

## QUADRO DI SINTESI DELLE PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE SUI CAMPIONI DI TERRENO LIQUEFATTO A SEGUITO DEL TERREMOTO DEL 29 DICEMBRE 2020 A PETRINJA (CROAZIA)

Christian Valvano ([christian.valvano@studenti.unich.it](mailto:christian.valvano@studenti.unich.it))  
Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara, Italia

Sara Amoroso ([sara.amoroso@unich.it](mailto:sara.amoroso@unich.it))  
Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara, Italia  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, L'Aquila, Italia

Luca Minarelli ([luca.minarelli@ingv.it](mailto:luca.minarelli@ingv.it))  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Ferrara, Italia

Daniela Fontana ([daniela.fontana@unimore.it](mailto:daniela.fontana@unimore.it))  
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

**ABSTRACT.** In questo articolo viene presentata una sintesi di alcuni rilevanti risultati relativi al database sui fenomeni di liquefazione verificatisi in Croazia, nell'area di Petrinja, a seguito del terremoto verificatosi il 29 dicembre 2020. Da questo database sono state elaborate schede riassuntive per ogni campione di materiale liquefatto, in cui vengono descritte le caratteristiche geometriche del sito di riferimento e quelle granulometriche, mineralogiche e petrografiche del materiale. Dall'analisi dei dati granulometrici ottenuti in laboratorio, si è osservato che nel caso studio in Croazia sono stati coinvolti nella liquefazione sedimenti molto diversificati e peculiari, da ghiaie grossolane a limi non plastici, comunemente non eiettati per effetto di liquefazione. I risultati di questo database si pongono come base per studi futuri atti a garantire una più efficace ricostruzione del modello geologico-geotecnico di sottosuolo in aree potenzialmente liquefacibili.

### 1. INTRODUZIONE: IL TERREMOTO DI PETRINJA DEL 2020

Il 29 dicembre 2020 un sisma caratterizzato da una magnitudo momento  $M_w$  pari 6.4 ha colpito la Croazia nei pressi di Petrinja, con un epicentro posto a 3 km a SW dalla città e un ipocentro a 10 km di profondità (Pollak et al., 2021). La faglia che ha generato questa sequenza sismica è la faglia di Petrinja Pokupsko, una faglia transpressiva destra che ha già generato un forte terremoto con evidenze di liquefazione nel 1909 (Figura 1a). La liquefazione indotta dal terremoto del 2020 ha riguardato soprattutto i depositi di paleocanale di 3 fiumi: Kupa, Sava e Glina, lungo i cui argini sono stati osservati vulcanelli di sabbia, crateri, fratture superficiali e fenomeni di lateral spreading (Baize et al., 2022; Amoroso et al., 2021). La distanza tra l'epicentro del terremoto del 29 dicembre e i punti in cui si è manifestata la liquefazione oscilla tra un minimo di 1.69 km nell'area della città di Glina e un massimo di 15.50 km nell'area della città di Petrinja (Figura 1b).

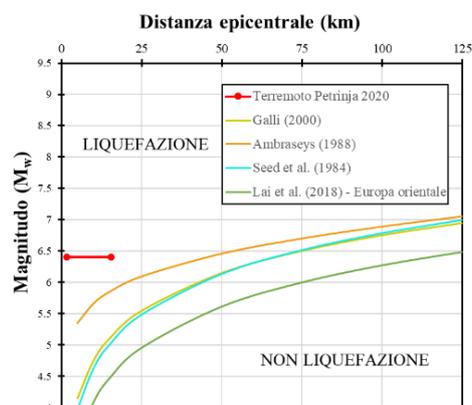
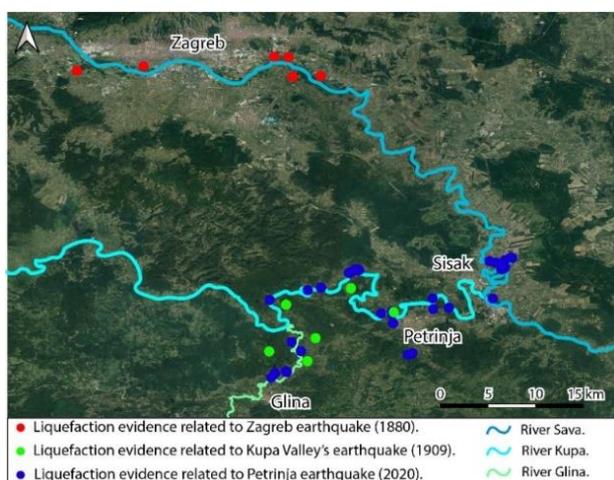


Figura 1 Distribuzione geografica delle liquefazioni storiche (1880 e 1909) e indotte dal sisma del 2020 (a); Grafico magnitudo momento – distanza epicentrale (Galli, 2000; Ambraseys, 1988; Seed et al., 1984; Lai et al., 2018) in relazione alla liquefazione indotta dal terremoto di Petrinja del 2020 (b).

