

# Analisi dei fenomeni deformativi indotti dalla sequenza sismica emiliana del 2012 su un tratto di argine del Canale Diversivo di Burana (FE)

Tonni Laura,\* Gottardi Guido,\* Amoroso Sara,\*\* Bardotti Roberto,\*\*\* Bonzi Luciana,\*\*\*\*  
Chiaradonna Anna,<sup>^</sup> d'Onofrio Anna,<sup>^</sup> Fioravante Vincenzo,<sup>^^</sup> Ghinelli Alessandro,\*\*\* Giretti  
Daniela,<sup>^^</sup> Lanzo Giuseppe,<sup>+</sup> Madaia Claudia,\*\*\* Marchi Michela,\* Martelli Luca,\*\*\*\* Monaco  
Paola,<sup>++</sup> Porcino Daniela,<sup>+</sup> Razzano Roberto,<sup>^</sup> Rosselli Silvia,\*\*\*\* Severi Paolo,\*\*\*\* Silvestri  
Francesco,<sup>^</sup> Simeoni Lucia,<sup>++</sup> Vannucchi Giovanni,\*\*\* Aversa Stefano<sup>++</sup>

## Sommario

L'articolo descrive uno studio riguardante i fenomeni deformativi osservati dopo il sisma dell'Emilia del maggio 2012 lungo un tratto di argine del Canale Diversivo di Burana che ricade nell'abitato di Scortichino, frazione del comune di Bondeno (FE). In questa porzione del rilevato arginale sono state edificate oltre un centinaio di abitazioni ed alcune strutture di medio-piccole dimensioni adibite ad attività produttive o a deposito, molte delle quali sono risultate pesantemente danneggiate e dichiarate inagibili proprio a causa delle deformazioni e del sistema di fratture longitudinali presenti nel terreno in seguito al terremoto.

Il contributo qui presentato si prefigge di analizzare la risposta sismica dell'argine durante la sequenza sismica del 2012, comprendere le cause dei dissesti nonché individuare le necessarie azioni di mitigazione e gli eventuali interventi di messa in sicurezza nei confronti di terremoti futuri. A questo scopo è stata condotta un'ampia campagna sperimentale di indagini in sito e in laboratorio, finalizzata alla ricostruzione di un accurato modello geotecnico per la valutazione delle condizioni di stabilità dell'argine in condizioni sismiche, portando in conto anche l'eventuale insorgenza di fenomeni di liquefazione nei terreni sabbiosi superficiali costituenti la fondazione del corpo arginale.

L'analisi illustrata è il risultato dell'attività di indagine svolta per più di un anno dal Gruppo di Lavoro Argini (GdLA), costituitosi nel luglio 2012 in seguito ad un accordo fra la Regione Emilia-Romagna e l'Associazione Geotecnica Italiana per la verifica delle condizioni di stabilità dei rilevati arginali nelle aree colpite dal terremoto.

## 1. Introduzione

Come è noto, la vulnerabilità di un rilevato arginale, intesa come la predisposizione di un argine a crollare o comunque ad essere danneggiato da un evento alluvionale, è generalmente associata a diversi fenomeni quali la filtrazione sotto o all'interno dell'argine, il sormonto, l'instabilità delle scarpate [VANNUCCHI *et al.*, 2014; SIMONINI *et al.*, 2014]. In occasione di un evento sismico, un ulteriore contributo alla vulnerabilità può derivare dalla liquefazione dell'argine o del terreno di fondazione, per effetto della quale possono verificarsi collassi per perdita

di capacità portante, instabilità delle scarpate, grandi cedimenti e spostamenti orizzontali che possono comunque determinare una marcata riduzione del franco.

Storicamente il problema della vulnerabilità sismica dei rilevati arginali è stato trascurato anche in paesi ad elevata sismicità come gli Stati Uniti e il Giappone. In quest'ultimo, ad esempio, si riteneva che la probabilità di occorrenza simultanea di un forte terremoto e di un'alluvione fosse molto bassa e conseguentemente si accettavano fattori di sicurezza per le verifiche sismiche anche inferiori all'unità, giudicando accettabile un periodo di due settimane per gli interventi di ripristino. La situazione è drasticamente cambiata a seguito dei terremoti di Kushiro-Oki del 1993 [SASAKI *et al.*, 1994] e di Kobe del 1995 [MATSUO, 1996], soprattutto a causa dei forti danneggiamenti occorsi a lunghi tratti di argine e dei tempi molto lunghi necessari per gli interventi di ripristino, in special modo nel periodo invernale. Ciò ha portato anche all'emanazione di prescrizioni progettuali per la verifica in condizioni sismiche di nuovi rilevati arginali [SUGITA e TAMURA, 2008]. Il recente terremoto di Tohoku del 2011, con la sua vasta casi-

