

La Modellazione geologica dei terreni su cui sorge Comacchio (FE)

T. Veronese

Geologo - Libero Professionista

1. PREMESSA

Lo studio geologico e paleogeomorfologico redatto per il "Progetto di riadattamento sede stradale via Mazzini: lavori di pavimentazione" ha offerto l'opportunità di raccogliere tutta una serie di dati geologici per poter portare un contributo ulteriore alle ipotesi di evoluzione paleogeomorfologica che ha interessato l'area su cui sorge la città lagunare storica di Comacchio (FIGURA 1). Contestualmente questo lavoro ha consentito di ricostruire il modello geologico dei terreni su cui sorge la nota cittadina lagunare. Con questo lavoro si offre un piccolo, e non certo esaustivo contributo, a tutti i colleghi che intendano avvicinarsi allo studio del sottosuolo comacchiese, in ottemperanza al D.M. 14 settembre 2005 "Norme tecniche per le costruzioni", dove al paragrafo

7.2. si prescrive che "Il progetto delle opere interagenti con il terreno deve articolarsi nelle seguenti fasi:

– modellazione geologica del sito;

– (...).

Al paragrafo 7.2.1. si precisa poi il contenuto della Modellazione geologica del sito:

"Il modello geologico del sito deve essere orientato alla ricostruzione dei caratteri stratigrafici, litologici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici, e più in generale, di pericolosità geologica del territorio. Esso deve essere sviluppato in modo da costituire utile elemento di riferimento per l'inquadramento, da parte del progettista, delle problematiche geotecniche a piccola e grande scala e del programma delle indagini".

Gli elementi su cui si basa questo studio sono:

– raccolta bibliografica delle prove penetrometriche statiche, dei sondaggi geognostici e delle analisi di laboratorio geotecnico, effettuati a Comacchio Centro Storico ed immediata periferia, con restituzione dei profili geostratigrafici;

– esecuzione di n. 3 sondaggi a secco ϕ 152 sul tracciato di viale Mazzini (profondità m 6 circa) per la ricerca di tracce antropiche finalizzata alla datazione degli orizzonti stratigrafici e al riconoscimento dell'età delle stratificazioni degli insediamenti;

– elaborazione dei dati.

2. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La formazione del territorio comacchiese, nella sua configurazione attuale, è relativamente recente e consegue a ripetute variazioni dei rapporti di equilibrio tra livello del mare, apporti solidi dei corsi d'acqua, entità dei fenomeni di subsidenza e intervento antropico. Gli episodi salienti dell'evoluzione morfologica di quest'area di pianura costiera più volte emersa e successivamente invasa dal mare sono qui di seguito riportati.

Con l'inizio del periodo interglaciale, il cui apice termico è stato riconosciuto attorno al 3000 a.C., il settore più orientale della pianura padana è interessato da un innalzamento delle acque marine. La linea di costa, ubicata molti chilometri a ovest dell'attuale, nei successivi 5000 anni si sposta progressivamente verso oriente a seguito di abbondanti sedimentazioni fluviali. Questo graduale accrescimento è testimoniato da una serie abbastanza



Figura 1 - La città lagunare di Comacchio e le valli su cui sorgeva.

