

Il Quaternario superiore nel sottosuolo di Ferrara: penetrofacies ed architettura deposizionale

M. STEFANI¹, L. MINARELLI² e A. PAVANATI³

¹ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

² INGV Roma1, Sede L'Aquila

³ Studio Geologico Pavanati, Porto Tolle

1. Finalità e metodi della ricerca

Nelle città e aree urbanizzate occorre prevenire o mitigare i rischi indotti da fenomeni pericolosi quali alluvioni, frane e terremoti. In questo contesto, gli strumenti urbanistici esistenti non si sono sempre dimostrati efficaci nel garantire la sicurezza degli insediamenti. Per contenere i rischi indotti dalle accelerazioni sismiche è fondamentale valutare la risposta sismica locale, associata a fenomeni quali l'amplificazione e la liquefazione di sedimenti granulari saturi d'acqua. Per fare ciò, è necessario ricostruire nel miglior modo possibile la stratigrafia del sottosuolo superficiale. La ricerca qui illustrata è stata perciò finalizzata alla ricostruzione della stratigrafia delle prime decine di metri di sottosuolo. La ricerca fornisce un supporto geologico utile alla microzonazione sismica, in un'area caratterizzata da un'importante sismicità storica (Guidoboni, 1987; Caputo *et al.*, 2016), da significativi fattori di amplificazione sismica e da un elevato potenziale di liquefazione, nelle vaste aree in cui sabbie sature sono presenti nei primi 20 m di sottosuolo. Questa ricerca fornisce anche un supporto all'interpretazione delle indagini geofisiche, discusse in questo volume, come le indagini sismiche ad alta frequenza effettuate nell'area del Campo Scuola (Affatato *et al.*, 2019).

La ricostruzione dei caratteri geologici dei primi 100 m di sottosuolo si è basata sulla raccolta, valutazione, correlazione stratigrafica e interpretazione geologica di oltre 4000 indagini, effettuate precedentemente, per prevalenti finalità idriche o geotecniche. Questa banca dati è stata calibrata da nuove penetrometrie a sismocono e prove a dilatometro sismico, progettate in base all'analisi critica dei dati pregressi. La documentazione delle precedenti prove si trovava prevalentemente dispersa presso svariati uffici pubblici e privati, o in parte raccolta, con criteri disomogenei, presso l'Amministrazione Comunale di Ferrara e il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Le prove raccolte presentano una buona densità nelle aree di recente espansione edilizia o in siti ove sono state progettate infrastrutture, ma sono carenti in aree a vocazione agricola. Nel centro storico, sono state recentemente realizzate numerose nuove prove, a seguito dei danni sismici del 2012. Fino a 30-40 m, le indagini sono abbondanti, a profondità maggiori, i dati si rarefanno e peggiorano di qualità. Particolare attenzione è stata posta alla localizzazione spaziale delle prove, ma nonostante gli sforzi, non è stato sempre possibile giungere a un posizionamento preciso. Le prove di sottosuolo sono state, ove possibile, acquisite in formato numerico informatizzato. Ove fosse disponibile il solo dato numerico cartaceo, esso è stato scansionato e digitalizzato; è stata digitalizzata anche una parte delle prove di cui era disponibile il solo grafico cartaceo. I dati raccolti sono stati resi fra loro omogenei, georiferiti e inseriti in una banca dati, realizzata con criteri congruenti a quelli utilizzati dall'Amministrazione Comunale di Ferrara e dal Servizio Geologico, Sismico

e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Le migliaia di prove raccolte comprendono sondaggi stratigrafici, stratigrafie di pozzi ed un notevole numero di prove penetrometriche. Le penetrometrie forniscono un metodo d'indagine particolarmente efficace nei sedimenti tardo-quadernari sciolti che formano il sottosuolo di questa porzione della bassa Pianura Padana (Amorosi e Marchi, 1999). Particolarmente utili sono state le circa 400 prove penetrometriche a piezocono digitale (CPTU) e a piezocono sismico (SCPTU). Dopo l'informatizzazione ed organizzazione della banca dati, si è proceduto ad interpretare le prove penetrometriche in termini di litologia e organizzazione stratigrafica verticale. I caratteri litologici e la suscettibilità alla liquefazione cosismica delle prove sono stati valutati tramite il programma CLiq v.3.0 della Geologismiki. L'analisi della variazione verticale dei parametri penetrometrici, svolta nel contesto stratigrafico, permette di riconoscere i vari corpi deposizionali e di interpretare i loro ambienti di sedimentazione. Il significato stratigrafico di questi corpi può essere però compreso solo attraverso la correlazione laterale delle prove e dal confronto con i sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo.

