

## TERREMOTO DELL'EMILIA DEL 20 MAGGIO 2012 (M 5.9): INSOLITI FENOMENI DI LIQUEFAZIONE

### EMILIA (ITALY) M5.9 EARTHQUAKE ON 20 MAY 2012: AN UNUSUAL PATTERN OF LIQUEFACTION

ROBERTO W. ROMEO

Università di Urbino "Carlo Bo" – Urbino, Italy

#### RIASSUNTO

Il 20 maggio 2012, la Regione Emilia (Italia settentrionale) è stata colpita da un sisma (M 5.9), il quale ha innescato rilevanti effetti deformativi del suolo dovuti a estesi fenomeni di liquefazione. Sebbene lo scuotimento sia stato relativamente modesto, il fenomeno ha avuto un forte impatto su un'area ubicata a circa 17 km dall'epicentro, dove si sono verificate fuoriuscite in superficie di eccezionali quantità di acqua e sabbia.

Il lavoro traccia un quadro sintetico del fenomeno e presenta i risultati preliminari delle indagini sismologiche e geotecniche.

**TERMINI CHIAVE:** terremoto, liquefazione, Regione Emilia, Italia

#### IL SISMA

Nella notte del 20 maggio 2012 l'area compresa tra le città di Modena e Ferrara, in Italia settentrionale (Fig. 1), è stata colpita da un terremoto con una magnitudo momento di 5.9 (link: Dati sismologici). Nelle fasi immediatamente successive all'evento sismico sono stati segnalati danneggiamenti di edifici antichi, soprattutto storici (chiese, torri e castelli), e di costruzioni industriali, nonché vistosi effetti deformativi del suolo nel Comune di Sant'Agostino, a circa 17 km a est dell'epicentro e, in particolare, nella frazione di San Carlo.

L'epicentro è stato localizzato in corrispondenza della ben nota struttura sismogenica di Mirandola, un sovrascorrimento cieco con il tetto vicino alla superficie e un potenziale stimato dello stesso ordine di grandezza di quello del sisma. La prossimità di tale struttura alla superficie giustifica la scarsa profondità focale del sisma: circa 6 km.

L'evento principale (mainshock) è stato seguito da altre due forti scosse (superiori a M 5) e le repliche sono risultate fortemente allungate in direzione Est-Ovest, parallele al sovrascorrimento e compatibili con il meccanismo focale del terremoto, che ha interessato un'area lunga circa 45 km in direzione Est-Ovest e larga circa 15 km in direzione Nord-Sud.

Sono state registrate numerose accelerazioni al suolo (link: dati strong motion), delle quali la Fig. 2 mostra la distribuzione rispetto alla distanza epicentrale.

Un solo forte movimento del suolo è stato registrato in prossimità dell'epicentro, nel Comune di Mirandola, a circa 13 km dall'epicen-

#### ABSTRACT

On 20 May 2012, an M5.9 earthquake occurred in the Emilia region (northern Italy). The earthquake triggered significant ground failures owing to extensive liquefaction phenomena. Although the shaking was relatively moderate, an area lying about 17 km from the epicentre was strongly affected by the phenomenon and an exceptional amount of sand and water flowed up from the ground.

The following is an overview of the phenomenon along with preliminary results from seismological and geotechnical analyses.

**KEY WORDS:** earthquake, liquefaction, Emilia Region, Italy

#### THE EARTHQUAKE

A thrusting earthquake occurred in the night of 20 May 2012 with a moment magnitude of 5.9 (link: Seismological information) between the towns of Modena and Ferrara, in northern Italy (Fig. 1). Soon after the earthquake, news were reported about damages to old and mainly historical buildings (churches, towers and castles) as well as to industrial facilities, and about impressive ground failures in the Sant'Agostino municipality, about 17 km east of the epicentre, and particularly in the locality of San Carlo.

The epicentre was close to the well-known seismogenic structure of Mirandola, a blind thrust whose top lies near the ground surface and whose potential was estimated to be of the same order as the released earthquake. The near-surface location of the structure was responsible for the relatively shallow focal depth of the earthquake, which was located about 6 km below the ground.

The mainshock was followed by two other large shocks (above M5) and the aftershocks were strongly elongated in an E-W direction, parallel to the thrust and consistent with the focal mechanism of the earthquake, which involved an area about 45 km long in the E-W direction and about 15 km wide in the N-S direction.

Several ground-motion accelerations were recorded (link: Strong motion data), whose distribution vs. epicentral distance is shown in Fig. 2.

Only one strong-ground motion was recorded close to the epicentre, in the Mirandola municipality, about 13 km from the epi-



Fig. 1 - Epicentro e meccanismo focale del sisma dell'Emilia (M5.9) del 20 maggio 2012, con la posizione dell'area in cui si è verificata la maggior parte dei fenomeni di liquefazione (frazione di San Carlo, Comune di Sant'Agostino)

- Epicentre and focal mechanism of the Emilia 2012 M5.9 Earthquake along with the position of the site where most of the liquefaction phenomena occurred (San Carlo, in the Sant'Agostino municipality)

tro, dove il picco di accelerazione al suolo è stato di circa 0.3g. I valori di tutte le altre scosse sono stati registrati da stazioni localizzate a oltre 40 km dall'epicentro. Nonostante la distribuzione disomogenea di tali stazioni, i valori delle scosse sono risultati ben allineati su una retta del grafico bi-logaritmico, dal quale è stato desunto un valore di circa 0.16g per San Carlo (Fig. 2).

Per ricostruire il campo di accelerazione al suolo, è stata svolta un'analisi geostatistica con funzioni a base radiale. La distribuzione log-normale delle accelerazioni al suolo evidenzia un buon accordo con tutti i valori registrati, salvo per la maggiore accelerazione registrata a Mirandola, i cui valori sono molto bassi (al di sotto di 1 cm/s/s).