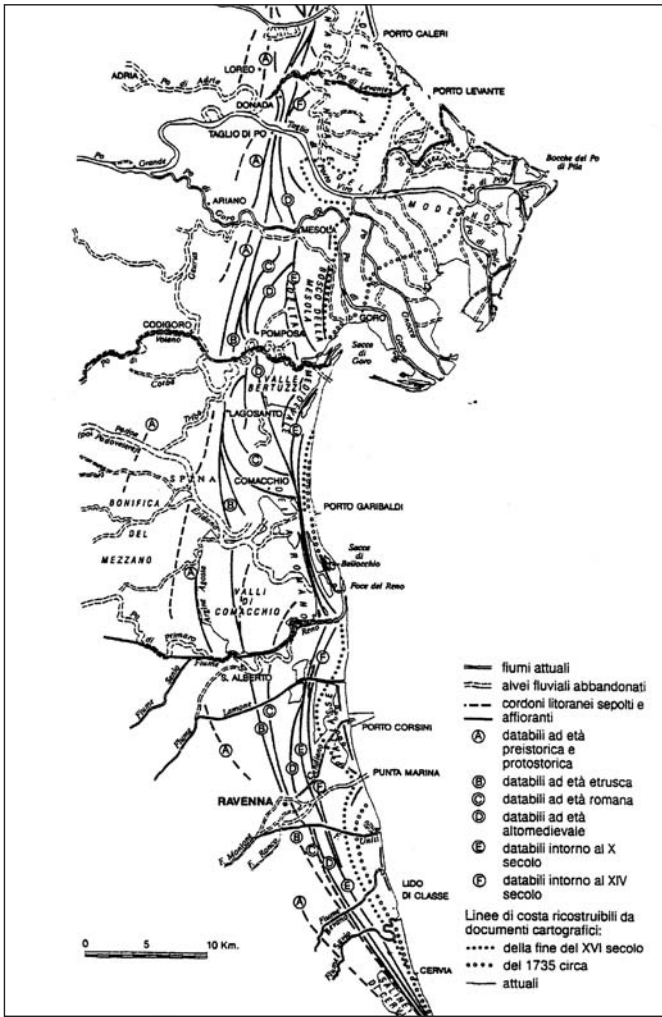


Figura 2 - Carta geomorfologica dell'area deltizia (Bondesan 1990).

continua di cordoni. Attualmente queste strutture appaiono obliterate e sepolte da sedimenti più recenti, il cui spessore aumenta progressivamente da ovest verso est. La linea di riva più occidentale (BONDESAN 1985) dovrebbe essere rintracciabile alla profondità di circa 10 metri, a una distanza di oltre 20 km dalla costa attuale. In FIGURA 2 è riprodotta la carta geomorfologica dell'area deltizia con visibili i vari allineamenti di paleodune ancora affioranti o sub-affioranti, ben identificabili dalle foto aeree. Nella medesima figura sono riportati i periodi storici in cui questi allineamenti di dune costituivano la linea di costa.

Le variazioni continue del fiume Po portano a una successione di diversi apparati deltizi. Lo smantellamento dei delta via via abbandonati e la redistribuzione dei sedimenti su successive linee di costa conducono alla formazione dei cordoni succitati; i primi, di attribuzione cronologica confortata da criteri archeologici, sono quelli cosiddetti "etruschi", perché corrispondenti ai luoghi di ritrovamento degli insediamenti spinetici; di questi, uno dei più notevoli è quello riferibile al IV secolo a.C. Sulla linea di costa del I-II° sec. a.C. ha trovato insediamento quella che diventerà poi la città di Comacchio,

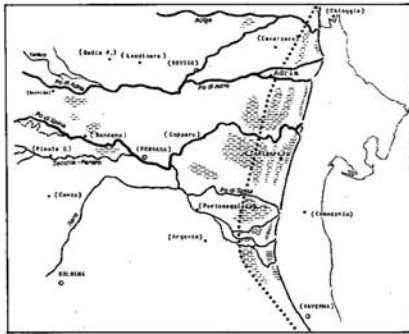
dalla voce greca *Comaclum* o *Comacula* che significa "ondosa" (MAESTRI 1977). Questo primo villaggio di mare è sorto sulle spiagge di un ampio golfo rivolto verso nord-est, interrotto da alcuni canali di foce, che fungevano da buon approdo. Nel giro di pochi secoli però gli intensi apporti del fiume Padoa-Eridano hanno fatto progredire la linea di costa, creando delle barene e degli scanni al largo, responsabili dell'interclusione del golfo di Comacchio, trasformandolo da mare in laguna. Al calare del trasporto solido da parte del Padoa-Eridano (poi Padovetere) divenne sempre più significativo il trasporto solido del fiume Po di Volano (dal VI° sec. d.C.), i cui sedimenti ridistribuiti sulla costa dalle azioni delle correnti marine, hanno fatto accrescere i cordoni di dune verso est (più velocemente vicino alla foce dell'asta fluviale e sempre più lentamente avvicinandosi a Lido Scacchi-Porto Garibaldi). Questi processi segnarono definitivamente la trasformazione della laguna di Comacchio in specchio vallivo (Valle Isola), collegato a mare solo da canali artificiali come il canale Zambusi, il canale di Mare e il canale Guagnino, tributario del canale del Porto di Magnavacca.