\* Università di Bologna

\*\* INGV

\*\*\* Università di Firenze

\*\*\*\* Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna

<sup>^</sup> Università di Napoli Federico II

<sup>^^</sup> Università di Ferrara

<sup>+</sup> Sapienza Università di Roma

<sup>++</sup> Università dell'Aquila

<sup>+</sup> Università Mediterranea di Reggio Calabria

<sup>++</sup> Università di Napoli Parthenope

stica sulla risposta sismica di rilevati arginali [SASAKI *et al.*, 2012; TOWHATA, 2014], ha da un lato messo in evidenza che la causa principale dei danneggiamenti e dei fenomeni di rottura osservati è attribuibile alla liquefazione del terreno di fondazione, e dall'altro ha consentito di accertare il soddisfacente comportamento in condizioni sismiche di argini che erano stati soggetti ad interventi di messa in sicurezza. Anche negli Stati Uniti si è recentemente raggiunta piena consapevolezza dell'importanza della problematica (e.g. KWAK *et al.*, 2012), come testimoniano i lavori di ATHANASOPOULOS-ZEKKOS e SAADI [2012] e ATHANASOPOULOS-ZEKKOS e SEED [2013] che descrivono uno studio sistematico sulla risposta dinamica di alcuni rilevati arginali e propongono una procedura semplificata per valutare la suscettibilità alla liquefazione.

In Italia, se si eccettua un limitato numero di studi, fra i quali quello recentemente condotto sugli argini del fiume Po e illustrato nei lavori di PERGALANI *et al.* [2013]; GIRETTI *et al.* [2013]; MARTELLI *et al.* [2014] e MERLI *et al.* [2014], il problema della vulnerabilità sismica dei rilevati arginali è stato generalmente tenuto in scarsa considerazione, quantomeno fino alla sequenza sismica che nel maggio 2012 ha gravemente colpito un ampio settore della pianura padana emiliana, tra le province di Modena e Ferrara. Tale sequenza è stata causa, tra gli altri, di significativi dissesti in alcuni rilevati arginali presenti nell'area del sisma, innescando deformazioni, fratture e fenomeni di liquefazione.

Una delle strutture arginali risultata maggiormente danneggiata dal sisma è senz'altro quella del Canale Diversivo di Burana, in corrispondenza di un tratto di circa 3 km situato nella frazione di Scortichino (comune di Bondeno, FE), lungo il quale sono stati osservati importanti sistemi di fratture longitudinali e numerosi danneggiamenti alla strada comunale e ai manufatti realizzati in cresta al rilevato.

Al fine di analizzare la risposta di questa porzione di argine durante la sequenza sismica, comprendere le cause dei dissesti osservati e suggerire le necessarie azioni di mitigazione, la Regione Emilia-Romagna ha promosso un approfondito studio [GOTTARDI *et al.*, 2014] sui fenomeni deformativi avvenuti e, in accordo con l'Associazione Geotecnica Italiana, ne ha affidato l'incarico ad un Gruppo di Lavoro (Gruppo di Lavoro Argini, GdLA) costituito da una ventina di docenti e ricercatori afferenti a diverse università italiane, molte delle quali già coinvolte nella rete di laboratori ReLUIIS, e da tecnici esperti del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale.

Il presente lavoro descrive l'ampia campagna sperimentale di indagini in sito e in laboratorio programmata dal GdLA al fine di pervenire a un accurato modello geotecnico del rilevato arginale e del suo substrato, illustra i principali risultati delle analisi di stabilità in condizioni sismiche e, una volta indivi-

duati i meccanismi ritenuti responsabili dei fenomeni deformativi osservati, suggerisce alcune strategie di intervento per mitigare la vulnerabilità della struttura arginale nei confronti di eventi sismici futuri.

## 2. Il Canale Diversivo di Burana e i danneggiamenti osservati in occasione della sequenza sismica del 2012

Il Canale Diversivo di Burana, progettato nel 1884 dall'Ufficio del Genio Civile di Modena, è la principale arteria del Bacino delle Acque Alte Modenesi. Nel periodo autunno – inverno raccoglie, attraverso una fitta rete di canali secondari, le acque meteoriche provenienti dalle campagne e da diversi centri urbani, recapitandole a gravità o per scolo meccanico nel fiume Panaro, mentre nella stagione estiva è uno dei vettori principali del sistema idraulico irriguo di quasi tutta la pianura modenese compresa tra i fiumi Secchia e Panaro.

Il canale raggiunge l'abitato di Scortichino (Fig. 1) nella parte finale del suo percorso, ove segue il cosiddetto *ramo della Lunga di Panaro* e risulta pensile. Lungo questo tratto, nelle aree in cui la cresta del rilevato arginale è più ampia, sono stati costruiti nel tempo oltre un centinaio di edifici ad uso abitativo, generalmente organizzati in piccoli insediamenti, insieme ad un limitato numero di capannoni adibiti a depositi e strutture produttive di piccole dimensioni. Dopo gli eventi del maggio 2012, molte di queste costruzioni sono state dichiarate inagibili perché interessate da una serie di dissesti, quali distacchi e rotazioni di corpi di fabbrica originariamente accostati, lesioni nei muri delle abitazioni e danneggiamenti strutturali, senz'altro associabili al sistema di fratture osservato nel terreno, in corrispondenza della cresta dell'argine.