Non è quindi disponibile un'unica soluzione per il campo di accelerazione: la migliore stima (Fig. 3) è stata ottenuta associando i dati sulla distribuzione delle repliche con quelli delle registrazioni delle accelerazioni al suolo.

Le accelerazioni al suolo hanno un andamento parallelo alla rottura di faglia, con un'attenuazione più forte verso Sud (verso la dorsale appenninica) e una maggiore propagazione verso Nord (al di sotto della pianura padana). Data la distribuzione spaziale delle accelerazioni registrate, il valore interpolato nel sito di San Carlo è intorno a 0.1g, lievemente inferiore a quello stimato in base all'andamento dell'attenuazione del moto sismico riportato nella Fig. 2.

Le maggiori accelerazioni registrate a Mirandola (Fig. 4) mostrano una durata della *strong phase* di circa 20 secondi e un contenuto visibile in basse frequenze delle componenti orizzontali opposto a quello con più alte frequenze della componente verticale.

## LIQUEFAZIONE

Fenomeni di liquefazione sono stati osservati in molti comuni, da quelli più vicini all'epicentro (San Felice sul Panaro) a Sant'Agostino,

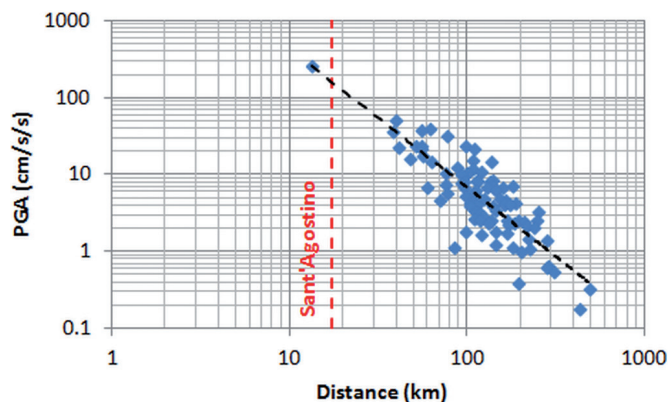


Fig. 2 - Picco di accelerazione al suolo (PGA) e distanza epicentrale. La linea tratteggiata indica la distanza epicentrale della frazione di San Carlo nel comune di S. Agostino

- Recorded peak ground accelerations (PGA) vs. epicentral distance. The dashed red line identifies the epicentral distance of the San Carlo locality, S. Agostino municipality

tre, where the peak ground acceleration was around 0.3g. All other ground motion values came from recording stations as far as 40 km or more from the epicentre. Despite this non-homogeneous distribution of recording stations, ground motion values well fit a straight line in the log-log plot, from which a value of about 0.16g for San Carlo was inferred (Fig. 2).

To reconstruct the ground acceleration field, a geostatistical analysis was conducted with radial basis functions. The log-normal plot of ground accelerations shows a good agreement for all the recorded values, except for the largest ground acceleration recorded at Mirandola and at very low recorded values (below 1 cm/s/s).

Therefore, a single solution for the acceleration field is not available: the best estimate (Fig. 3) was obtained by combining aftershock distribution data with recorded ground accelerations.

Ground accelerations have a pattern parallel to the fault rupture, with a stronger attenuation southwards (towards the Apennine chain) and a higher propagation northwards (below the Po river plain). Given the spatial distribution of the recorded accelerations, the interpolated value in the site of San Carlo is around 0.1g, slightly below the value estimated on the basis of the pattern of ground motion attenuation shown in Fig. 2.

The largest recorded accelerations (Fig. 4) at Mirandola display a strong-phase duration of about 20 seconds and a visible low-frequency content in the horizontal components opposite to the higher frequency content of the vertical one.

## LIQUEFACTION

Liquefaction was observed in many municipalities, from the ones closest to the epicentre (San Felice sul Panaro) to Sant'Agostino, where