In FIGURA 3 si riportano una serie di figure in cui si possono apprezzare le modifiche della linea di costa dall'età del Bronzo fino al 1860.

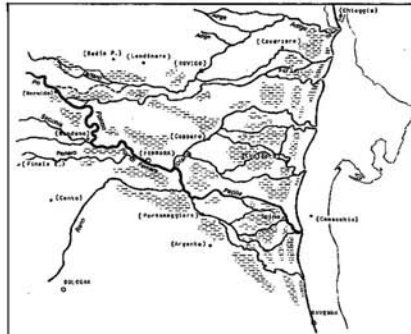
In tutta l'area del basso ferrarese già dal VI secolo d.C. i processi deposizionali diventarono di entità tale da non riuscire più a controbilanciare i fenomeni di subsidenza. Con la prevalenza di questi ultimi, si verificò una progressiva ingressione di acqua marina, con la conseguente espansione degli specchi d'acqua vallivi già presenti. La configurazione attuale del territorio è però da imputarsi alla rotta o alle molteplici rotte prodottesi presso Ficarolo (metà del XII secolo), con la creazione, più a settentrione, di un altro alveo del Po, l'attuale Po Grande. Dopo di allora la zona delle valli di Comacchio non fu più interessata da apporti deltizi.

L'espansione degli specchi d'acqua vallivi interessò via via aree sempre più occidentali. Invano furono costruite arginature in corrispondenza degli antichi alvei fluviali; la conseguenza fu la definitiva salificazione di gran parte degli specchi d'acqua, che nel XVI secolo raggiunsero la loro massima estensione, occupando circa 400 km². I primi tentativi di bonifica ebbero scarso risultato a causa dei fenomeni di subsidenza che inficiarono ben presto le reti idrauliche di scolo.

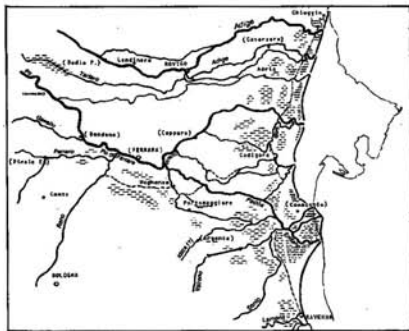
Solo dalla seconda metà dell'ottocento con la meccanizzazione della bonifica, comincia la trasformazione del basso ferrarese fino all'odierno assetto. A seguito di questi interventi la città lagunare di Comacchio si trova ad essere, per la prima volta nella sua storia, circondata da terre emerse, su tutti i lati, tranne che per il lato sud, nel tratto confinante con Valle Fattibello, rimasto, nei sogni di molti, l'ultimo "parco" d'acqua sub-urbano.



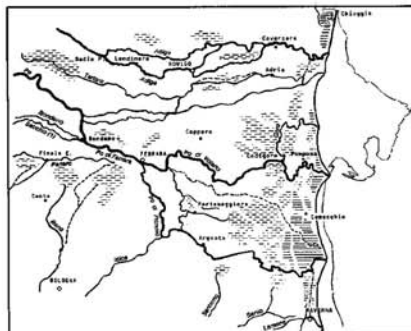
circa X sec. a.C.



VI-IV sec. a.C.



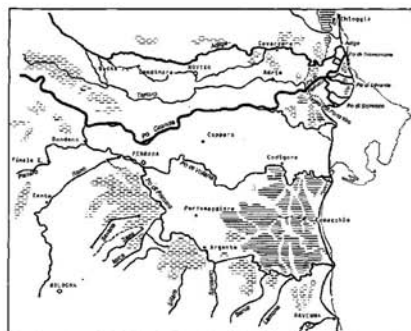
Fine III sec. d.C.



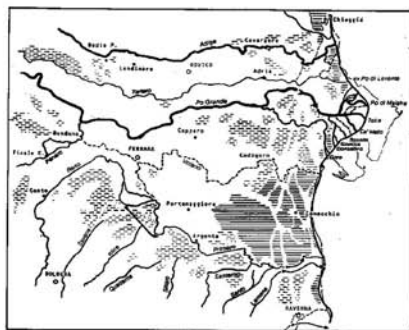
IX-X sec. d.C.