## 2. IL DATABASE ELABORATO

Da gennaio a marzo 2021 sono state condotte da parte di un gruppo di ricerca europeo (EUTEAM) 4 campagne di rilevamento post-sismico in Croazia (Baize et al., 2022: gennaio 2021, 3-4 febbraio 2021, 17-18 febbraio 2021 e 3-4 marzo 2021). Il Servizio Geologico Croato e il Gruppo di Emergenza dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (EMERGE-INGV) hanno effettuato il campionamento delle sabbie liquefatte (89 campioni) e per ognuno di essi hanno raccolto una serie di informazioni relative a: ambiente, condizioni di sito, distribuzione spaziale e forma dell'elemento liquefatto, tipo di manifestazione superficiale, materiale espulso, colore del materiale espulso e caratteristiche geometriche del deposito liquefatto.

A partire da queste informazioni è stata effettuata una stima della classe di danno indotta da liquefazione, facendo riferimento al criterio esposto in van Ballegooy et al. (2014). Sono stati individuati 18 siti con una classe di danno pari a 3 (assenza di lateral spreading ma presenza da minima a moderata di materiale liquefatto in superficie), 57 siti con una classe 4 (assenza di lateral spreading ma grande presenza di materiale liquefatto in superficie) e 8 siti con una classe 5 (lateral spreading da moderato ad evidente; materiale espulso spesso osservato). I depositi liquefatti derivano prevalentemente da paleocanali (53 sono associati al fiume Kupa, 11 al fiume Sava e 14 al Glina), mentre i rimanenti sono associabili a depositi di conoide alluvionale, terrazzo fluviale o struttura tettonica. Inoltre, il materiale liquefatto campionato durante i sopralluoghi post terremoto è stato analizzato presso diversi laboratori (Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti e Pescara, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Servizio Geologico Croato) al fine di ottenere informazioni granulometriche, petrografiche e mineralogiche. I dati raccolti ed elaborati sono stati utilizzati per costruire 57 schede sintetiche, una per ogni sito di campionamento (in alcuni siti è stato effettuato più di un campionamento). Nella presente nota verranno presentati in forma sintetica solo alcuni risultati rilevanti derivati dalle analisi granulometriche.

## 3. I RISULTATI DELLE ANALISI GRANULOMETRICHE

Nel database messo a punto con questo studio sono state elaborate 77 curve granulometriche relative al materiale fuoriuscito per liquefazione. I grafici evidenziano un ampio spettro granulometrico che include ghiaie anche grossolane, sabbie da grosse a fini, fino ai limi. Nella Figura 2a le curve granulometriche sono state suddivise all'interno di fusi che permettono di correlare la diversa granulometria del materiale eiettato con il materiale di origine rappresentato dai depositi di paleocanale dei fiumi Kupa, Sava e Glina. L'abbinamento è stato effettuato sulla base della vicinanza dei siti di campionamento ai corsi d'acqua attuali. Nel grafico di Figura 2a sono anche riportate in nero 4 curve granulometriche relative ai campioni non riconducibili ai depositi di paleocanale.

Si osserva che i depositi liquefatti associati al paleocanale del fiume Sava (in rosso in Figura 2a) sono più fini di quelli associati al paleocanale del fiume Glina (in verde in Figura 2a). Il contenuto di fine (FC) dei depositi del Sava, infatti, varia tra 5.07% e 41.79%, mentre i valori di FC del Glina sono compresi tra 5.40% e 19.91%. I depositi liquefatti del fiume Kupa ricadono entro un fuso molto più ampio e trasversale, che include alcuni dei campioni più fini (valori massimi di FC pari a 44.55% e 67.42%) e alcuni di quelli più grossolani (valori minimi di FC pari a 3.14% e 3.17%). Il valore di FC nel 75.3% dei casi (58 campioni) ricade in un intervallo compreso fra il 5% e il 15%, nel 10.4% dei casi (8 campioni) è compreso fra il 15% e il 35%, nel 7.8% dei casi (6 campioni) è minore del 5% e nel 6.5% dei casi (5 campioni) è maggiore del 35%. Emerge che i materiali più suscettibili alla liquefazione sono stati quelli con un contenuto di fine compreso tra il 5% e il 15%.