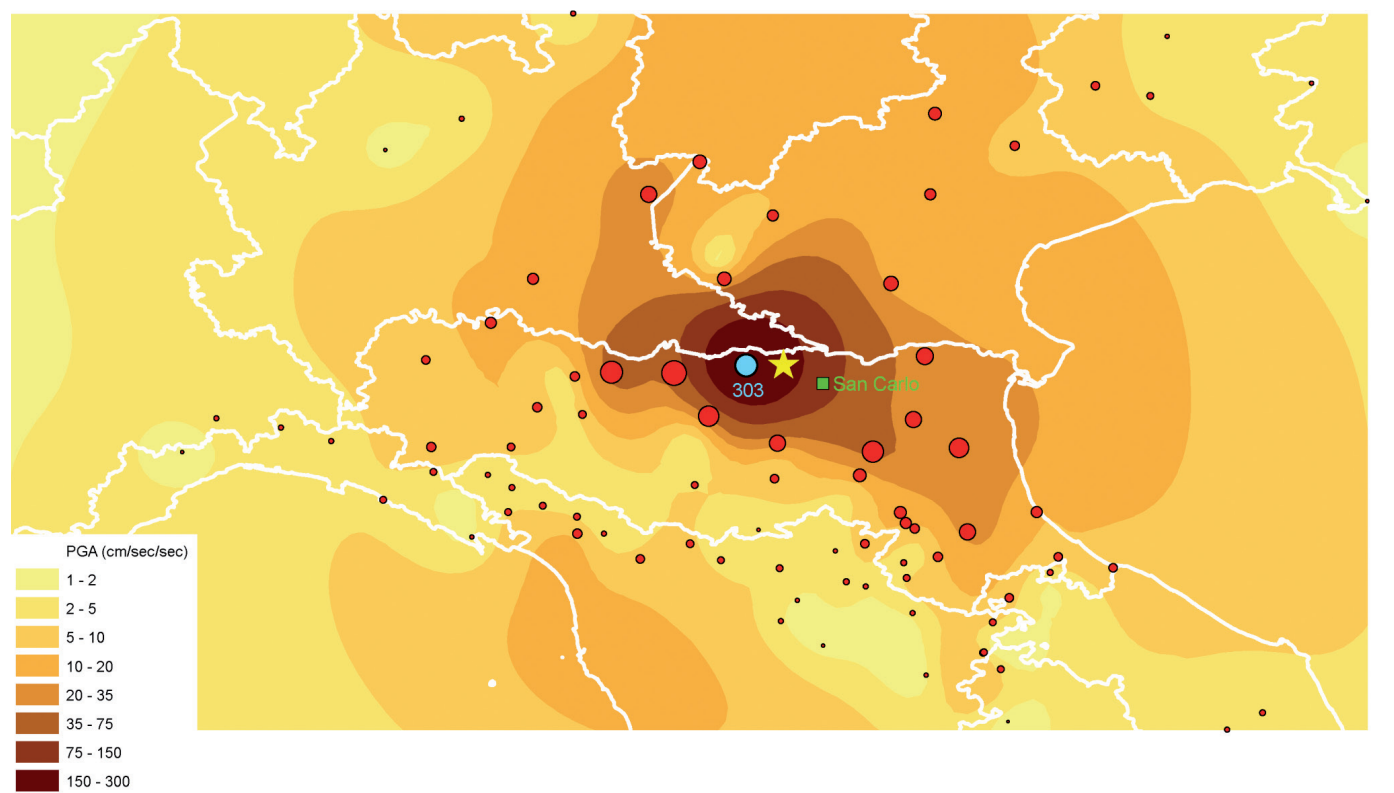


Fig. 3 - Campo di accelerazione al suolo basato su analisi geostatistiche (con funzioni a base radiale) delle registrazioni delle accelerazioni al suolo. La carta mostra anche la posizione della frazione di San Carlo, dove si sono verificati più diffusamente i fenomeni di liquefazione

- Ground acceleration field based on geostatistical analyses (with radial basis functions) of recorded ground accelerations. The position of San Carlo, where most of the liquefaction phenomena occurred, is also shown on the map

dove ha raggiunto il picco massimo. La frazione di San Carlo sorge su un'antica pianura dove il fiume Reno scorreva da Sud-Ovest a Nord-Est, prima di essere deviato verso SE nel XVIII secolo per evitare le esondazioni ricorrenti nella pianura di Ferrara. Misure preliminari del rumore ambientale indicano una frequenza di vibrazione fondamentale costante di circa 0.8 Hz (Dario Albarello, comunicazione personale), compatibile con depositi alluvionali sciolti con spessore di varie decine di metri.

La liquefazione ha interessato tutta l'antica pianura fluviale, dal Comune di Sant'Agostino a quello di Mirabello, esattamente lungo l'allineamento SW/NE dell'antica pianura del fiume Reno. La zona più colpita è stata la frazione San Carlo, che fa parte del Comune di Sant'Agostino. La Figura 5 mostra i siti che hanno avuto i maggiori fenomeni di liquefazione e dove sono stati raccolti campioni di sabbia.

Procedendo lungo il vecchio corso del fiume Reno da Sud-Ovest a Nord-Est, diffusi fenomeni di liquefazione sono stati rilevati nel cimitero, nella parte interna dell'antica pianura fluviale e a San Carlo. Seguono alcune foto dei tre siti illustrati nella Figura 5.

Prima del sisma il livello statico di falda si trovava a una profondità di circa 8 m, mentre subito dopo l'evento esso ha raggiunto 1.5-2 m. A San Carlo vi sono state diffuse fessurazioni del terreno; la liquefazione ha interessato una superficie di circa 4 ettari, mentre le fuoriuscite di

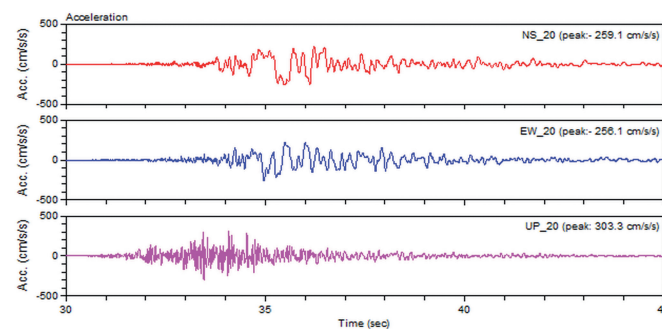


Fig. 4 - Storie temporali rilevate a Mirandola, a 13 km dall'epicentro del mainshock (M 5.9) verificatosi il 20 maggio. (fonte: RAN, Rete Accelerometrica Nazionale, Dipartimento della Protezione Civile)

- Time-histories recorded at Mirandola, 13 km from the epicentre of the M5.9 mainshock occurred on 20 May. (source: RAN, National Accelerometric Network, Department of Civil Protection)

it reached its peak. The locality of San Carlo lies over an old river plain, where the Reno river flowed from SW to NE, before being diverted towards SE in the 18<sup>th</sup> century to eliminate the recurrent floods that affected the plain of Ferrara town. Preliminary measurements of ambient noise indicate a constant fundamental frequency of vibration of about 0.8 Hz (Dario Albarello, personal communication), which was consist-





Fig. 5 - Siti del Comune di Sant'Agostino dove si sono verificati i maggiori fenomeni di liquefazione e dove sono stati raccolti campioni di sabbia  
 - *Sites of Sant'Agostino municipality where the most significant liquefaction phenomena occurred and where samples of sands were collected*



ent with a thickness of several tens of metres of loose alluvial deposits.

Liquefaction was detected throughout the old river plain from Sant'Agostino to the Mirabello municipalities, exactly along the SW-NE alignment of the old Reno river plain. The most affected locality was San Carlo, belonging to the Sant'Agostino municipality. Figure 5 shows the sites which experienced the most significant liquefaction phenomena and where samples of sands were collected.