2. Esempi di interpretazione stratigrafica di prove penetrometriche

La Fig. 1 illustra, come esempio metodologico, l'andamento dei valori penetrometrici di due prove fra loro vicine, effettuate alla periferia occidentale della città. I grafici di destra mostrano, dalla superficie fino a 20 m, la presenza di sabbie di riempimento di diverse generazioni di canali a meandro del Po, che sono qui a diretto contatto con le sottostanti sabbie di media pianura alluvionale, deposte durante fasi dell'ultima glaciazione, caratterizzate da elevate resistenze alla punta, con picchi asimmetrici. La prova rappresentata sulla sinistra, effettuata a poche decine di

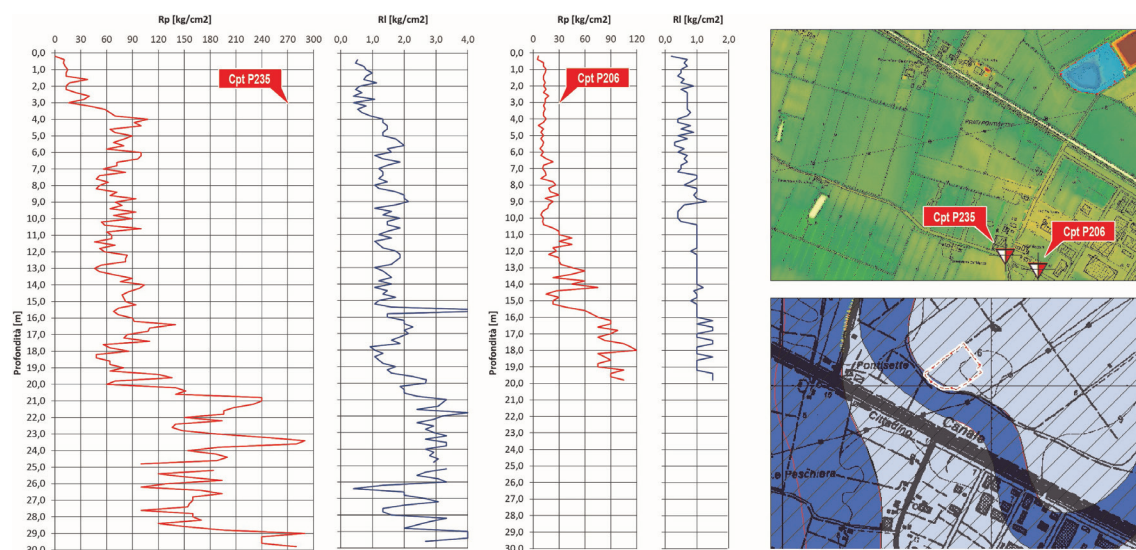


Fig. 1 - Valori di resistenza alla punta (RP) e di attrito laterale (RI) di due prove penetrometriche realizzate alla periferia occidentale di Ferrara, nei pressi di Pontesette. La prova di sinistra mostra sabbie oloceniche di alveo di Po, saldate alle sottostanti sabbie grossolane singlaciali; la prova di destra documenta sedimenti fini olocenici di piana interalvea. Nello stralcio della carta geologica, le sabbie di alveo sono rappresentate in blu, i fanghi fini in colore più chiaro.

metri di distanza, mostra una stratigrafia assai diversa, con la parte superiore dominata da fanghi argillosi, depositi in condizioni di piana interalvea, durante l’Olocene.