Tali fenomeni non si sono tuttavia manifestati con la stessa estensione ed intensità sull'intero tratto arginale, ma hanno interessato in maniera più significativa quattro aree, indicate in figura 1 con le lettere A, B, C e D, situate a distanza di circa 1 km l'una dall'altra. La figura 2 propone una selezione delle tipiche lesioni riscontrate dopo il sisma. In particolare, le immagini (a) e (b) si riferiscono alle aree A e B e mostrano come le fratture longitudinali formatesi nel terreno, di apertura generalmente dell'ordine di qualche centimetro, proseguano anche attraverso gli edifici da esse intercettati. Le fratture si sono sviluppate principalmente nella parte del coronamento arginale prospiciente il canale, benché siano state rilevate fessurazioni longitudinali non trascurabili anche lungo la strada comunale che corre in prossimità del paramento lato campagna. Le successive due immagini (c) e (d) illustrano invece alcuni dei gravi danneggiamenti osservati nei fabbricati dell'area C: questa porzione di argine è stata interessata dal più

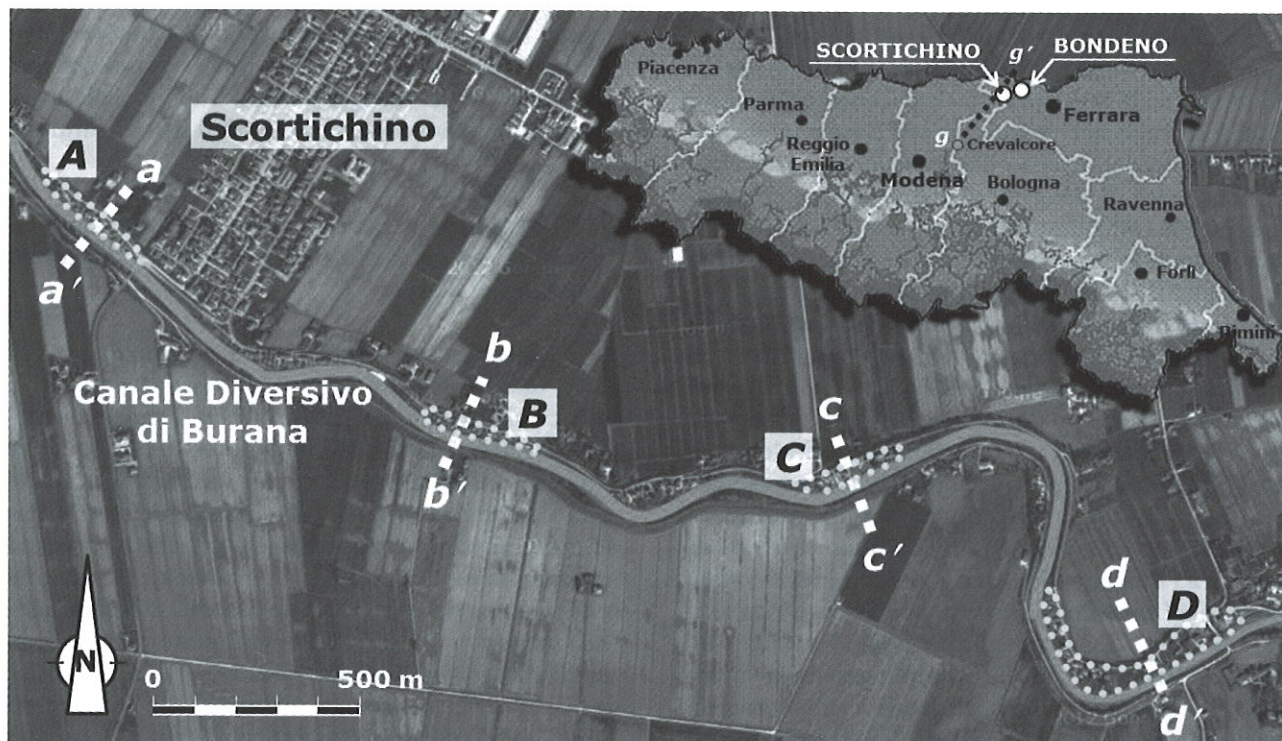


Fig. 1 – Vista aerea del tratto di argine danneggiato, con l'indicazione delle quattro sezioni oggetto di studio.

Fig. 1 – Aerial view of the damaged bank stretch and location of the investigated cross-sections.

ampio sistema di fratture nel terreno e dai dissesti strutturali più significativi, tali da determinare anche l'immediata demolizione del capannone rappresentato in figura 2d.

### 3. Sismicità storica dell'area e sequenza sismica del 2012 (cenni)

Secondo le fonti storiche, il settore della Pianura Padana colpito dalla sequenza sismica del 2012, tra le province di Modena e Ferrara, ricade in un'area a sismicità relativamente moderata, con terremoti che hanno prodotto effetti sino all'VIII grado della scala *Mercalli-Cancani-Sieberg* (*MCS*). Il terremoto più rilevante per l'area in esame è quello di Ferrara del 17 Novembre 1570, il cui epicentro è stimato essere a circa 35 km da quelli degli eventi sismici del 2012 e parametrizzato nei cataloghi [ROVIDA *et al.*, 2011] con un'intensità  $I_{MCS} = VII-VIII$  (magnitudo momento,  $M_w = 5.46$ ). Si trattò di una lunga sequenza composta da scosse principali multiple, con repliche protrattesi sino ai primi mesi del 1572. L'evento causò fenomeni di liquefazione in diverse località, fratture nel terreno e cambiamenti del regime delle acque di superficie [GALLI, 2000]; il comune di Bondeno subì effetti stimati del VII grado *MCS*, mentre Cento e Finale Emilia del VI *MCS* [GALLI *et al.*, 2012]. Altre crisi sismiche di una certa rilevanza, non inserite nei cataloghi ma descritte nel recente lavoro di CASTELLI

*et al.* [2012], si sono verificate nel 1639, 1761 e 1778, con epicentri situati rispettivamente tra Finale Emilia e Carpi, tra Mirandola, Carpi e Modena e, infine, nell'area compresa tra Rovereto sulla Secchia, Concordia sulla Secchia e Carpi.