Per quanto riguarda le curve granulometriche dei 4 campioni associati ad altri tipi di depositi, si osserva che i 2 campioni associati a depositi di conoide alluvionale (o di terrazzo fluviale) sono i più fini tra tutti quelli considerati: il loro contenuto di fine è compreso fra il 63% e il 69% ed i depositi sono classificabili entrambi come sabbie con limo secondo la classificazione AGI e come silty sand (SM) e sandy silt (ML) secondo la classificazione USCS; essi fanno riferimento al sito 8 situato a nord della città di Glina. A sud della città di Petrinja 2 campioni associati ad una struttura tettonica rappresentano i campioni più grossolani con un contenuto di ghiaia compreso tra il 27.3% e il 32.2% e per questo classificabili come sabbia con ghiaia limosa e sabbia con ghiaia debolmente limosa.

Analizzando l'intero dataset, si osservano in totale 12 campioni il cui contenuto di ghiaia è superiore al 10%. Le corrispondenti curve granulometriche sono riportate nella Figura 2b, dove vengono confrontate con un fuso granulometrico (in rosso) relativo ai casi storici di liquefazione in ghiaia, elaborato da Rollins et al., (2021) e successivamente ripreso da Salvatore et al., (2022). Da questo confronto emerge che i 12 campioni

inclusi nel database croato sono in accordo con quanto attualmente disponibile in letteratura per lo studio della suscettibilità a liquefazione delle ghiaie.

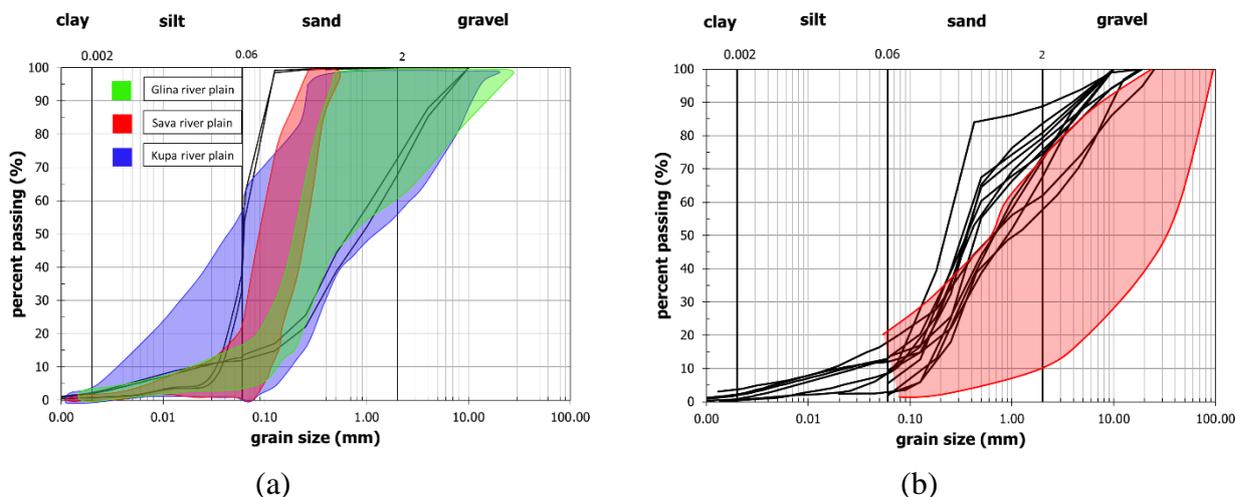


Figura 2 Fusi granulometrici dei campioni eiettati associati ai 3 diversi paleocanali (a); confronto delle curve granulometriche relative alle liquefazioni in ghiaia del terremoto di Petrinja con il fuso della suscettibilità alla liquefazione dei materiali ghiaiosi sviluppato in Rollins et al., (2021) e Salvatore et al., (2022).

#### 4. CONCLUSIONI

Nella zona oggetto di questo studio i sedimenti che sono stati maggiormente coinvolti nel fenomeno di liquefazione nel 2020 sono i depositi di paleocanale sepolti dei fiumi che attraversano la piana alluvionale. Fra questi, i più suscettibili a fenomeni di liquefazione sono stati quelli riconducibili al fiume Kupa, i quali avevano già dato storicamente fenomeni di liquefazione nel 1909 e a cui è stato associato il 67.95% dei campioni. Seguono i depositi di paleocanale del fiume Glina, ai quali è stato associato il 17.95% dei campioni e infine i depositi di paleocanale del fiume Sava, ai quali è stato associato il 14.10% dei campioni. Questi ultimi avevano già dato luogo a fenomeni di liquefazione a seguito del terremoto del 1880 di Zagabria. I 12 campioni con un contenuto di ghiaia superiore al 10% sono stati associati quasi totalmente ai depositi di paleocanale del fiume Kupa; solamente un campione è stato associato al fiume Glina e 2 sono stati associati ad una struttura tettonica. Di questi 12 campioni, 6 presentano un contenuto di ghiaia compreso fra il 10% e il 25% e gli altri 6 la contengono con una percentuale compresa fra il 25% e il 50%.