Le misure a piezocono digitale (SCPTU), accompagnate dalla registrazione delle velocità V_s , permettono una lettura più raffinata, sia dei caratteri sedimentologici che sismici. La Fig. 2 mostra una prova penetrometrica effettuata a nord della città, nei pressi di Pontelagoscuro. Il grafico evidenzia la facies penetrometrica di sabbie grossolane, deposte in canali a treccia (*braided rivers*), in condizioni di media pianura alluvionale singlaciale. Le velocità V_s sono abbastanza elevate, normalmente comprese fra 250 e 280 m/s. Valori analoghi si misurano nelle sabbie singlaciali di tutto il sottosuolo dell’area di Ferrara. I valori di resistenza alla punta sono elevati, considerando il contesto stratigrafico, fluttuando normalmente fra 15 e quasi 25 MPa, mentre i valori di pressione U sono assai prossimi ai valori idrostatici, data l’elevata permeabilità di queste sabbie.

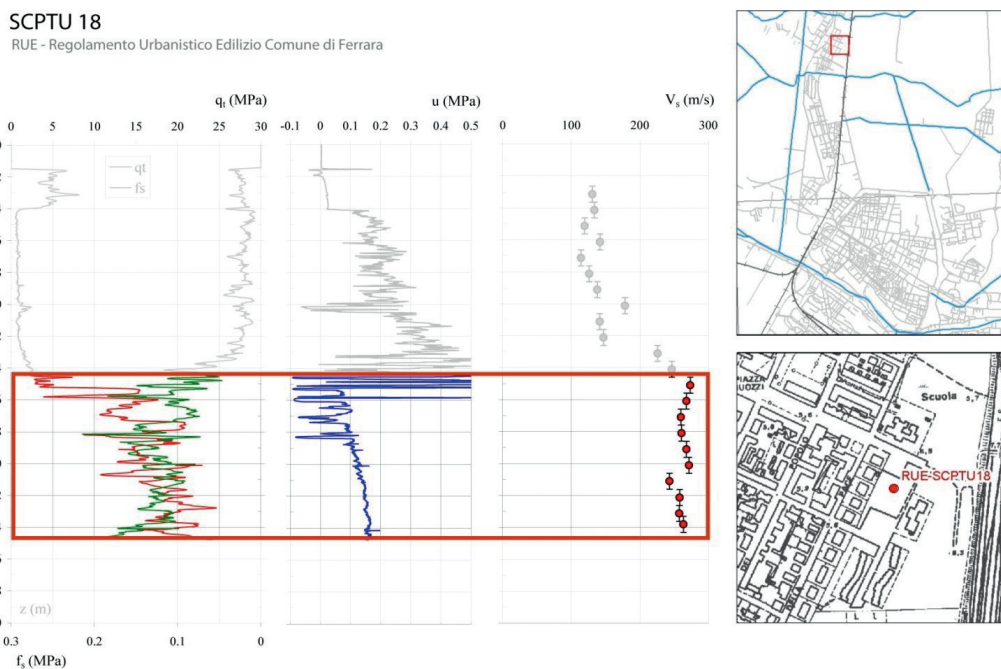


Fig. 2 - Grafici della resistenza alla punta (q_t), attrito laterale (f_s), pressione neutra (u) e velocità delle onde sismiche seconde (V_s) misurate dalla prova a piezocono sismico realizzata presso la scuola materna di Pontelagoscuro. Il riquadro evidenzia il corpo di sabbie grossolane singlaciali parte del Subsistema AES7, caratterizzato da velocità sismiche relativamente elevate.

La Fig. 3 illustra la facies penetrometrica di sabbie e limi del canale principale del Po. La prova è stata eseguita in corrispondenza dell’alveo medievale e rinascimentale. I valori di V_s fluttuano fra 180 a 220 m/s. Queste sabbie oloceniche presentano quindi valori inferiori a quelli delle sabbie pleistoceniche, ma superiori a quelli dei coevi fanghi di piana inondabile. La resistenza alla punta decresce globalmente verso l’alto, a partire dai valori elevati in corrispondenza al lag grossolano di fondo canale, a circa 15 m. I valori di resistenza alla punta decrescono infatti da 20 a 3 MPa, passando da sabbie grossolane di Po a limi argillosi con apporti di Reno. Questo andamento