In tempi più recenti, il settore settentrionale della provincia di Modena è stato scenario di due eventi sismici di magnitudo medio-bassa, riconducibili alla stessa struttura di faglie attivate nel corso della sequenza del 2012: il primo è avvenuto il 6 dicembre 1986 ( $M_w = 4.35$ ), con effetti del VI grado *MCS* riportati a Bondeno, Finale Emilia, Gavello e Scortichino, mentre il secondo risale all'8 maggio 1987 ( $M_w = 4.56$ ), con effetti di VI *MCS* a Camposanto, Finale Emilia, Massa Finalese e San Felice sul Panaro. Ulteriori, recenti scosse di magnitudo moderata, avvenute al limite occidentale dell'area colpita dal sisma del 2012, sono riportate nel catalogo DBMI11 [LOCATI *et al.*, 2011].

La sequenza sismica del maggio 2012 è stata caratterizzata da due scosse principali, di magnitudo locale  $M_L = 5.9$  e  $M_L = 5.8$ , registrate rispettivamente il 20 maggio (04:03 ora locale) e il 29 maggio (09:00 ora locale), e da oltre un centinaio di altre scosse di  $M_L > 3$  avvenute per lo più nei quindici giorni successivi al primo evento. Fra queste, figurano cinque *aftershocks* di magnitudo  $M_L > 5$ .

Una sintesi dell'andamento dell'attività sismica in Emilia fino al 30 giugno 2012, rappresentata sia in termini di numero di eventi per giorno, distinti per