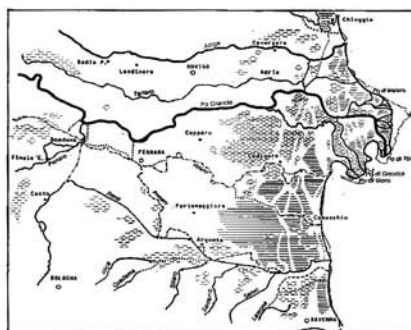
Metà del XIV secolo d.C.



Fine XVI secolo d.C.



Intorno al 1740 d.C.



Intorno al 1860 d.C.

Figura 3 - Evoluzione dell'area deltizia dal X° sec. d.C. al 1860 (Bondesan 1990).

2.1. Morfologia di Comacchio

Sulla genesi e morfologia urbana di Comacchio si è già scritto tanto, in modo particolare Diego Maestri ha sostenuto le sue ipotesi con un'analisi approfondita dell'evoluzione dell'assetto della città e dei suoi canali. In FIGURA 4 si riporta un'immagine disegnata dal Prof.

Maestri, dove, come già ipotizzato da F. Ferro (1701), Comacchio si è sviluppata consolidando i presidi di sponda dei canali orientati sud-nord che sfociavano a mare e consolidando i presidi di sponda della linea di costa orientata est-ovest.

Nella FIGURA 4 le ipotesi evolutive inerenti le isole su cui sorge la città sono riassunte nelle tre fasi:

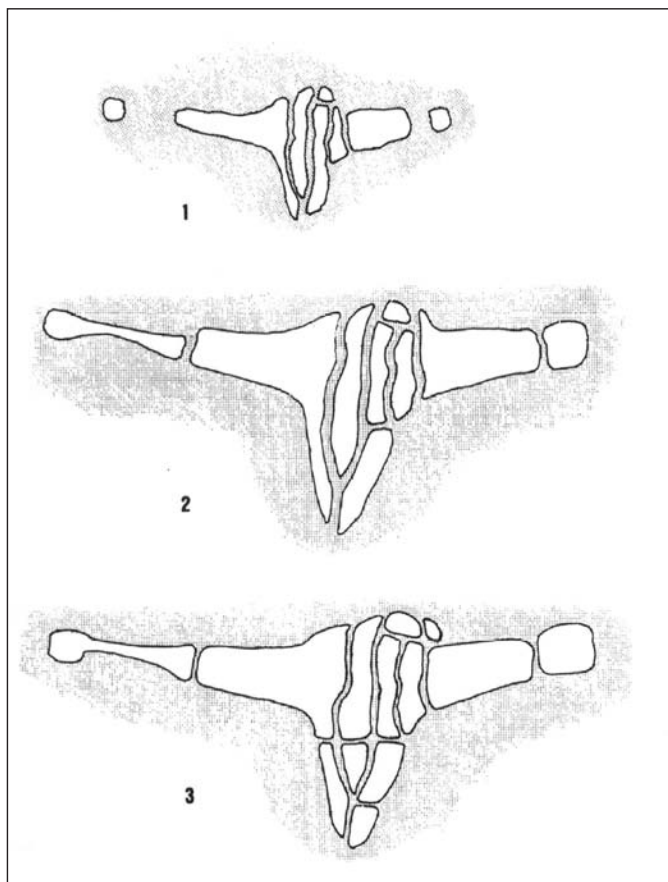


Figura 4 - Ipotesi dell'evoluzione dell'assetto della città e dei suoi canali (Maestri, 1977)

Fase 1 - primo nucleo di isole entro le valli.
 Fase 2 - ingrandimento delle isole con andamento parallelo all'antica linea di costa.
 Fase 3 - frazionamenti trasversali, artificiali, delle isole del nucleo centrale.

Una volta che i dossi sono stati circondati da lagune e valli, gli apporti di sedimenti che arrivavano in modo naturale dalle alluvioni dei fiumi sono molto contenuti (generalmente sedimenti alluvionali distali di media e bassa energia idrodinamica come limi e argille); tali alluvioni saranno probabilmente per gli ultimi due millenni l'unica fonte di apporto di sedimenti in tutta la zona.