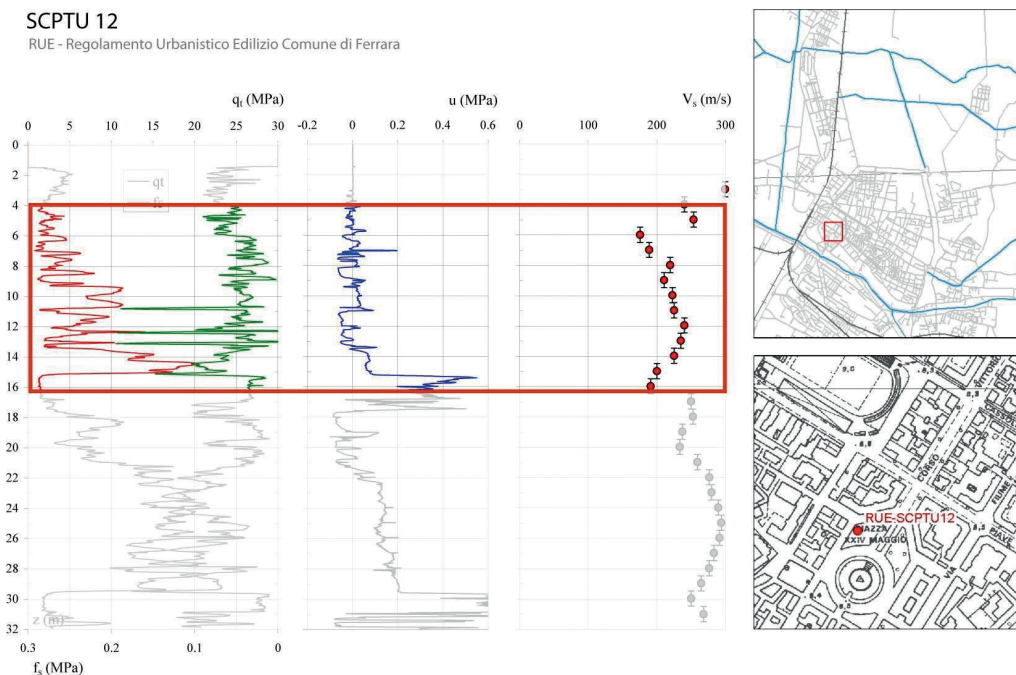


Fig. 3 - Valori di resistenza alla punta (q_t), attrito laterale (f_s), pressione neutra (u) e velocità delle onde sismiche secondarie (V_s) registrati da una prova a piezocono sismico nei pressi della Piazza XXIV Maggio. Sotto i 22 m si osservano sabbie singlaciali. L'andamento della resistenza alla punta della porzione soprastante riflette la sequenza positiva delle sabbie e sabbie limose di riempimento del canale principale del Po di età antica e medioevale, la parte sommitale della successione registra sedimenti più fini di Reno e la fase di abbandono, alla fine XVI secolo, seguita dall'accumulo di materiali di riporto.

corrisponde all'evoluzione *fining upward* del corpo sedimentario, che registra la migrazione della sponda e la progressiva riduzione del flusso del canale, abbandonato dal Po verso la fine del XVI secolo, tanto che sul suo corpo di alveo vi fu costruita la fortezza pontificia, poi demolita, registrata dai 4 m sommitali di materiali di riporto.

3. Profili geologico-stratigrafici di sottosuolo

Una volta analizzate le prove puntuali, si è costruita una griglia di profili geologico-stratigrafici, derivanti dall'interpolazione di dati puntuali, quali sondaggi stratigrafici e prove penetrometriche (CPT, CPTU, SCPTU). In questo contributo, sono illustrati due profili che descrivono i primi 35 m di sottosuolo, a ovest e a sud del centro storico. La posizione geografica dei profili è illustrata dalle tracce planimetriche di Fig. 4. Il profilo A-A' si sviluppa, con lunghezza di circa 4200 m, subito a sud del centro storico, mentre quello B-B' si allunga, per 5300 m, a ovest e nord-ovest di esso. In entrambi i profili si osserva una chiara bipartizione stratigrafica. L'unità inferiore è decisamente più sabbiosa e si è in gran parte sedimentata in condizioni singlaciali di stazionamento basso del livello eustatico. Questa porzione è attribuibile al Subsistema di Villa Verrucchio (AES7), seguendo la terminologia adottata dal progetto cartografico CARG al 1/50.000. Il tetto è marcato da un paleosuolo di estensione regionale (Amorosi *et al.*, 2016), che corrisponde alla deglaciazione delle Alpi e marca la base del seguente Subsistema di Ravenna