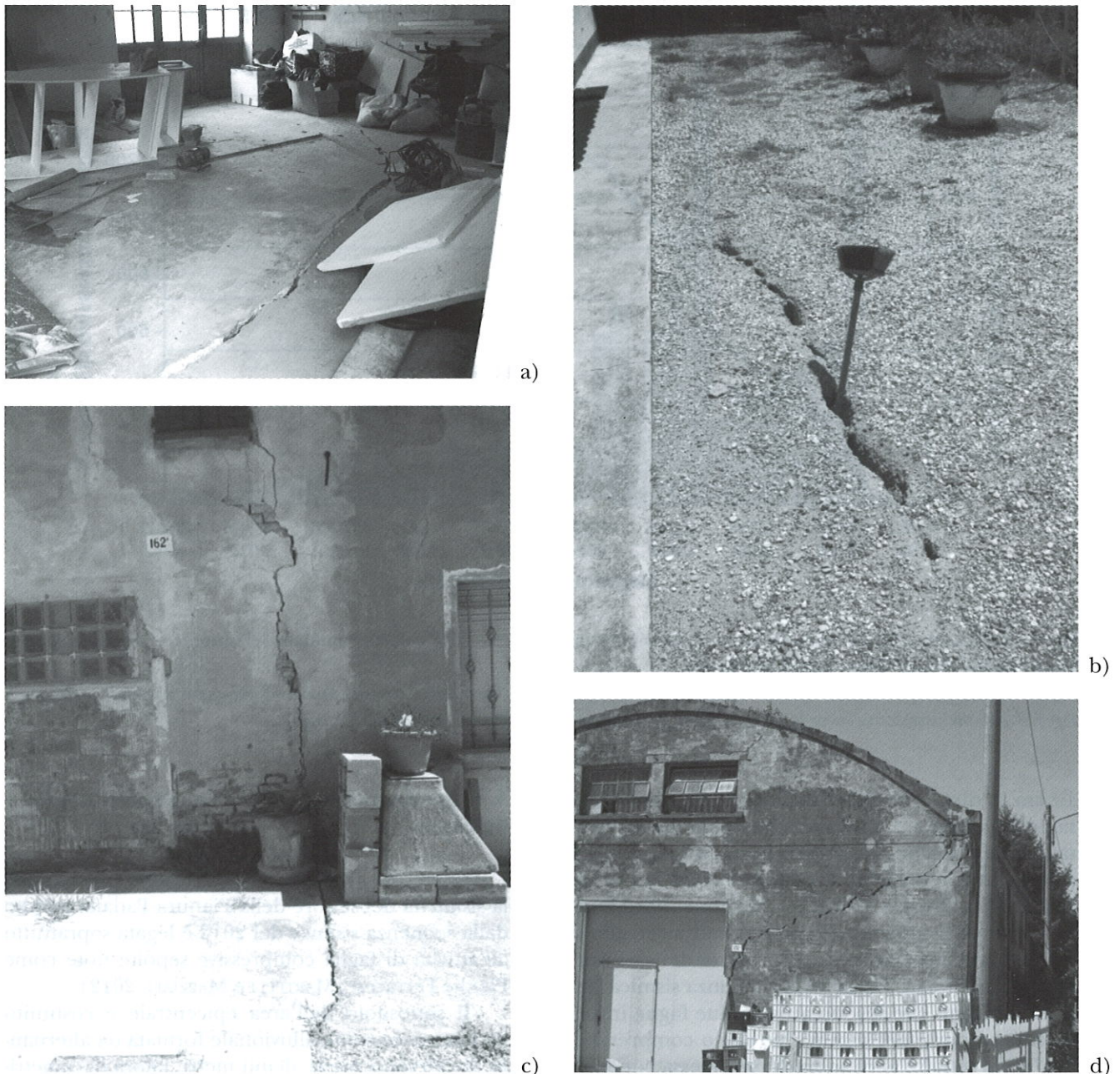


Fig. 2 – Esempi di fratture nel terreno e dissesti agli edifici causati dal sisma nelle aree di indagine A: a); B: b); e C: (c, d).

Fig. 2 – Typical seismic-induced soil fractures and damages to structures observed in areas A: a); B: b); and C: (c, d).

magnitudo, sia in termini di numero complessivo delle scosse, è riportata in figura 3 (Fonte: ISIDE, Italian Seismological Instrumental and parametric DatabasE, ISIDE Working Group, 2010). L'evento principale del 20 maggio è stato seguito da due *aftershocks* di magnitudo  $M_L = 5.1$ , il primo registrato dopo circa 4 minuti, il secondo a distanza di qualche ora e, nel corso dei tre giorni successivi, da altre 68 scosse con  $M_L > 3$  e 240 scosse minori; anche l'evento del 29 maggio è stato seguito, nello stesso giorno, da altri due *aftershocks* con  $M_L > 5$ . Dalla curva cumulata di figura 3 emerge inoltre che il tasso di sismicità nell'area si è mantenuto elevato fino all'inizio del mese di

giugno. Per dettagli sui parametri del moto sismico, la cui illustrazione esula dallo scopo di questo contributo, si rimanda al lavoro di FIORAVANTE *et al.* [2013].

Un aspetto peculiare della crisi sismica del 2012 è rappresentato dal progressivo spostamento degli epicentri verso Ovest, con il conseguente allargamento dell'area di massimo danneggiamento: le coordinate epicentrali del primo evento ( $44.89^\circ$  Lat. Nord,  $11.23^\circ$  Long. Est) identificano infatti un punto ubicato tra gli abitati di Mirandola e Finale Emilia, mentre quelle del secondo evento ( $44.85^\circ$  Lat. Nord,  $11.09^\circ$  Long. Est) corrispondono ad un punto prossimo a Medolla, distante circa

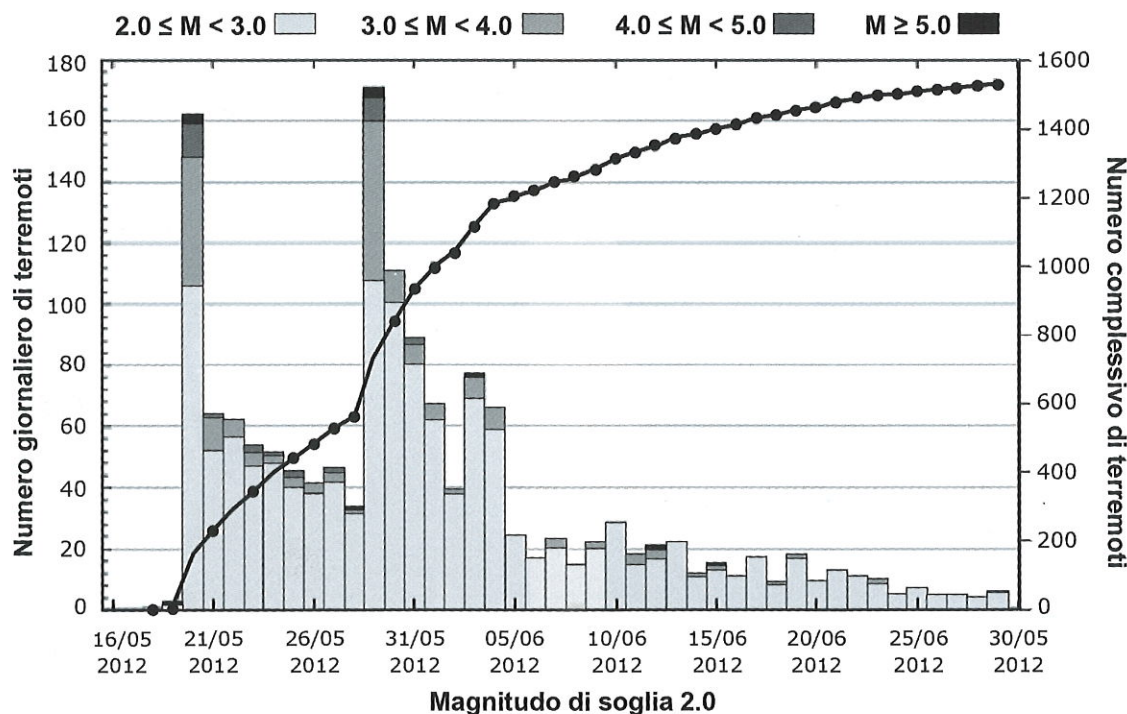


Fig. 3 – Istogramma della sequenza sismica emiliana fino al 30 giugno 2012 e curva cumulata del numero di eventi in funzione del tempo (Fonte: <http://iside.rm.ingv.it>).

