311
CH/2	17.8721	17.87293	17.8741
CH/3	18.0695	18.07078	18.0715
CH/4	18.2732	18.27435	18.2753
CH/5	17.7296	17.72979	17.7305
CH/6	14.8249	14.82638	14.8269
CH/7	14.8040	14.80514	14.8059
CH/8	17.91063	17.91158	17.9120
CH/9	14.99795	14.99951	14.9999
41/1	17.76849	17.7684	17.7697
41/2	16.28848	16.2887	16.2900
41/3	16.25854	16.25877	16.2600
41/4	17.74279	17.74345	17.7444
39/1	17.45378	17.45398	17.4553
39/2	15.863	15.86316	15.8644
39/3	15.93208	15.93221	15.9332
39/4	18.0464	18.04658	18.0473
27/1	17.75991	17.75969	17.7606
27/2	17.32697	17.32677	17.3274
27/3	17.60652	17.60679	17.6071
27/4	17.98938	17.9898	17.9901
25BC/1	16.85059	16.85087	16.8515
25BC/2	15.9731	15.97356	15.9746
25BC/3	15.95893	15.95925	15.9602
25BC/4	16.81394	16.81408	16.8150
25/1	18.13501	18.13471	18.1356
25/2	18.56199	18.56185	18.5632



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

25/3	15.96345	15.96333	15.9648
25/4	15.79922	15.79893	15.8006
25/5	18.08116	18.08121	18.0820
19/1	17.85413	17.85447	17.8543
19/2	17.89503	17.89542	17.8955
19/3	17.764	17.76444	17.7649
19/4	17.82926	17.82961	17.8299
9/1	17.90512	17.90555	17.9057
9/2	17.768	17.76859	17.7687
9/3	17.88363	17.88482	17.8849
9/4	17.89295	17.89436	17.8946
7/1	17.86019	17.86171	17.8619
7/2	16.41431	16.41601	16.4163
7/3	16.34512	16.34656	16.3470
7/4	18.64497	18.64632	18.6465
5/1	18.24089	18.24222	18.2424
5/2	16.628	16.62957	16.6298
5/3	16.71192	16.71357	16.7135
5/4	18.24587	18.24695	18.2472
R87/1		17.45073	17.4528
R87/2		17.27081	17.2733
R87/3		17.30479	17.3075
R77/1		17.25677	17.2591
R77/2		17.10205	17.1041
R77/3		16.91463	16.9167
R55/3		18.72181	18.7239
R55/2		18.68229	18.6843
R55/1		18.69309	18.6951
R13/1		17.78477	17.7865
R13/2		17.81035	17.8112
R13/3		17.74463	17.7452
R17/1		17.57901	17.5793
R17/2		17.60169	17.6017
R17/3		17.65607	17.6568
R6/1		18.14975	18.1502
R6/2		18.31389	18.3145
R6/3		18.19737	18.1990
R6/4		18.05055	18.0525
R5/1		17.97333	17.9755
R5/2		17.97291	17.9754
R5/3		17.95589	17.9582
R1/1		18.07697	18.0793



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

R1/2		18.10955	18.1113
R1/3		18.09293	18.0946
R93/1		17.91371	17.9155
R93/2		17.85439	17.8551
R93/4		17.70487	17.7073
R93/3		17.88965	17.8918
R9/1		17.59659	17.5970
R9/2		17.64765	17.6481
R9/3		17.44439	17.4447
R22/1		17.78242	17.7831
R22/2		17.78121	17.7815
R22/3		17.94072	17.9413
R16/1		18.2565	18.2571
R16/2		18.17094	18.1716
R16/3		18.11893	18.1196
R16/4		18.13638	18.1370
R12/1		18.11486	18.1155
R12/2		18.00038	18.0011
R12/3		18.07955	18.0808
R8/1		18.44127	18.4427
R8/2		18.33365	18.3355
R8/3		18.28701	18.2889
RR1/1		19.04898	19.0511
RR1/2		19.16795	19.1696
RR1/3		19.05696	19.0588
R3/1		18.47343	18.4745
R3/2		18.86595	18.8675
R3/3		18.77198	18.7735