Sul fronte mare, la progradazione della linea di costa con la formazione sempre più a oriente di nuovi allineamenti di dune, impediva al mare l'alimentazione delle zone più interne con nuovi sedimenti terrigeni (generalmente sedimenti di alta energia quali le sabbie da trasporto eolico).

Comacchio era dunque soggetta a soli fenomeni di subsidenza senza sufficiente compensazione con nuovi sedimenti di origine sia fluviale che marina. Praticamente già dalla fine del III° sec. d.C. non giungevano più abbastanza sedimenti nell'area su cui sorge ora Comacchio per compensare l'abbassamento inesorabile che interessava le giovani terre emerse del delta. Contestualmente l'espansione dei dossi su cui la città

cresceva dimostra che probabilmente l'uomo ha operato una continua battaglia per difendere con presidi e sopralzi gli spazi su cui era insediato, ricorrendo probabilmente a continui riporti nell'intento di guadagnare quota contro l'abbassamento diffuso provocato dalla subsidenza.

3. RACCOLTA DATI BIBLIOGRAFICI

Sono state selezionate 25 prove penetrometriche statiche tra le numerose eseguite a Comacchio nel Centro Storico e nella immediata periferia. Generalmente sono indagini spinte fino a 10 e a 15m dal p.c., un paio di esse arrivano fino a 8m di profondità. Con queste indagini, conoscendo la stratigrafia della zona, è possibile distinguere i livelli sabbiosi associati a depositi di origine marino costieri e deltizi (ribassati per opera della subsidenza) dai sedimenti di copertura di ambiente di laguna e vallivo.

È stata inoltre reperita la stratigrafia di un paio di sondaggi eseguiti in corrispondenza dell'Ospedale San Camillo nella bonifica di valle Isola e nel Centro Storico. A queste indagini si sommano i tre sondaggi eseguiti su via Mazzini.

4. ESECUZIONE SONDAGGI SU VIA MAZZINI

Su via Mazzini sono stati eseguiti tre sondaggi geognostici con carotiere di diametro 152 mm finalizzati alla descrizione della litostratigrafia locale e alla ricerca di eventuali indizi archeologici per la correlazione e possibilmente la datazione degli orizzonti stratigrafici rilevati.

In FIGURA 5 è riportata l'ubicazione dei sondaggi; il sondaggio S1 è stato realizzato all'altezza del numero civico 113 lato sud e 122 lato nord della strada; il sondaggio S2 è stato realizzato all'altezza del numero civico 167 sul lato sud della via Mazzini, di fronte all'Ex Mulino (ex chiesa di San Carlo); il sondaggio S3 è stato realizzato di fronte all'ingresso dell'ex campo sportivo. Gli archeologi dateranno i reperti in esse contenuti e di conseguenza gli strati che li hanno ospitati.

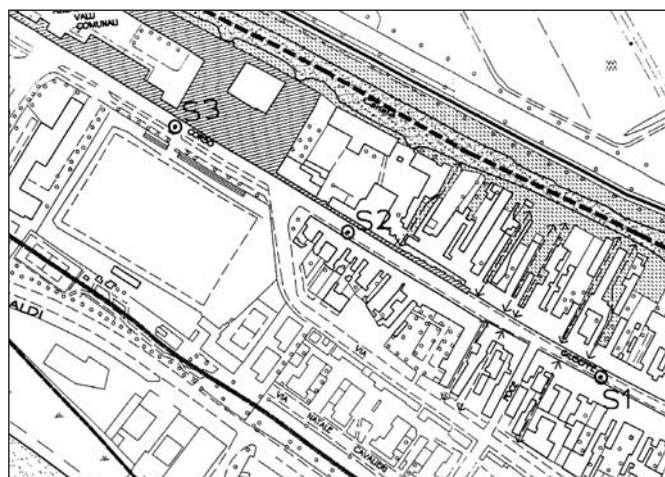


Figura 5 - Ubicazione sondaggi geognostici \varnothing 152mm su via Mazzini.

4.1. Descrizione delle carote dei sondaggi

La descrizione delle stratigrafie sono riportate dal basso verso l'alto, nell'ordine di deposizione temporale dal sedimento più antico al più recente.