Fig. 3 – Histogram of the Emilia seismic sequence until end of June 2012, described in terms of number of events per day and magnitude, together with the cumulative curve of events with time (continuous line) (Source: <http://iside.rm.ingv.it>).

10 km in direzione WSW dall'epicentro della scossa del 20 maggio. L'area complessivamente interessata dalle repliche risulta pertanto piuttosto ampia e si estende approssimativamente per 50 km in direzione Est-Ovest e 15 km in direzione Nord-Sud. Le profondità ipocentrali variano nell'intervallo 0 - 40 km, anche se nella maggior parte dei casi non superano i 10 km. I dati della sequenza sismica del 2012 indicano che si sono attivate due faglie inverse, facenti parte del sistema tettonico compressivo dell'area, sepolte al di sotto di una spessa copertura di sedimenti della piana del Po [MELETTI *et al.*, 2012].

Tra gli effetti ambientali osservati in occasione degli eventi del 2012, uno tra i più rilevanti è senz'altro rappresentato dai diffusi ed estesi fenomeni di liquefazione riscontrati principalmente nella porzione occidentale della provincia di Ferrara, in corrispondenza o nelle vicinanze di paleoalvei fluviali, canali di derivazione e conoidi di rotta dei fiumi Secchia, Panaro e Reno. Tali fenomeni si sono manifestati sotto forma di crateri e vulcanelli, fuoriuscite di acqua e sabbia, crepe, rotture nel terreno e dislocazioni, abbassamenti e sollevamenti del terreno, movimenti orizzontali (*lateral spreading*). Un'ampia descrizione di essi è reperibile, ad esempio, nei lavori di FIORAVANTE *et al.* [2013] e VANNUCCHI *et al.* [2012].

#### 4. Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area

Come già accennato nella sezione precedente, la sismicità del settore della Pianura Padana colpito dalla sequenza sismica del 2012 è legata soprattutto all'attività di faglie compressive sepolte note come Pieghe Ferraresi [MARTELLI e MARZIALI, 2012].

Il sottosuolo dell'area epicentrale è costituito da una successione alluvionale formata da alternanze di orizzonti spessi alcuni metri, talora decametrici, di terreni a grana fine (limi e argille) e granulari (prevalenti sabbie), riferibili a due cicli deposizionali principali: il più antico, noto come Sintema Alluvionale Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), ha età compresa tra 650.000 e 450.000 anni mentre il più recente, noto come Sintema Alluvionale Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), ha età inferiore a 450.000 anni. Questa successione alluvionale poggia generalmente su depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore e medio.

Lo spessore dei sedimenti alluvionali varia in funzione della geometria delle Pieghe Ferraresi: queste infatti sono costituite da due dorsali principali, una più interna (Dorsale di Mirandola) con culminazione tra Novi di Modena, Mirandola e Poggio Renatico, e una più esterna (Dorsale di Ferrara) con culminazione tra Bondeno, Occhiobello e Ferrara (Fig. 4). Nelle aree di sinclinale lo spessore

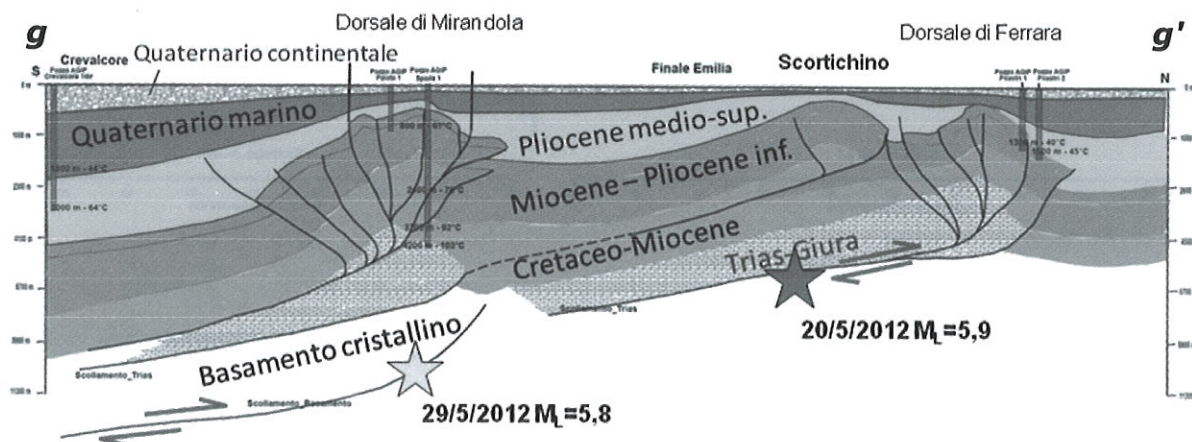


Fig. 4 – Sezione geologica ( $g-g'$ , cfr. Fig. 1) da Crevalcore (BO) a Felonica (MN) con proiezione degli ipocentri delle scosse principali del 20 e del 29 Maggio 2012.