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

**Tabella 2: variazioni di quota dei caposaldi della Rete Altimetrica di Monitoraggio**

	Diff. Quota (m)		
<b>Caposaldo</b>	<b>05/06 – 08/06</b>	<b>08/06 – 15/06</b>	<b>Tolleranza (95%) (m)</b>
078060	0.0000	0.0000	
A/5	0.0000	0.0000	0.0018
A/6	0.0009	-0.0001	0.0020
A/4	0.0003	0.0002	0.0020
A/2	0.0001	0.0000	0.0021
A/1	-0.0003	-0.0103	0.0023
BAR/1	-0.0009	0.0010	0.0027
BAR/2	-0.0007	0.0007	0.0025
BAR/3	0.0001	0.0009	0.0024
CH/1	0.0004	0.0011	0.0023
CH/2	0.0008	0.0012	0.0023
CH/3	0.0013	0.0008	0.0025
CH/4	0.0011	0.0010	0.0024
CH/5	0.0002	0.0008	0.0021
CH/6	0.0014	0.0005	0.0023
CH/7	0.0012	0.0008	0.0024
CH/8	0.0009	0.0004	0.0019
CH/9	0.0016	0.0003	0.0024
41/1	-0.0001	0.0013	0.0024
41/2	0.0002	0.0013	0.0025
41/3	0.0002	0.0012	0.0026
41/4	0.0007	0.0009	0.0026
39/1	0.0002	0.0013	0.0026
39/2	0.0002	0.0012	0.0026
39/3	0.0001	0.0010	0.0025
39/4	0.0002	0.0007	0.0024
27/1	-0.0002	0.0009	0.0023
27/2	-0.0002	0.0007	0.0023
27/3	0.0003	0.0003	0.0023
27/4	0.0004	0.0003	0.0023
25BC/1	0.0003	0.0007	0.0023
25BC/2	0.0005	0.0010	0.0023
25BC/3	0.0003	0.0010	0.0023
25BC/4	0.0001	0.0009	0.0023
25/1	-0.0003	0.0009	0.0023
25/2	-0.0001	0.0014	0.0023



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

25/3	-0.0001	0.0015	0.0024
25/4	-0.0003	0.0017	0.0023
25/5	0.0000	0.0008	0.0023
19/1	0.0003	-0.0002	0.0021
19/2	0.0004	0.0001	0.0022
19/3	0.0004	0.0004	0.0022
19/4	0.0003	0.0003	0.0021
9/1	0.0004	0.0002	0.0021
9/2	0.0006	0.0001	0.0022
9/3	0.0012	0.0001	0.0023
9/4	0.0014	0.0002	0.0023
7/1	0.0015	0.0002	0.0023
7/2	0.0017	0.0003	0.0023
7/3	0.0014	0.0005	0.0022
7/4	0.0013	0.0002	0.0021
5/1	0.0013	0.0002	0.0021
5/2	0.0016	0.0002	0.0022
5/3	0.0017	-0.0001	0.0022
5/4	0.0011	0.0002	0.0021
R87/1		0.0021	0.0022
R87/2		0.0025	0.0025
R87/3		0.0027	0.0027
R77/1		0.0023	0.0028
R77/2		0.0021	0.0029
R77/3		0.0020	0.0030
R55/3		0.0021	0.0030
R55/2		0.0020	0.0030
R55/1		0.0020	0.0033
R13/1		0.0017	0.0030
R13/2		0.0009	0.0029
R13/3		0.0005	0.0028
R17/1		0.0003	0.0026
R17/2		0.0000	0.0024
R17/3		0.0007	0.0020
R6/1		0.0005	0.0023
R6/2		0.0007	0.0026
R6/3		0.0016	0.0028
R6/4		0.0020	0.0030
R5/1		0.0021	0.0030
R5/2		0.0025	0.0031
R5/3		0.0023	0.0031
R1/1		0.0023	0.0030