Following the old course of the Reno River from SW to NE, extensive liquefaction phenomena were observed in the cemetery, in the inner side of the old river plain and at San Carlo. The following are some pictures taken in the three sites of Figure 5.

Before the earthquake, the static water table was around 8 metres below the ground, while soon after the earthquake it reached 1.5-2 metres below the ground. San Carlo was extensively affected by ground fissures; liquefaction involved a surface of about 4 hectares and the sands ejected locally reached a thickness of 60 cm.

Sands were sampled in the three sites of Figure 5 and their grain size distributions are shown in Figure 9.

The sandy material ejected by ground fissures, such as the one sampled inside the cemetery and at San Carlo, is fairly uniform (uniformity



Fig. 6 - Rifluimenti di sabbia lungo la strada principale che porta al cimitero (sinistra) e vulcanelli nell'antica pianura del Reno (destra)  
 - *Sand deposits along the main road leading to the cemetery (left) and sand boils in the old Reno river plain (right)*



sabbia in superficie hanno raggiunto uno spessore di 60 cm. Le sabbie sono state campionate nei tre siti della Fig. 5; la relativa granulometria è riportata nella Fig. 9. Il materiale sabbioso espulso in superficie lungo le fessurazioni del terreno, come quello campionato nel cimitero e a San Carlo, è abbastanza uniforme (coefficiente di uniformità: circa 3) e quasi esclusivamente costituito da sabbie, mentre quello prelevato dai vulcanelli è meno uniforme (coefficiente di uniformità: circa 10) e più fine (sabbia limosa o limo sabbioso). Le principali proprietà fisiche di tale materiale sono riassunte nella Tab. 1.

Unit weight of soil particles kN/m <sup>3</sup>	Dry unit weight kN/m <sup>3</sup>	Void index	Porosity (%)	Uniformity coefficient C <sub>u</sub>
25.5 - 26.0	12.8 - 15.7	1.01 - 0.65	39 - 50	3 - 12

Tab. 1 - Principali proprietà fisiche delle sabbie espulse in superficie durante i fenomeni di liquefazione (prove di laboratorio). Alcune prove speditive effettuate sulle sabbie campionate a San Carlo hanno consentito di ottenere l'involuppo di resistenza al taglio riportato nella Fig. 10  
- *Main physical properties of sands ejected during liquefaction (laboratory testing). Some expeditious strength tests conducted on the sands sampled at San Carlo indicated the shear strength envelope shown in Fig. 10*



Fig. 7 - Accumuli di sabbia sulle strade di San Carlo  
- *Massive deposits of sands covering roads at San Carlo*



Fig. 8 - Fessurazioni del terreno con espulsione di sabbia. Box auto con uno spessore di sabbia di circa 60 cm  
- *Ground fissures from which sands were ejected and car boxes filled with about 60 cm-thick sands*

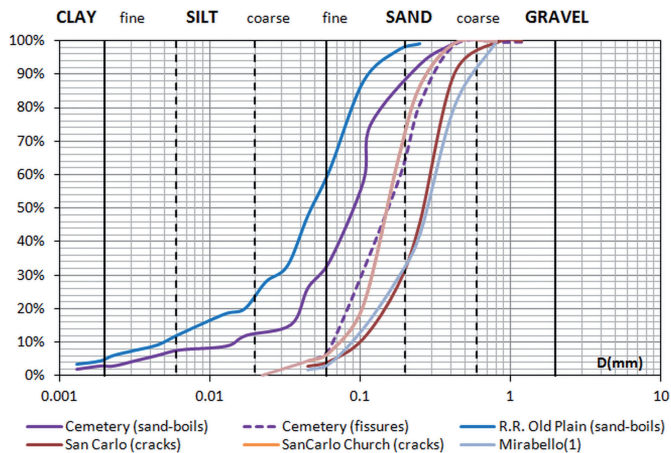


Fig. 9 - Granulometria di quattro campioni di sabbie prelevati nei siti della Figura 5  
 - Grain size distribution of four samples of sands taken in the sites shown in Figure 5

Rilievi geotecnici e geofisici in sito, tuttora in corso, permetteranno di stabilire le proprietà fisiche e meccaniche dei depositi sotterranei.

I danneggiamenti verificatisi nella frazione di San Carlo sono dovuti alla liquefazione. Infatti, ad eccezione degli edifici antichi in muratura e laterizi lesionati in conseguenza del moto sismico, la maggior parte dei danni alle costruzioni in cemento armato è dovuta alle deformazioni del suolo indotte dalla liquefazione, dalle fessurazioni del terreno e anche dagli spostamenti degli antichi argini fluviali. La Fig. 11 mostra i danni al seminterrato della Chiesa di San Carlo.

La Chiesa di San Carlo è una struttura in cemento armato di costruzione recente, che ha subito lievi danni a causa delle scosse sismiche. Tuttavia, il seminterrato si è sollevato di circa 60 cm in conseguenza della liquefazione e sta subendo assestamenti differenziali a causa della dissipazione delle sovrappressioni idriche indotte dalle scosse sismiche e del compattamento del sottosuolo indotto dalle vibrazioni sismiche.