Fig. 4 - Traccia topografica dei due profili stratigrafici di sottosuolo illustrati nelle figure successive. Il profilo A-A' lambisce le mura urbane meridionali, mentre quello B-B' si allunga lungo il Canale Boicelli.

AES8. Quest'ultima unità stratigrafica è superiormente limitata dalla superficie topografica ed è dominata da fanghi argillosi di piana interalvea, che passano lateralmente a corpi di limi e sabbie d'argine naturale e alveo.

La Fig. 5 mostra un estratto del profilo B-B', in cui sono rappresentati i sondaggi stratigrafici e i valori di resistenza alla punta delle prove penetrometriche. Nella parte meridionale della figura, nella parte superiore (AES8), si osservano sabbie di riempimento di più generazioni di canali di Po, analoghe a quelle illustrate in Fig. 3, affiancati da corpi fini di argine naturale e piana inondabile. La parte inferiore è formata da sabbie singlaciali di AES7, analoghe a quelle la cui espressione penetrometrica è visibile nella suddetta figura.

Nel profilo meridionale A-A', la porzione inferiore singlaciala, corrispondente alla parte alta di AES7, mostra un'architettura deposizionale complessa. Si sono riconosciuti due corpi di sabbie di canale, uno nella parte occidentale del profilo, l'altro, meno sviluppato e di granulometria più fine, a cavallo di Via Bologna. Questi corpi di sabbie fluviali medio-grossolane hanno spessori di 10-15 m e sono caratterizzati da un rapido contatto laterale con sedimentati fangoso-limosi, contenenti intercalazioni sabbiose tabulari, con spessori di 2-4 m. La rapidità dei passaggi laterali tende a fare escludere rapporti di eteropia. L'ipotesi più probabile è che i corpi di canale riempiano qui, almeno in parte, incisioni vallive di una pianura terrazzata. Nel complesso, i corpi singlaciali si