Il sondaggio S1 ha rilevato la seguente situazione:

- da quota -6,0m fino a quota -2,10m dal piano stradale si rilevano sabbie da medie a fini grigie, fittamente stratificate, prive di fossili. La fitta stratificazione da millimetrica a centimetrica leggibile nei sedimenti denota che essi sono stati depositati in un ambiente acquatico, che subiva repentine variazioni di energia idrodinamica; questo è tipico di un ambiente di foce progradante verso mare;
- da quota -2,1m fino a quota -2,0m dal piano stradale si rilevano sabbie medie grigio scure in graduale passaggio a sabbie grigie (questo denota che comincia una fase deposizionale in cui sedimenti di natura organica, si mescolano alle sabbie, conferendone il colore sempre più scuro, come rilevato nello strato appena superiore);
- da quota -2,0m fino a -1,90m dal piano stradale si rilevano sabbie medio fini nerastre con grossi clasti di laterizio (questo è il primo livello dotato di tracce antropiche);
- da quota -1,9m a -1,7m si rileva una argilla limosa debolmente sabbiosa grigio verde mediamente consistente, omogenea, rinvenuta dallo scrivente anche nel mezzo della valle Lido di Magnavacca, in sondaggi eseguiti presso il dosso del Pugnolino; la sua origine è legata probabilmente ad eventi alluvionali distali frequenti che hanno caratterizzato un'epoca immediatamente successiva a quella augustea. Questo tipo di sedimento non è tipico dell'ambiente lagunare e neanche dell'ambiente vallivo, ma piuttosto di una antica piana alluvionale, coetaneo dell'ampio delta cuspidato che si spingeva oltre Porto Garibaldi dal I-II° sec. d.C. fino al VI° sec. d.C.;
- da quota -1,7m a -1,45m dal piano stradale si rileva un limo sabbioso argilloso grigio nerastro;
- da quota -1,45m a -1,40m si rileva un livello tempestico costituito da bioclasti in sequenza graduata, testimoni di un evento meteorologico straordinario che ha accumulato tutti i clasti più grossolani dilavandoli dagli altri sedimenti più fini;
- da quota -1,40m a quota -1,30m si rileva un ultimo livello di limo argilloso sabbioso scuro di sedimentazione naturale;
- da quota -1,3m fino a -0,56m dal piano stradale si rilevano numerosi clasti di laterizio, resti organici carbonizzati, ossa animali, ossidi di ferro, cocci di ceramiche e numerosi bioclasti di organismi di ambiente di laguna in abbondante matrice di limo argilloso grigio (sedimenti di riporto);
- da quota -0,56m fino a -0,26m si rileva uno strato di riporto costituito da clasti di laterizio e calcinacci biancastro nocciola;
- da quota -0,26m fino al piano stradale si alternano due

sedi stradali in ciottoli di 10/18cm, di cui quello attuale poggiante su un livello di sabbia fine.

Il sondaggio S2 ha rilevato la seguente situazione:

- da quota -7.0m fino a -2,3m dal piano stradale si rilevano sabbie da medie a fini fittamente stratificate, prive di fossili;
- da quota -2,3m fino a -1,8m dal piano stradale si rilevano sabbie medie e fini nerastre con clasti di laterizio;
- da quota -1,8m a fino a -1,4m piano stradale si rileva una struttura in mattoni di laterizio giallo, in posto;
- da quota -1,4m a -0,76m piano stradale si rileva dell'argilla limoso-sabbiosa nerastra organica ricca di piccoli clasti di laterizio gialli e rossi e frustoli carbonizzati (sedimenti di riporto);
- da -0,76m a -0,46m dal piano stradale si rilevano una serie di strati centimetrici di sabbia media, limo argilloso e frustoli carbonizzati, clasti di laterizio e calcinacci ed infine argilla limosa con frustoli carbonizzati (chiaramente sedimenti di riporto);
- a -0,46m si rileva uno strato orizzontale costituito da mattoni in laterizio posati in piano a costituire una pavimentazione;
- da quota -0,38m fino al piano stradale si alternano due sedi stradali in ciottoli, come rilevati nel S1.