Fig. 11 - Danni al seminterrato della Chiesa di San Carlo  
 - Damage to the underground floor of the San Carlo Church

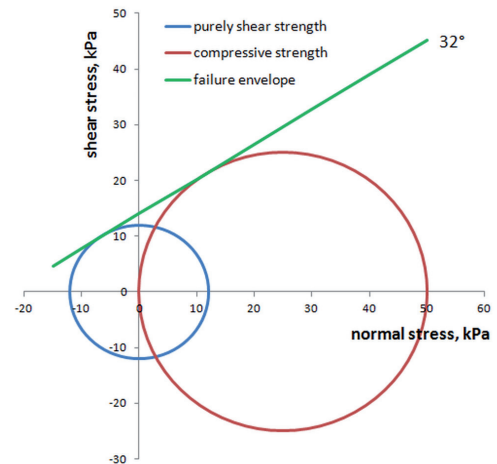


Fig. 10 - Resistenza al taglio (determinata in sito) delle sabbie espulse in superficie durante la liquefazione  
 - In-situ determined shear strength of sands ejected during liquefaction

coefficient: around 3) and almost exclusively consisting of sands, while the samples taken near sand boils are less uniform (uniformity coefficient: around 10) and finer (silty sand or sandy silt). Their main physical properties are summarized in Table 1.

At the time of writing, in-situ geotechnical and geophysical investigations are under way; these investigations will reveal the physical and mechanical properties of underground deposits.

The damages in San Carlo were driven by liquefaction. Indeed, except for old masonry and brick buildings that suffered damage due to earthquake shaking, most of the damage to reinforced-concrete buildings was due to ground failures induced by liquefaction, ground fissures and ground displacements of the old river banks, too. Figure 11 shows the underground floor of the Church of San Carlo with an example of damage.

The Church of San Carlo is a recently-built reinforced-concrete structure, which suffered minor damage due to ground shaking. However, the underground floor lifted up owing to liquefaction by about 60 cm and is now settling in a differential manner due to dissipation of water overpressures induced by earthquake shaking and compaction of underground soil owing to the vibratory motion of the earthquake.

## CURRENT INVESTIGATIONS AND PRELIMINARY FINDINGS

Despite no seismic record of the mainshock is available in the area most affected by liquefaction, many temporary seismic stations were placed in the epicentral area, which recorded several aftershocks. A plausible second mainshock with moment magnitude 5.8 struck the region on 29 May 2012, at a closer distance to Mirandola than the first mainshock (3 vs. 13 km, respectively). This shock was recorded both by the Mirandola permanent seismic station and by the Sant'Agostino temporary seismic station. Figure 12 compares the response spectra derived from the time-histories recorded by the two seismic stations.

It's worth noting the unusual pattern of the vertical component in both



## INDAGINI IN CORSO E RISULTATI PRELIMINARI

Anche se non si dispone di registrazioni sismiche del mainshock nell'area maggiormente colpita dalla liquefazione, molte stazioni sismiche temporanee, installate nell'area epicentrale, hanno rilevato numerose repliche. Un plausibile secondo mainshock con una magnitudo momento di M 5.8 ha colpito la regione il 29 maggio 2012, più vicino a Mirandola rispetto al primo (3 km rispetto a 13 km). Questa scossa è stata rilevata sia dalla stazione sismica permanente di Mirandola, sia dalla stazione temporanea di Sant'Agostino. La Figura 12 raffronta gli spettri di risposta ricavati dalle serie storiche registrate dalle due stazioni.

E' il caso di sottolineare l'insolito andamento della componente verticale in entrambe le registrazioni sismiche. Mentre a Mirandola la componente verticale ha superato di gran lunga quelle orizzontali alle alte frequenze, a Sant'Agostino la componente verticale è stata più elevata alle basse frequenze, vicine a quelle di risonanza (intorno a 0.8-1 Hz) dei livelli di terreno rilevate attraverso misure del rumore ambientale (Albarello, comunicazione personale).

I segnali sismici registrati a Sant'Agostino evidenziano lunghe code e onde armoniche, come risulta dalla Figura 13.

Indagini di dettaglio sono state svolte in sito subito dopo il mainshock (Gruppo di Lavoro Liquefazione - Regione Emilia-Romagna). In funzione del quadro geologico, sono state effettuate prove geotecniche e geofisiche al fine di caratterizzare i livelli del suolo interessati dalla liquefazione dal punto di vista fisico e meccanico.

La Figura 14 mostra il profilo tipico del suolo nell'area interessata dalla liquefazione e i risultati delle prove in sito geofisiche e geo-

the seismic records. While at Mirandola the vertical component largely overcame the horizontal ones at the high frequencies, at Sant'Agostino the vertical component was higher at low frequencies, near the resonance frequencies (around 0.8-1 Hz) of the soil layers detected through ambient noise measurements (Albarello, personal communication).

The seismic signals recorded at Sant'Agostino show long queues and harmonic waves as apparent from Figure 13.

Detailed field investigations were carried out soon after the mainshock (Working-Group Liquefaction, Emilia-Romagna Region). They consisted of geotechnical and geophysical tests aimed to point out the geological framework and to derive physical and mechanical properties of the soil layers affected by liquefaction.

A typical soil profile of the area affected by liquefaction is shown in Figure 14 along with on-site geophysical and geotechnical testing. The average shear wave velocity profile is shown along with the range of Vs-values deriving from seismic cone penetration tests (SCPTU). In the same graph the results of standard penetration tests (SPT blow-counts) are shown, too. Soil stiffness progressively increases with depth according to the character of normally-consolidated soils.

Two main sandy layers have been well recognized at depths of 7 to 12 meters and 20 to 25 meters, with uniform coefficients from 2 to 4. They are confined within finer soils with soil plasticity between 15 and 40%.

Dynamic laboratory testing were carried out to investigate the non-linear soil behaviour, whose trend is shown in Fig. 15.