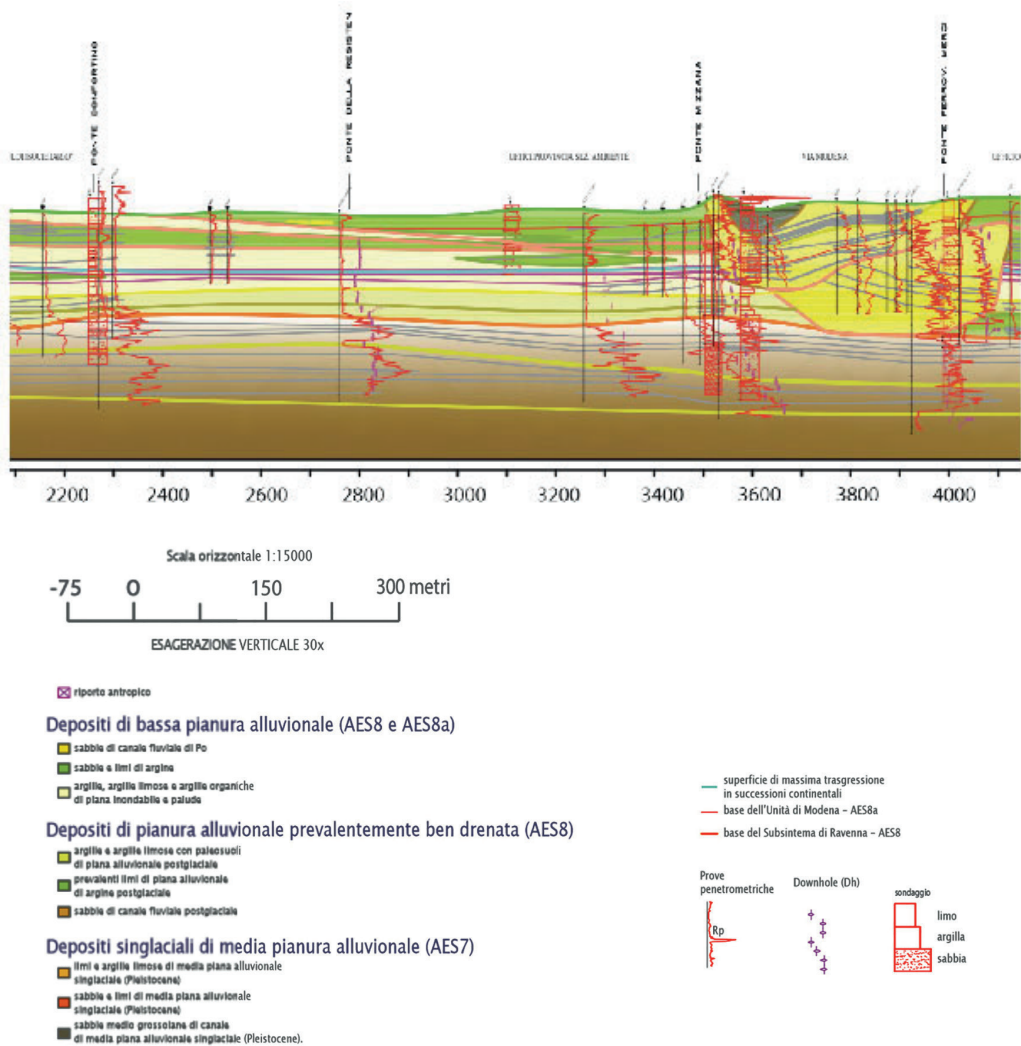


Fig. 5 - Estratto della porzione centro-meridionale del profilo B-B', con schematizzate le stratigrafie di sondaggi stratigrafici e i valori di resistenza alla punta di prove penetrometriche. La linea arancione indica il tetto del corpo di sabbie singlaciali del Substema di Villa Verrucchio (AES 7), a cui si sovrappongono i corpi fangosi del Substema di Ravenna (AES8), che passano lateralmente alle sabbie del canale di Po, a sud di Via Modena, rappresentate in giallo. Si ringrazia Giulia Busatti e Marco Guidi, che hanno collaborato, nell'ambito del loro tesi di laurea, al disegno dei profili.

approfondiscono verso est, con una pendenza dovuta, in gran parte, ad una deformazione post-deposizionale, indotta da tassi di subsidenza arealmente variabili. Il Substema di Villa Verrucchio AES7 è limitato superiormente da una superficie di discordanza, a cui si sovrappongono depositi di piana alluvionale, ascrivibili al Substema di Ravenna (AES8). La parte inferiore di AES8 mostra un importante corpo sabbioso di Po, fra la Darsena e il Bastione di San Pietro. Queste sabbie passano lateralmente ad ampi volumi di limi, limi sabbiosi e argille di argine e piana alluvionale drenata, soggetti a pedogenesi. La parte superiore del profilo è dominata da successioni argilloso-limoso-sabbiose di argine naturale e piana inondabile; a oriente di Via Bologna, sono presenti sabbie del canale di Po, corrispondenti all'*Eridanus* romano e al Po di Ferrara medievale. Le fasi più recenti, cinquecentesche, di abbandono dell'alveo sono testimoniate da sedimenti di Reno, immesso