Fig. 4 – Geological setting along a cross-section ( $g-g'$  in Fig. 1) from Crevalcore (BO) to Felonica (MN), with projections of the 20 and 29 May event hypocenters.

delle alluvioni supera i 500 metri, mentre nelle aree di anticlinale tale spessore si riduce fino a 100 m ed il substrato marino risulta talora fortemente eroso, con estese lacune stratigrafiche: ad esempio, tra Novi di Modena e Medolla, sull'alto delle Pieghe Ferraresi interne, il tetto del substrato si colloca a profondità inferiori a 100 metri ed è costituito da argille e sabbie marine del Pliocene Inferiore, mentre tra Bondeno e Occhiobello, sull'alto delle Pieghe Ferraresi esterne, il tetto del substrato è costituito da marne di età oligo-miocenica.

La quota del piano campagna dell'area epicentrale varia da circa 25-30 m s.l.m. nella zona Ovest (Novi di Modena) a circa 10-15 m s.l.m. nella zona Est (Vigarano Mainarda). I pochi rilievi presenti, elevati fino a 8-10 m rispetto al piano campagna, sono costituiti da rilevati stradali e ferroviari e dagli argini dei corsi d'acqua. Questi ultimi hanno in parte origine naturale: si tratta infatti di dossi corrispondenti a sistemi canale-argini depositi dal Po e dai suoi affluenti appenninici (Secchia, Panaro e Reno). La stratigrafia di questi dossi è in genere costituita da fitte alternanze di livelli decimetrici di limi, limi sabbiosi, sabbie fini e sabbie limose.

Anche nell'area di Scortichino l'unico rilievo è costituito dal sistema arginale, orientato circa Est-Ovest, del Canale Diversivo, risultato dell'attività deposizionale del fiume Panaro (Fig. 1). La quota del piano campagna, alla base dell'argine settentrionale (sponda di Scortichino), diminuisce da Ovest verso Est, da 9-10 m nella zona dell'abitato a 8-9 m in corrispondenza dell'ansa tra le località Malcantone e Guattarella; la sommità dell'argine ha quote di 16-17 m s.l.m. a Ovest del ponte di Scortichino e di circa 15-16 m s.l.m. nei pressi del ponte della Guattarella.

La successione alluvionale è qui spessa circa 120 m e poggia su depositi marini del Plio-Pleistocene: lo

spessore ridotto è dovuto al fatto che Scortichino si colloca su un alto secondario del fianco meridionale della dorsale più esterna delle Pieghe Ferraresi. Tale successione è costituita da prevalenti sabbie, con intercalazioni di orizzonti limoso-argillosi, per gran parte dello spessore, circa 100 m, riferibili al Sintema Alluvionale Emiliano-Romagnolo Superiore, al cui interno sono riconoscibili quattro cicli sedimentari, separati da importanti discontinuità stratigrafiche. I depositi del Sintema Alluvionale Emiliano-Romagnolo Inferiore, che costituiscono la parte inferiore della successione alluvionale, sono in gran parte erosi per la presenza dell'alto strutturale.

## 5. Il programma delle indagini

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, lo studio proposto ha riguardato l'argine del Canale Diversivo nel tratto in cui questo scorre attraverso l'abitato di Scortichino. Sulla base delle evidenze emerse nel corso dei sopralluoghi, peraltro già commentate nella sezione 2, si è deciso di focalizzare l'attenzione sulle quattro aree A, B, C e D (cfr. Fig. 1) maggiormente colpite dai dissesti e pertanto ritenute più critiche e significative. Al loro interno sono stati individuati allineamenti preferenziali (le sezioni  $a-d'$ ,  $b-b'$ ,  $c-c'$  e  $d-d'$ ) lungo cui effettuare le prove in sito previste dal programma sperimentale. Le indagini sono state intensificate in corrispondenza dell'area C, con una serie di prove integrative collocate al di fuori dell'allineamento principale  $c-c'$ , a causa del sistema di fratture particolarmente significativo e degli ampi danneggiamenti strutturali ivi osservati.

La figura 5 riporta le geometrie delle quattro sezioni di indagine, ottenute dal rilievo topografico effettuato dopo il sisma e basato sulla tecnica di ri-