Viscous damping appears to be poorly dependent on the grain

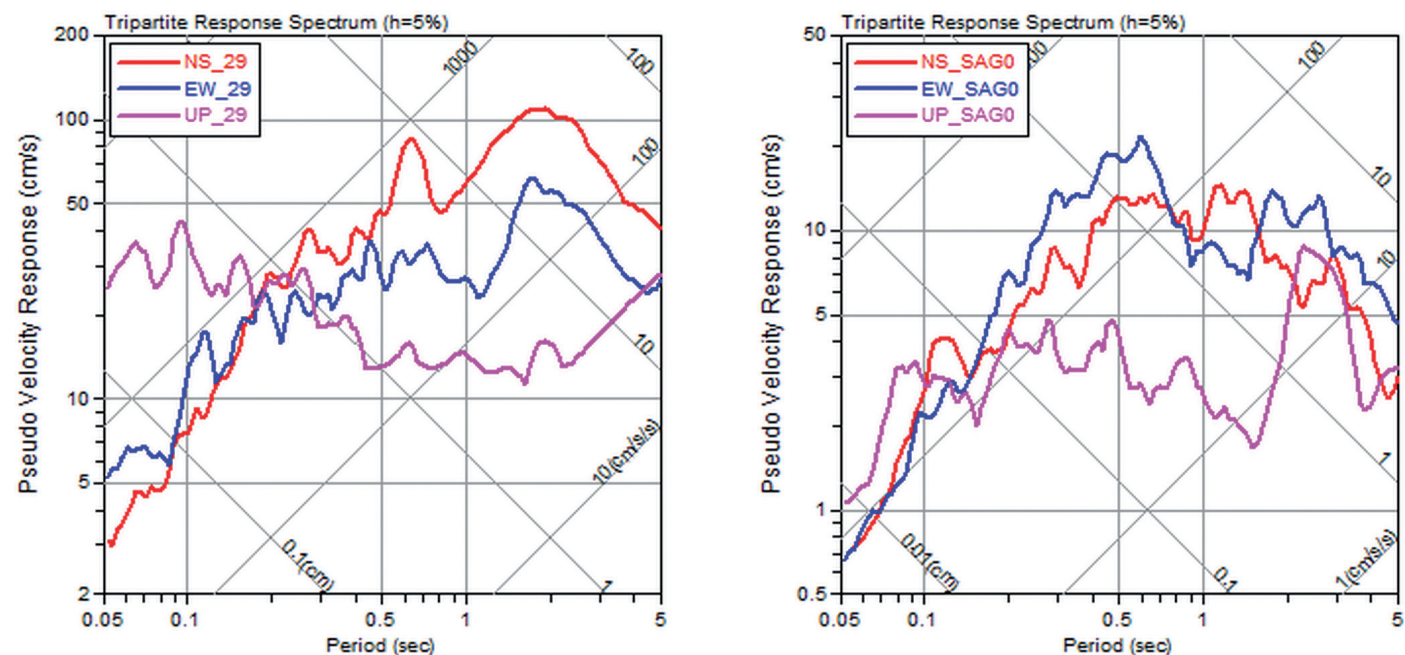


Fig. 12 - Spettri di risposta tripli del secondo mainshock (M5.8) del 29 maggio registrati a Mirandola (sinistra) e a Sant'Agostino (destra)  
- Tripartite response spectra of the second mainshock (M5.8 on 29 May) recorded at Mirandola (left) and Sant'Agostino (right)



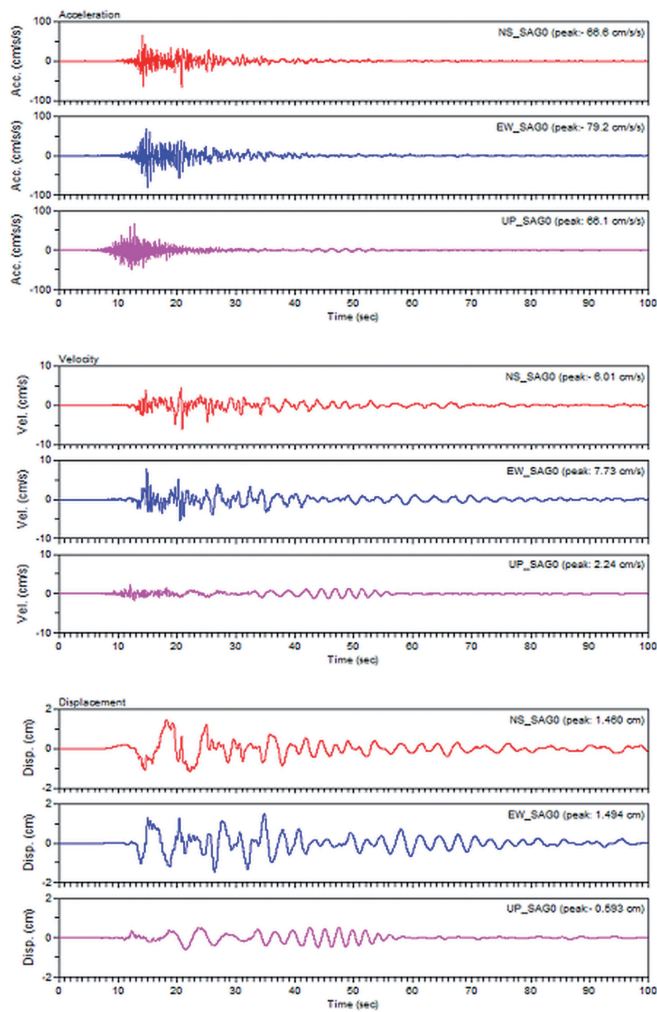


Fig. 13 - Storie temporali registrate a Sant'Agostino durante il secondo mainshock del 29 maggio di M 5.8. (fonte: RAN, Rete Accelerometrica Nazionale, Dipartimento di Protezione Civile)

- Time-histories recorded at Sant'Agostino during the second mainshock on 29 May, M5.8. (source: RAN, National Accelerometric Network, Department of Civil Protection)

tecniche. E' illustrato il profilo di velocità media delle onde di taglio e il campo di valori Vs ottenuti dalle prove penetrometriche con cono sismico (SCPTU). Il grafico mostra anche i risultati delle prove penetrometriche (SPT blow-counts). La rigidità del suolo cresce progressivamente con la profondità, in accordo con le caratteristiche dei terreni normal consolidati.