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

 Regione Emilia-Romagna

 servizio geologico  
sismico e dei suoli

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

R1/2		0.0017	0.0029
R1/3		0.0017	0.0029
R93/1		0.0018	0.0028
R93/2		0.0007	0.0028
R93/4		0.0024	0.0026
R93/3		0.0022	0.0024
R9/1		0.0004	0.0024
R9/2		0.0005	0.0025
R9/3		0.0003	0.0026
R22/1		0.0007	0.0027
R22/2		0.0003	0.0028
R22/3		0.0005	0.0028
R16/1		0.0006	0.0029
R16/2		0.0006	0.0029
R16/3		0.0006	0.0030
R16/4		0.0007	0.0030
R12/1		0.0007	0.0030
R12/2		0.0008	0.0031
R12/3		0.0012	0.0031
R8/1		0.0015	0.0031
R8/2		0.0018	0.0031
R8/3		0.0019	0.0031
RR1/1		0.0021	0.0029
RR1/2		0.0016	0.0030
RR1/3		0.0018	0.0030
R3/1		0.0011	0.0030
R3/2		0.0016	0.0030
R3/3		0.0015	0.0030



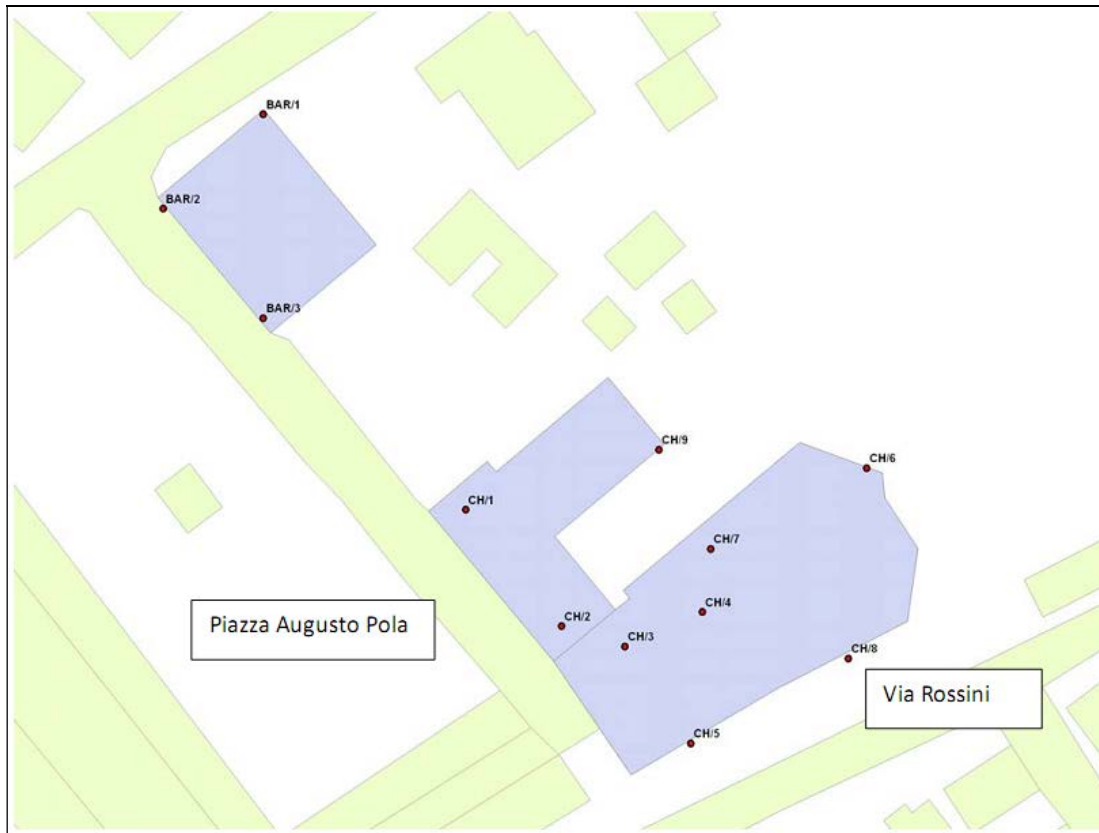


PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli



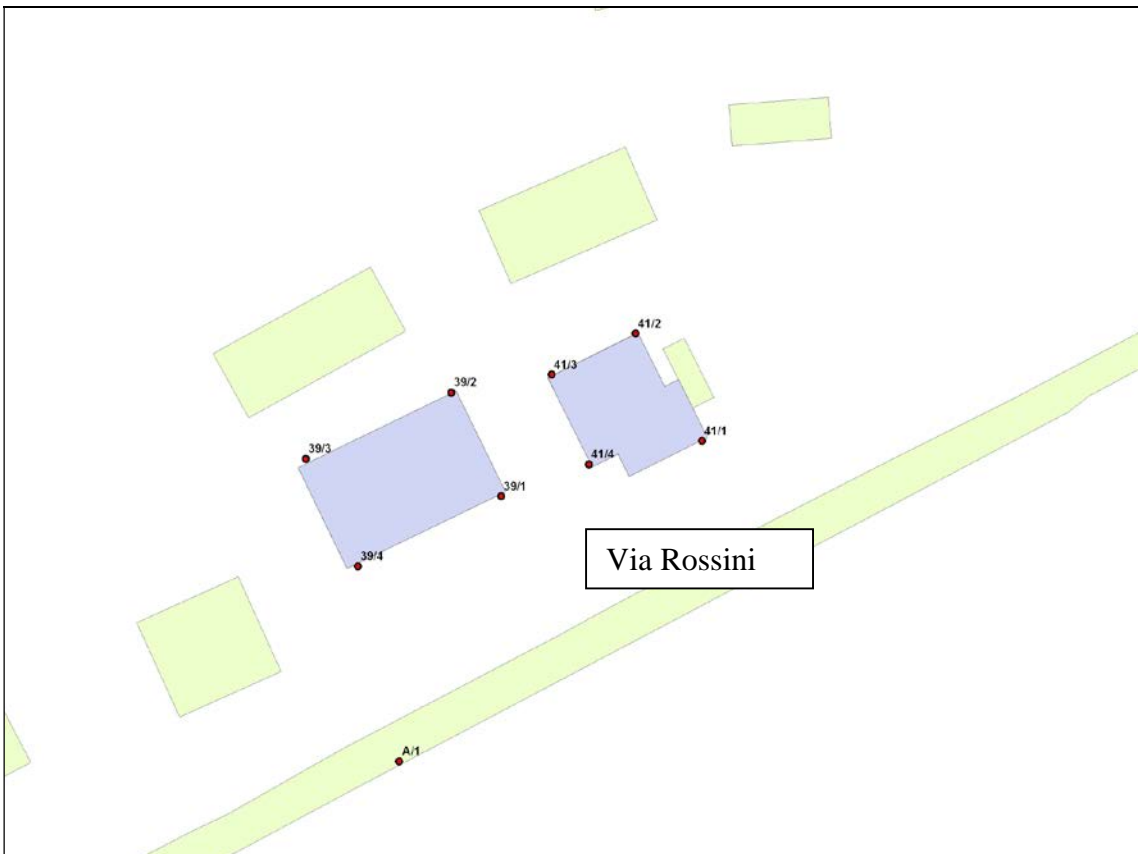
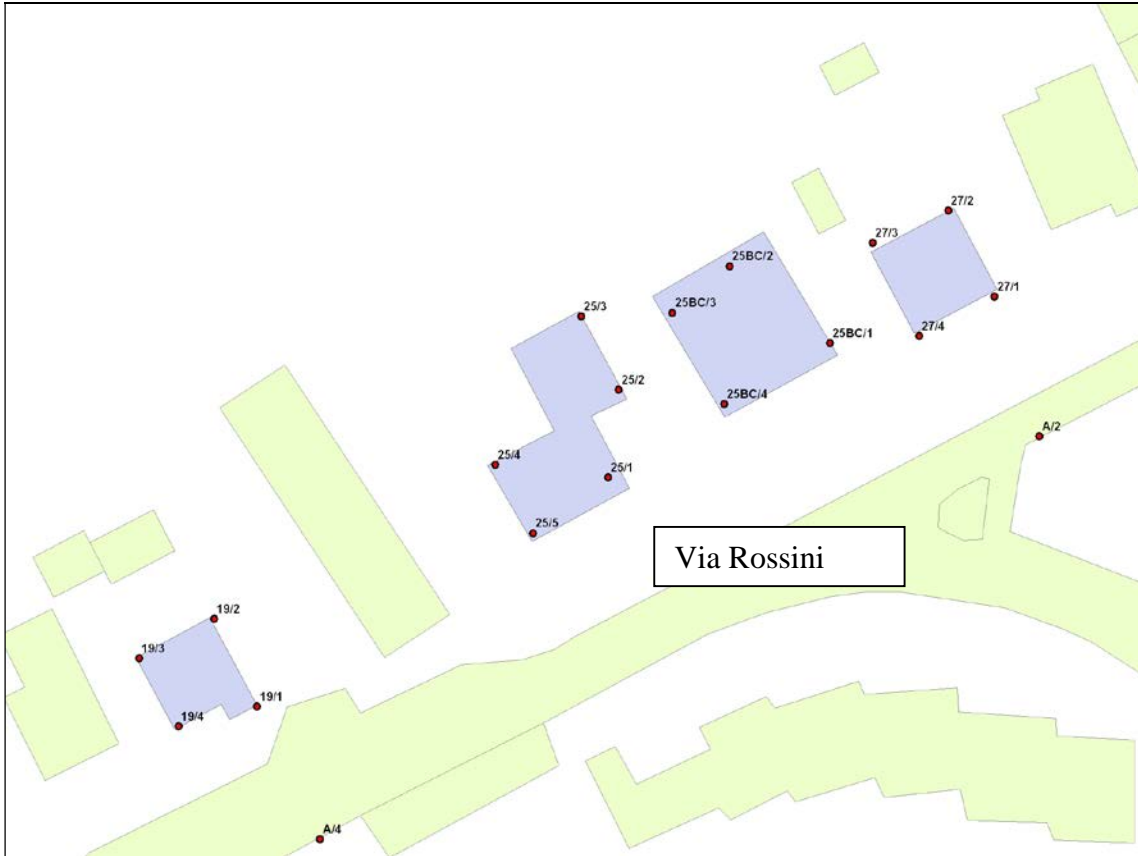


PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico



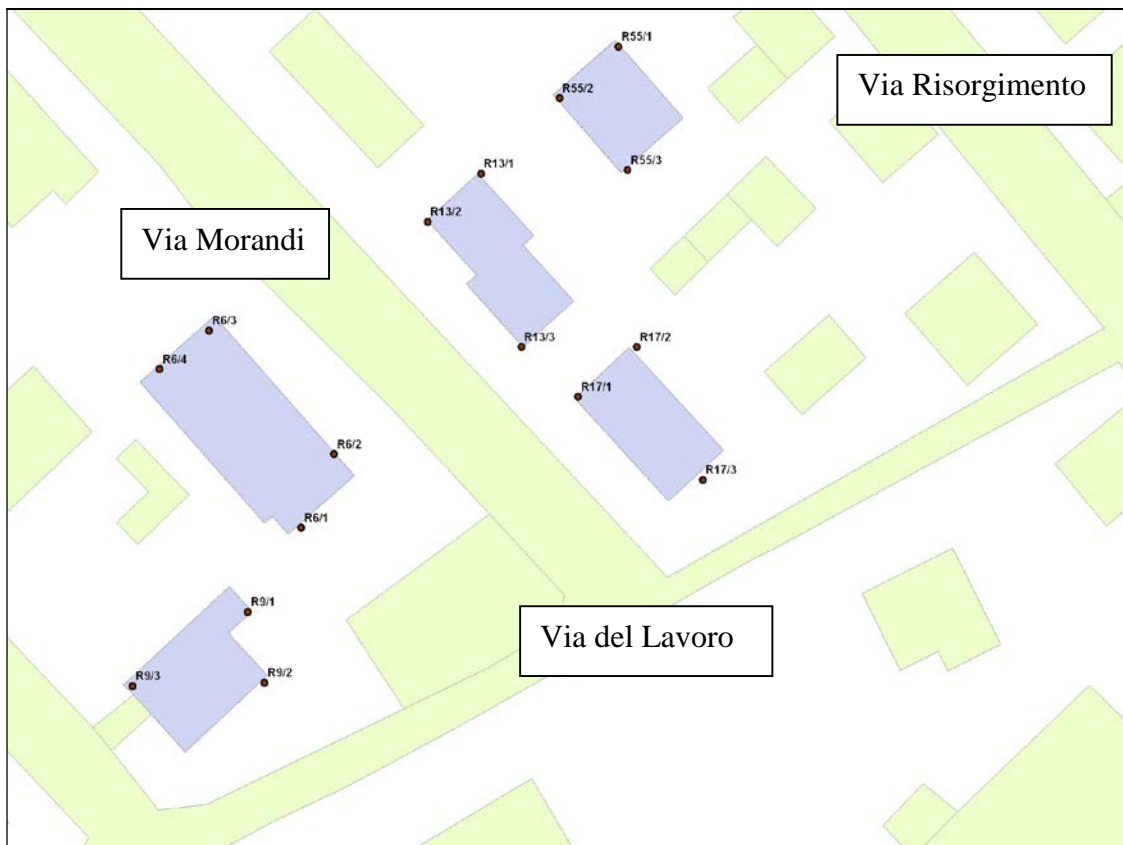
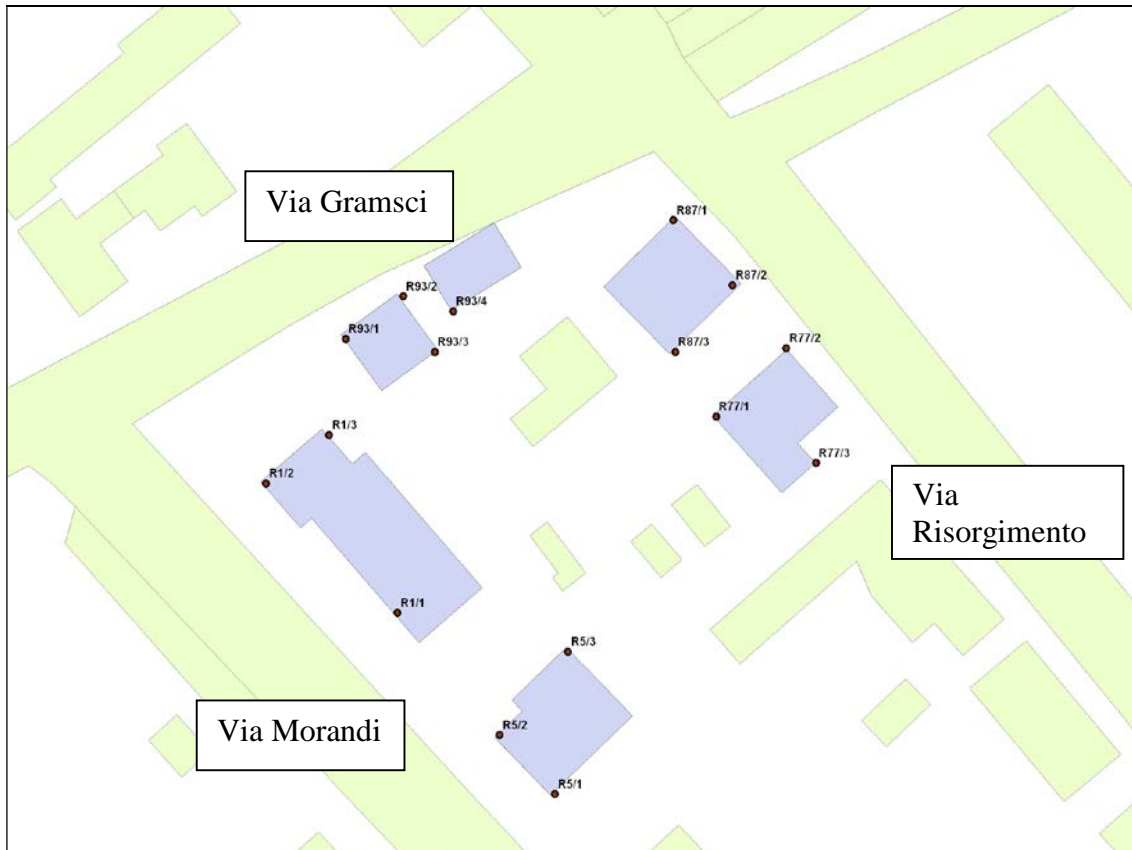


PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli





PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico

Regione Emilia-Romagna

servizio geologico  
sismico e dei suoli