I dati granulometrici, mineralogici e petrografici (questi ultimi dati sono ancora molto parziali, in via di elaborazione) presenti nel database possono rappresentare un significativo contributo sia per implementare un database europeo (sul quale basare nuove correlazioni in grado di stimare il valore di diversi parametri legati al fenomeno della liquefazione) sia per condurre nella stessa area studi più approfonditi di natura geologica e geotecnica per identificare la profondità del livello sorgente andato in liquefazione e per assegnare con più precisione i diversi campioni di materiale liquefatto ai diversi paleocanali sepolti.

#### 5. RINGRAZIAMENTI

Si rivolgono dei ringraziamenti, per la costruzione del database presentato, al Laboratorio di Geologia Applicata dell'Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara ed in particolare al Professore Nicola Sciarra e al tecnico Sandro Gabriele Toro, al Servizio Geologico Croato e al gruppo di emergenza EMERGEO dell'INGV.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

Ambraseys N.N. (1988). Engineering seismology. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 17 (1): 1-105.

Amoroso S., Barbača J., Belić N., Kordić B., Brčić V., Budić M., Civico R., De Martini P.M., Hećej N., Kurečić T., Minarelli L., Novosel T., Palenik D., Pantosti D., Pucci S., Filjak R., Ricci T., Špelić M., Vukovski M. (2021). Liquefaction field reconnaissance following the 29th December 2020 Mw 6.4 Petrinja earthquake (Croatia). *Proc. EGU General Assembly 2021, online*; 19–30 Apr 2021, Abstract No. EGU21-16584. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16584>

Baize S., Amoroso S., Belić N., Benedetti L., Boncio P., Budić M., Cinti F.R., Henriquet M., Jamšek Rupnik P., Kordić B., Markušić S., Minarelli L., Pantosti D., Pucci S., Špelić M., Testa A., Valkaniotis S., Vukovski M., Atanackov J., Barbača J., Bavec M., Brajkovič R., Brčić V., Caciagli M., Celarc B., Civico R., De Martini P.M., Filjak R., Iezzi F., Moulin A., Kurečić T., Métois M., Nappi R., Novak A., Novak M., Pace B., Palenik D., Ricci T. (2022). Environmental effects and seismogenic source characterization of the December 2020 earthquake sequence near Petrinja, Croatia. *Geophysical Journal International*, 230 (2): 1394–1418. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac123>

Galli P. (2000). New Empirical Relationships between magnitude and distance for liquefaction, *Tectonophysics*. 324: 169-187.

Lai C.G., Bozzoni F., De Marco M.C., Zuccolo E., Bandera S., Mazzocchi G. (2018). LIQUEFACT Deliverable 2.4, GIS database of the historical liquefaction occurrences in Europe and European empirical correlations to predict the liquefaction occurrence starting from the main seismological information, V. 1.0.

Pollak D., Gulam V., Novosel T., Avanić R., Tomljenović B., Hećej N., Terzić J., Stipčević J., Bačić M., Kurečić, T. (2021). The preliminary inventory of coseismic ground failures related to December 2020 – January 2021 Petrinja earthquake series. *Geologia Croatica: Journal of the Croatian Geological Survey and the Croatian Geological Society* 74(2): 189-208. <https://doi.org/10.4154/gc.2021.08>

Rollins K.M., Roy J., Athanasopoulos-Zekkos A., Zekkos D., Amoroso S., Cao Z. (2021). A new dynamic cone penetration test-based procedure for liquefaction triggering assessment of gravelly soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148 (6): 04021141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002686](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002686)

Salvatore N., Pizzi A., Rollins K.M., Pagliaroli A., Amoroso S. (2022). Liquefaction assessment of gravelly soils: the role of in situ and laboratory geotechnical tests through the case study of the Sulmona basin (Central Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 141 (2): 216-229. <https://doi.org/10.3301/IJG.2022.18>

Seed R.B., Harder L.F. (1984). SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength. in *Proceedings, Seed Memorial Symposium, 1990*, J. M. Duncan, ed., BiTech Publishers, Vancouver, British Columbia, pp. 351–76.

van Ballegooy S., Malan P., Lacrosse V., Jacka M.E., Cubrinovski M., Bray J.D., O'Rourke T.D., Crawford S.A., Cowane H. (2014). Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch. *Earthquake Spectra*, 30 (1): 31-55.