Due principali livelli sabbiosi sono stati riconosciuti a profondità di 7-12 m e 20-25 m, con coefficienti di uniformità di 2-4, contenuti all'interno di suoli più fini con una plasticità del 15-40%.

Prove dinamiche di laboratorio sono stati condotte per studiare il comportamento non lineare del suolo, il cui andamento è riportato nella Figura 15.

Lo smorzamento viscoso, contrariamente alla rigidità, non sem-

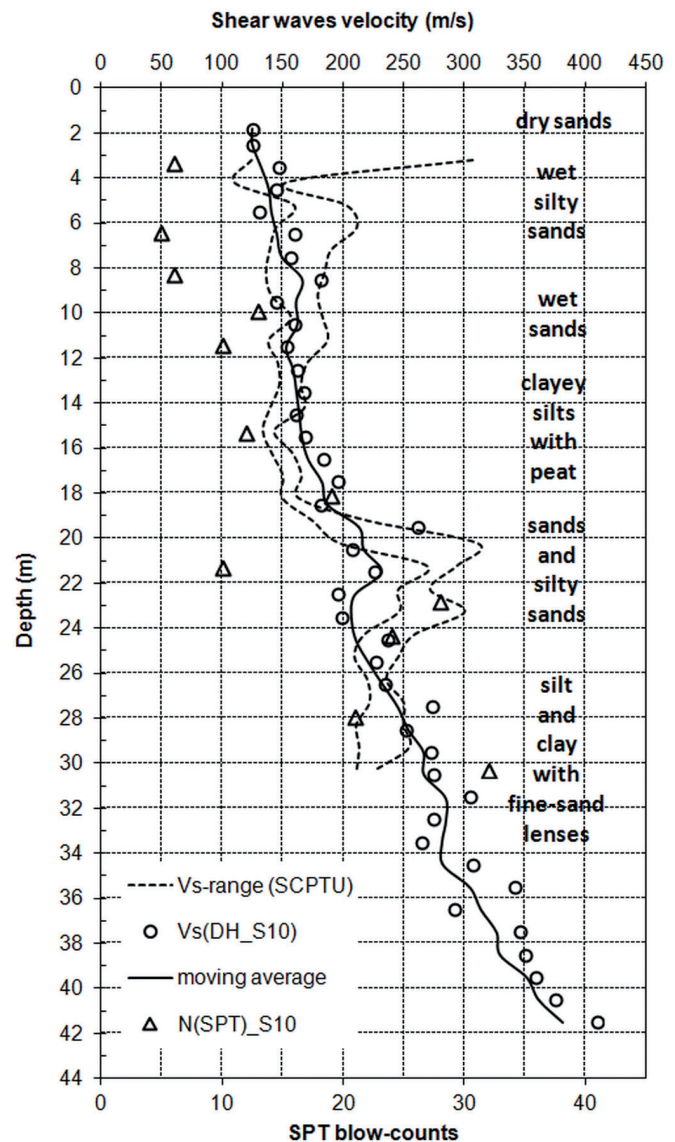


Fig. 14 - Risultati delle prove geotecniche in situ. Profilo verticale delle onde di taglio

- Shear waves vertical profile with stratigraphy and on-site geotechnical testing

size opposite to stiffness. Sandy and silty layers show to behave almost equally, while clays are clearly more elastic than sands and silts.

## CONCLUSIONS

The Emilia 2012 M5.9 Earthquake induced an unusual pattern of ground failures in a wide area roughly coinciding with the epicentral area of the aftershocks distribution. Among them, the most significant and damaging ones were extensive liquefaction phenomena. Although liquefaction is not unusual in strong earthquakes and in loose saturated deposits, it has been never reported to such an extent in

bra dipendere molto dalla granulometria. I livelli sabbiosi e limosi hanno un comportamento quasi identico, mentre le argille presentano una differente risposta deformativa rispetto alle sabbie e ai limi.

## CONCLUSIONI

Il sisma dell'Emilia del 2012 (M 5.9) ha indotto insoliti effetti deformativi del suolo su una vasta area coincidente con quella epicentrale corrispondente alla distribuzione delle repliche. Fra questi effetti, quelli più rilevanti e dannosi sono da ricondurre a diffusi fenomeni di liquefazione. Sebbene la liquefazione non sia un fenomeno insolito durante i forti terremoti e in presenza di depositi sciolti saturi, una liquefazione di entità pari a quella registrata in Emilia non è stata mai documentata in Italia. Infatti, i pochi casi di liquefazione segnalati sono, fra i sismi più recenti, quelli del Friuli nel 1976 e quello dell'Irpinia nel 1980 (MARTINO *et alii*, 2012). Tuttavia, la magnitudo di questi ultimi è stata superiore a quella dell'Emilia, ma le aree interessate sono risultate meno suscettibili alla liquefazione. Liquefazioni storiche sono documentate nella stessa area in conseguenza di almeno due sismi, nel 1570 e nel 1624 d.C. (PRESTININZI & ROMEO, 2000; GALLI, 2000). Dalle prime indagini svolte, è possibile trarre le seguenti conclusioni preliminari:

- 1) la presenza di depositi sciolti ha prolungato la durata del moto sismico, inducendo carichi ciclici e determinando incrementi delle pressioni interstiziali ben superiori ai carichi verticali;
- 2) forti movimenti del terreno si sono verificati in tutta l'area interessata dalla liquefazione, in particolare in corrispondenza della "parete" della faglia sismogenetica;
- 3) geologicamente, l'area è un'antica pianura fluviale, dove i meandri del fiume hanno depositato banchi di sabbia e limo. I terreni alluvionali sono molto giovani (Olocene) e sciolti, quindi molto suscettibili agli effetti di liquefazione;
- 4) la distribuzione granulometrica dei terreni liquefatti è abbastanza uniforme nel campo delle sabbie limose;
- 5) il livello statico di falda (testimoniato dalla popolazione locale) indica che la liquefazione si è verificata a una profondità di circa 10 m dalla superficie.