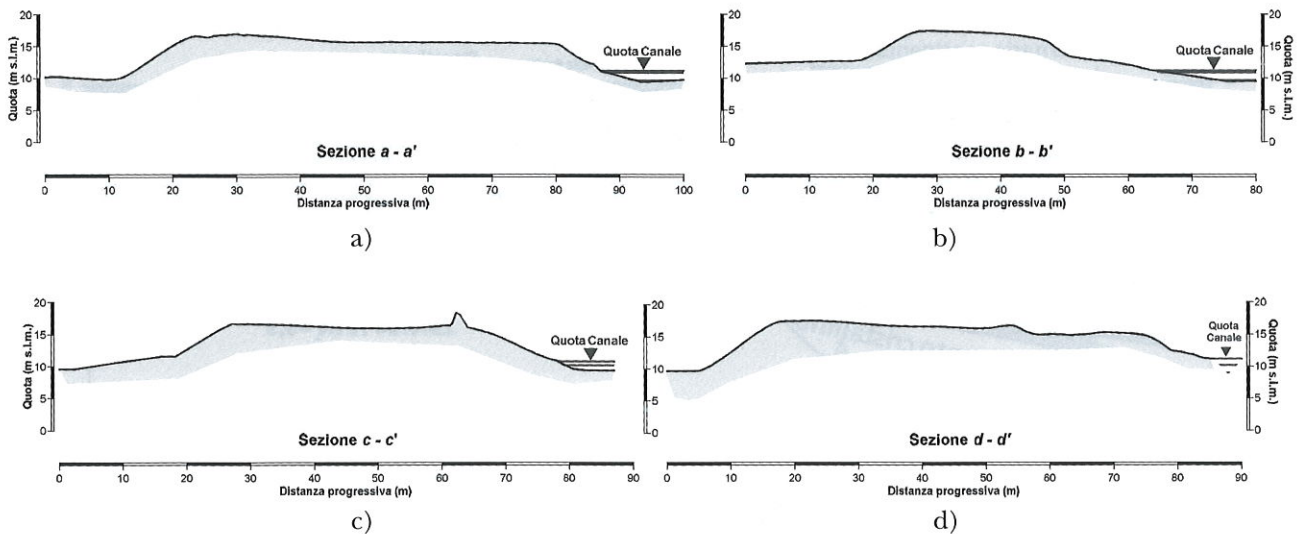


Fig. 5 – Profili morfologici delle quattro sezioni di analisi: a)  $a - a'$ ; b)  $b - b'$ ; c)  $c - c'$ ; d)  $d - d'$ .

Fig. 5 – Morphological profiles of the investigated riverbank cross-sections: a)  $a - a'$ ; b)  $b - b'$ ; c)  $c - c'$ ; d)  $d - d'$ .

levamento satellitare Global Navigation Satellite Systems (GNSS), secondo procedure in grado di fornire precisioni dell'ordine di alcuni centimetri. L'altezza dell'argine varia da un minimo di circa 5 metri, in corrispondenza della sezione  $b - b'$ , ad un massimo di circa 8 metri nella sezione  $d - d'$ , dove è massima anche l'ampiezza della cresta del rilevato (approssimativamente 55 metri); i profili riportati in figura evidenziano inoltre che il paramento sul lato campagna è generalmente più acclive di quello sul lato del canale e risulta caratterizzato da una pendenza prossima al 60%. Infine, la morfologia della sezione  $c - c'$  rivela la presenza di un recente cumulo di terra alto più di 2 metri, collocato all'estremità della cresta arginale, sul lato del canale.

Il programma di prove in sito, finalizzato alla definizione del profilo stratigrafico e alla caratterizzazione geotecnica dei sedimenti presenti, è complessivamente consistito in 5 sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di 29 campioni indisturbati, 12 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) e 4 prove con dilatometro sismico (SDMT). Come indicato in figura 6, per ogni sezione analizzata sono state previste almeno tre verticali di indagine dalla sommità dell'argine e una collocata al piede del rilevato. Le prove CPTU e SDMT eseguite dal coronamento sono state generalmente spinte fino a 30-35 m di profondità, mentre quelle realizzate lato campagna sono state arrestate a circa 25 m.

I sondaggi, tutti realizzati dalla sommità del rilevato arginale, hanno raggiunto profondità variabili tra 20 e 30 metri: solo il sondaggio S3, collocato nell'area interessata dai dissesti più gravi, è stato spinto fino a 50 m, allo scopo di esaminare la situazione stratigrafica a maggior profondità. I fori S1 ed S3 sono stati successivamente strumentati con due inclinometri, profondi 20 metri, mentre in S2, S4 ed

S5 sono stati installati dei piezometri a tubo aperto tipo "Norton", il cui tratto finestrato risulta rispettivamente collocato tra le profondità di 12 e 20 metri, 16 e 20 metri, 12 e 20 metri.

A completamento di questo gruppo di indagini, sono state effettuate anche prove di permeabilità con metodo Lefranc.

L'articolato programma di prove di laboratorio, svolto presso le sedi universitarie di Firenze, Napoli Federico II, Reggio Calabria e Roma Sapienza, è stato messo a punto allo scopo di caratterizzare, sia in campo statico sia in campo dinamico, le diverse unità stratigrafiche che costituiscono il corpo arginale ed il relativo substrato. Nel complesso sono state eseguite 12 prove triassiali consolidate-non drenate (TX CIU), su terreni sia a grana fine sia a grana grossa, 4 prove di taglio diretto (TD), 4 prove di taglio torsionale ciclico (CTS) e 4 prove di colonna risonante (RC) su terreni a grana fine e, infine, 4 prove di taglio semplice ciclico (CSS) e 5 prove di taglio semplice ciclico con doppio provino (DSDSS) su terreni a grana grossa. In generale, le prove sono state eseguite su provini estrusi direttamente dai campioni; la ricostituzione dei provini, effettuata con il metodo della deposizione in acqua, si è resa necessaria per un solo campione di sabbia medio-fine prelevato dal sondaggio S1 e sottoposto a prove CSS.

### 5.1. Interpretazione delle prove in sito

L'esame delle stratigrafie ricavate dai diversi sondaggi ha permesso di riconoscere, in corrispondenza di tutte le sezioni studiate, uno strato superiore abbastanza eterogeneo, di spessore mediamente pari a 9-10 m, caratterizzato da un'alternanza di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi. Nei primi 6-7 m di