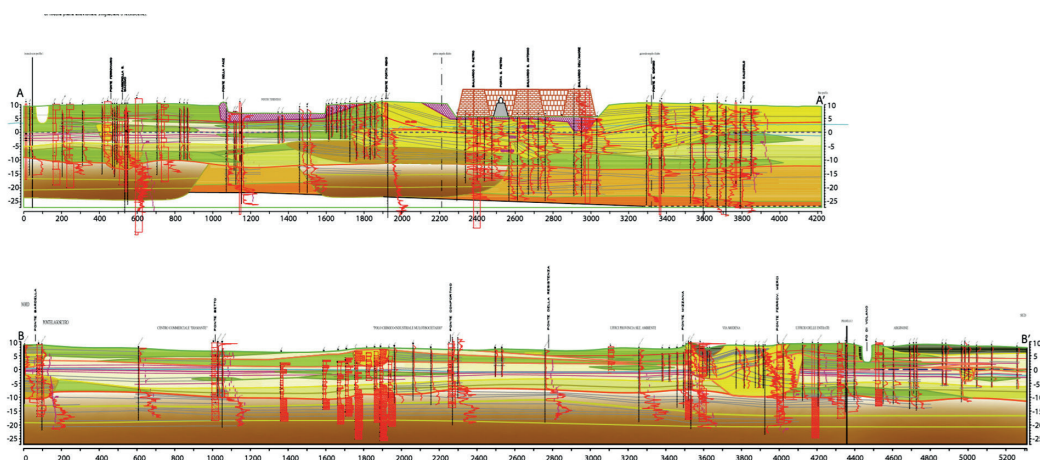


Fig. 6 - Profili stratigrafici A-A', a sud del centro storico, e B-B', ad ovest di esso. Per la localizzazione, vedi Fig. 4. Al di sotto della linea mediana arancione sono visibili i depositi singlaciali di AES7, interamente sabbiosi a ovest, alternativamente sabbiosi e fini in quella meridionale. La parte superiore del profilo appartiene ad AES8 ed è dominato da fanghi interalvei e corpi di argine naturale, intervallati da sabbie di canale fluviale. Il corpo dell'alveo principale del Po di età antica e medievale è visibile in entrambi i profili. Simbologia come in Fig. 5.

artificialmente nel Po. Le vicende di età moderna sono registrate da ampi volumi di terreni di riporto, che possono superare i 5 m di spessore, come in corrispondenza del bastione di Sant'Antonio.

Il profilo occidentale B-B' è caratterizzato da una parte inferiore formata dal Subsistema di Villa Verrucchio (AES7), la cui parte superiore è qui interamente formata da sabbie medio-grossolane, deposte durante fasi singlaciali. Questa parte è formata dall'amalgamazione di sabbie sedimentate in canali *braided*, con profondità di 3-4 m ciascuno. Vicino l'estremità meridionale del profilo, compaiono intercalazioni limose, che passano verso sud a corpi prevalentemente limosi, di provenienza appenninica, anche se le relazioni geometriche di questo contatto laterale non sono visibili nel profilo illustrato. Nel complesso, i corpi singlaciali si approfondiscono da nord a sud, registrando anche qui una certa deformazione post-deposizionale. Il tetto delle sabbie singlaciali (AES7) è netto e marcato anche qui da un paleosuolo, a cui si sovrappone il Subsistema di Ravenna (AES8), che qui è dominato da sedimenti fini, argille e argille limose, di piana interalvea. Nella parte meridionale del profilo, a sud di Via Modena, s'intercala l'importante corpo di sabbie di palealveo del Po, di età antica e medievale. Questo corpo è qui in contatto geometrico e continuità idraulica con le sabbie di AES7. La stratificazione interna al corpo riflette la variazione di geometria dall'alveo, che presentava prima una concavità verso nord, poi verso sud. Altri corpi sepolti di canale sono stati scoperti nella parte settentrionale del profilo. All'estremità meridionale del profilo sono stati riconosciuti sedimenti apportati dal Fiume Reno, durante il XVII secolo, come documentato da fonti storiche.

4. Conclusioni

La ricerca ha dimostrato come sia possibile ricostruire l'architettura deposizionale delle unità del Pliocene superiore e dell'Olocene, sepolte nei primi 40-50 m di sottosuolo, attraverso la raccolta e integrazione delle migliaia di indagini puntuali pregresse, calibrate attraverso l'acquisizione di nuove prove sismiche a dilatometro e a piezocono. La realizzazione di una rete

di profili stratigrafici derivati dalla correlazione bidimensionale di prove puntuali è la premessa per la realizzazione di un modello digitale tridimensionale del sottosuolo urbano.