La liquefazione ha modificato la densità relativa dei terreni, come dimostrato dal secondo forte mainshock del 29 maggio (M 5.8); questa scossa non ha prodotto nell'area fenomeni comparabili a quelli della prima. Tuttavia, occorre approfondire la conoscenza degli antichi alvei fluviali e delle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati. Questo è l'unico modo per individuare aree suscettibili di liquefazione e per prevenirne gli effetti indesiderati, in quanto i sismi locali hanno dimostrato di avere un'energia (in termini di ampiezza e durata) tale da indurre, in tutta l'area colpita, cicli sismici in grado di incrementare la pressione interstiziale di una falda molto vicina alla superficie.

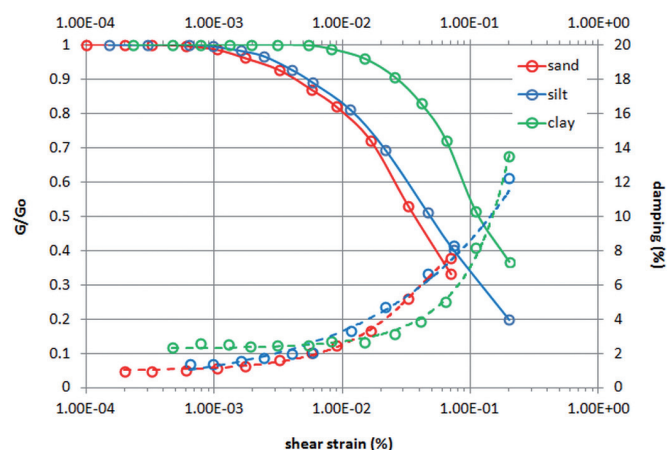


Fig. 15 - Rigidità e curve di variazione dello smorzamento in funzione delle deformazioni di taglio per i suoli tipici del sito indagato  
- Stiffness and damping variation curves as a function of shear strain for typical soils of the investigated site

Italy. In effect, among the most recent earthquakes, few instances of liquefaction were only reported for the Friuli earthquake in 1976 and the Irpinia earthquake in 1980 (MARTINO *et alii*, 2012). Nevertheless, the magnitude of the latter earthquakes was higher than the Emilia one but the affected areas were less prone to liquefaction. Historical liquefaction is documented in the same area as a consequence of at least two past earthquakes, in 1570 and 1624 A.D. (PRESTININZI & ROMEO, 2000; GALLI, 2000). The following preliminary findings may be outlined on the basis of the first investigations carried out:

- 1) Loose deposits increased the duration of the earthquake motion, thus inducing cycles of loading that increased pore water pressures well above vertical loads;
- 2) Strong ground motion occurred throughout the area affected by liquefaction, namely on the hanging wall of the causative fault;
- 3) Geologically, the area is an old river plain, where the river wandered depositing seams of sands and silts. Alluvial soils are very young (Holocene) and loose thus being very prone to liquefaction effects;
- 4) The grain size distribution of liquefied soils is quite uniform in the field of silty sands;
- 5) the static water table (as reported by the locals) suggests that liquefaction occurred at a depth of about 10 metres from the ground level.

Liquefaction changed the relative density of local soils, as demonstrated by a second large mainshock which took place on 29 May (M5.8); this shock did not produce phenomena comparable to those caused by the first shock in the area. Nevertheless, the need arises for deeply investigating the pattern of the old river channels and the geotechnical nature of the soils involved. This is the only way to identify liquefaction-prone areas and to prevent such an undesirable effect, since the local earthquakes have proved to possess enough energy (in terms of amplitude and duration) to induce earthquake cycles capable of increasing the pore pressure of a water table lying very close to the ground surface throughout the struck area.

## RINGRAZIAMENTI

L'Autore ringrazia tutti coloro che hanno contribuito, in modo diretto o indiretto, al presente lavoro e in particolare: Gianluigi Tonelli per le prove di laboratorio; Milena Mari e Giulio Pappafico per le analisi geostatistiche; Dario Albarello and Yoshi Fukushima per i costruttivi scambi di opinione; Cristiano Guerra per l'assistenza prestata durante i campionamenti; Alberto Prestininzi per il suo stimolante impegno; Luca Martelli e Giuseppe Naso per i dati preziosi forniti. Un ringraziamento particolare va alla popolazione locale, che è sempre stata cortese anche in una situazione tragica.

## ACKNOWLEDGMENTS

The Author thanks all the people who directly or indirectly contributed to this work and especially: Gianluigi Tonelli for laboratory tests; Milena Mari and Giulio Pappafico for geostatistical analyses; Dario Albarello and Yoshi Fukushima for constructive discussions; Cristiano Guerra for sampling support; Alberto Prestininzi for stimulating efforts; Luca Martelli and Giuseppe Naso for valuable information. Special thanks go to the local people who always showed kindness even at a tragic time.

## REFERENCES / OPERE CITATE

- GALLI P. (2000) - *New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction*. Tectonophysics, **324**: 169-187.
- MARTINO S., PRESTININZI A. & ROMEO R.W. (2012) - *An upgrade of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures, CEDIT*. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon-Portugal, September 20-24 2012, paper No. 2419.
- PRESTININZI A. & ROMEO R.W. (2000) - *Earthquake-Induced Ground Failures in Italy*. Engineering Geology, **58** (3-4): 387-397.
- RAN (Italian Accelerometric Network) - Department of Civil Protection. URL: <http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/ran.wp>
- WORKING-GROUP LIQUEFACTION, EMILIA-ROMAGNA REGION. URL: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>

*Received June 2012 - Accepted October 2012*