La parte inferiore delle successioni indagate (AES7) è formata da sedimenti di media pianura alluvionale fredda, deposti durante la parte recente del Pleistocene, corrispondente alla Glaciazione Wuermiana delle Alpi. Questa fase si sviluppò durante un periodo di stazionamento basso del livello eustatico. Nella parte nord-occidentale e settentrionale del territorio comunale di Ferrara, questa unità è interamente formata da sabbie medio-grossolane, talvolta ghiaiose o ciottolose, deposte in ampi sistemi di fiumi a treccia, del Po e di probabili fiumi veneti. Questi corpi presentano elevate permeabilità e trasmissività idrauliche. Nella parte meridionale del territorio comunale, l'unità è invece formata da limi, talvolta argillosi, intercalati da sottili corpi sabbiosi tabulari, con spessori di pochi metri e di alimentazione appenninica. L'unità singlaciale è limitata al tetto da una superficie netta ed erosiva, intagliata da terrazzi di pochi metri di altezza, accompagnato da un paleosuolo con concrezioni carbonatiche. La discordanza si ritrova a profondità variabili fra gli 8 e i 15 m, nelle aree di alto strutturale di Casaglia e nella fascia a ridosso del fiume Po, a 15-25 m nelle zone di sinclinale meridionale, verso Coronella. Un'analogia pendenza è visibile nella stratificazione interna al corpo. Questa leggera inclinazione sembra riflettere una deformazione post-deposizionale, legata alla variazione laterale dei tassi di subsidenza, come documentato nell'adiacente sottosuolo, fra Ferrara e Bologna (Stefani *et al.*, 2018).

La parte del sottosuolo più prossima alla superficie (AES8) è dominata da fanghi deposti in ambienti interalvei, all'interno di un contesto climatico ed eustatico prossimo all'attuale. All'interno di questi sedimenti fangosi, si sviluppano corpi allungati di sabbie medio-fini e limose, che registrano canali di Po, spesso di età storica. Nella parte occidentale e settentrionale dell'area urbana, questi corpi sono in diretto contatto stratigrafico ed idraulico con le sabbie singlaciali. Nella parte meridionale dell'area urbana, sono presenti sabbie fini e limi di provenienza appenninica, trasportati dai fiumi Reno, Zena e Savena.

La ricostruzione della stratigrafia sepolta nell'area urbana apre nuove prospettive di ricerca e ha importanti ricadute applicative, quali una migliore comprensione dell'architettura idrostratigrafica e quindi della circolazione delle acque e degli inquinanti nel sottosuolo, fortemente inquinato.

La comprensione della distribuzione dei corpi stratigrafici e delle associate velocità sismiche migliorerà notevolmente la comprensione della risposta sismica locale, anche attraverso una migliore stima delle velocità V_{s30} e l'individuazione dei corpi di sedimenti granulari liquefacibili. I corpi di sabbie liquefacibili sono certamente legati a canali di Po e di Reno di età olocenica, ma un contributo più profondo può essere fornito anche dalle sabbie singlaciali, ove questi siano prossimi alla superficie.

BIBLIOGRAFIA

- Amorosi A., Marchi N., 1999. *High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the Late Quaternary deposits of the SE Po Plain*. Sedimentary Geology 128, pp. 69-83.
- Amorosi A., Bruno L., Cleveland DM., Morelli A., Wan Hog, 2016. *Paleosols and associated channel-belt sand bodies from a continuously subsiding late Quaternary system (Po Basin, Italy): New insights into continental sequence stratigraphy*. Geological Society of America Bulletin 129, 3-4, pp. 449-463.
- Caputo R., Poli M.E., Minarelli L., Rapti D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A., 2016. *Palaeoseismological evidence for the 1570 Ferrara earthquake, Italy*. Tectonics, 35, 6: pp. 1423-1445.
- Guidoboni E., 1987. *I terremoti del territorio ferrarese*. F. Bocchi. Ed., Storia di Ferrara AIEP 40, pp. 625-640.
- Stefani M., Minarelli L., Fontana A., Hajdas I., 2018. *Regional deformation of late Quaternary fluvial sediments in the Apennines foreland basin (Emilia, Italy)*. International Journal of Earth Sciences, 107, 7, pp.2433-2447.