Il sondaggio S3 ha rilevato la seguente situazione:

- da quota -6,0m a -1,5m dal piano di scavo di via Mazzini si rilevano sabbie medie e fini fittamente stratificate, con rari livelli limosi;
- da -1,5m fino a -0,6m dal piano di scavo di via Mazzini si rilevano sabbie medie e fini nerastre contenenti pali di fondazione in legno;
- da -0,6m fino a -0,07m dal piano di scavo di via Mazzini si rilevano argille limose nerastre con abbondanti clasti di laterizio, resti vegetali carbonizzati, e numerosi bioclasti (sedimenti di riporto);
- il piano di scavo era alla data del 25/09/2001 fermo ad una pavimentazione in mattoni di laterizio posati sulle argille di riporto.
- sopra a questo piano di pavimentazione era presente il doppio strato di ciottoli, come rilevato in S1 e S2, che indicano il sovralti del piano stradale di via Mazzini, responsabili del ricoprimento dei basamenti delle colonne del loggiato dei Capuccini.

5. PROFILI GEOLOGICI RICOSTRUITI DAI DATI REPERITI

Da tutti i dati raccolti si può suddividere il sottosuolo di Comacchio come segue, sempre dal basso verso l'alto:

- strato C : sedimenti sabbioso prevalenti, non continui nella loro sequenza verticale e orizzontale, ma costituenti i dossi affioranti originariamente in ambiente del-tizio-costiero, e ribassati dalla subsidenza; su questo strato, si può affermare, che si appoggi tutto il paese di Comacchio, in quanto l'uso diffuso dei pali in legno ha

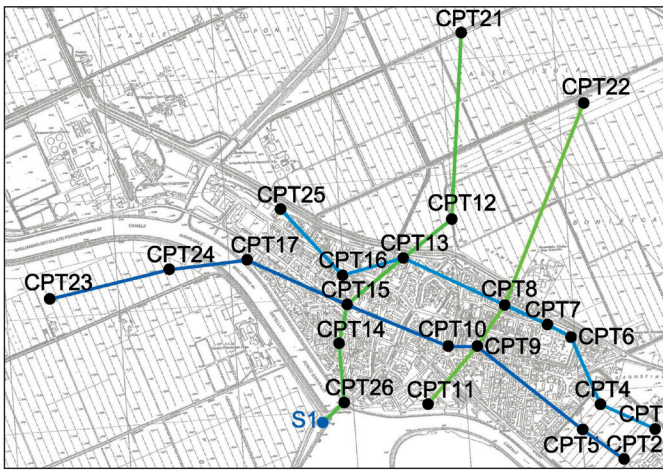


Figura 6 - Ubicazione delle sezioni o profili geostratigrafici orientati in senso E-W e N-S ricavati da alcune prove penetrometriche statiche eseguite in Comacchio

da sempre trasmesso i carichi dei manufatti antropici su questo livello sabbioso dalle caratteristiche geotecniche decisamente superiori rispetto agli strati soprastanti. Lo spessore di questo strato è di circa 10/14m.

- strato B : sedimenti argilloso-limosi nerastri e limoso argillosi, costituiti da un misto di sedimenti in posto nella parte basale e di riporto nella parte sommitale, immerso

perennemente in falda, sciolto o inconsistente (spesso sono livelli limoso argillosi con umidità naturale $w\%$ prossimo al limite liquido delle terre); questo strato è quello più penalizzante dal punto di vista geotecnico, tanto da sconsigliare l'adozione di qualsiasi tipo di fondazione superficiale; il suo spessore varia da pochi centimetri a 4/5m;

- strato A: macerie diffuse, costituite da clasti di laterizio e da cocci di ceramiche in matrice sabbioso-argillosa; costituisce il piano consolidato consistente per essiccamento in affioramento (spesso da pochi centimetri a poco più di un metro);

In FIGURA 6 è riportata la pianta dei profili geolitologici o stratigrafici, desunti dalle Rp misurate con le prove penetrometriche statiche.

In FIGURA 7a e 7b sono riportati i profili o sezioni est-ovest (paralleli all'antica linea di costa) e sud-nord (trasversali all'antica linea di costa e paralleli ai rami di foce che sfociavano in mare).

Non essendo disponibili le quote dei piani campagna nei punti di esecuzione di tutte e 25 prove penetrometriche reperite, non è possibile l'esatta correlazione stratigrafica, riferita ad un piano orizzontale di riferimento comune.

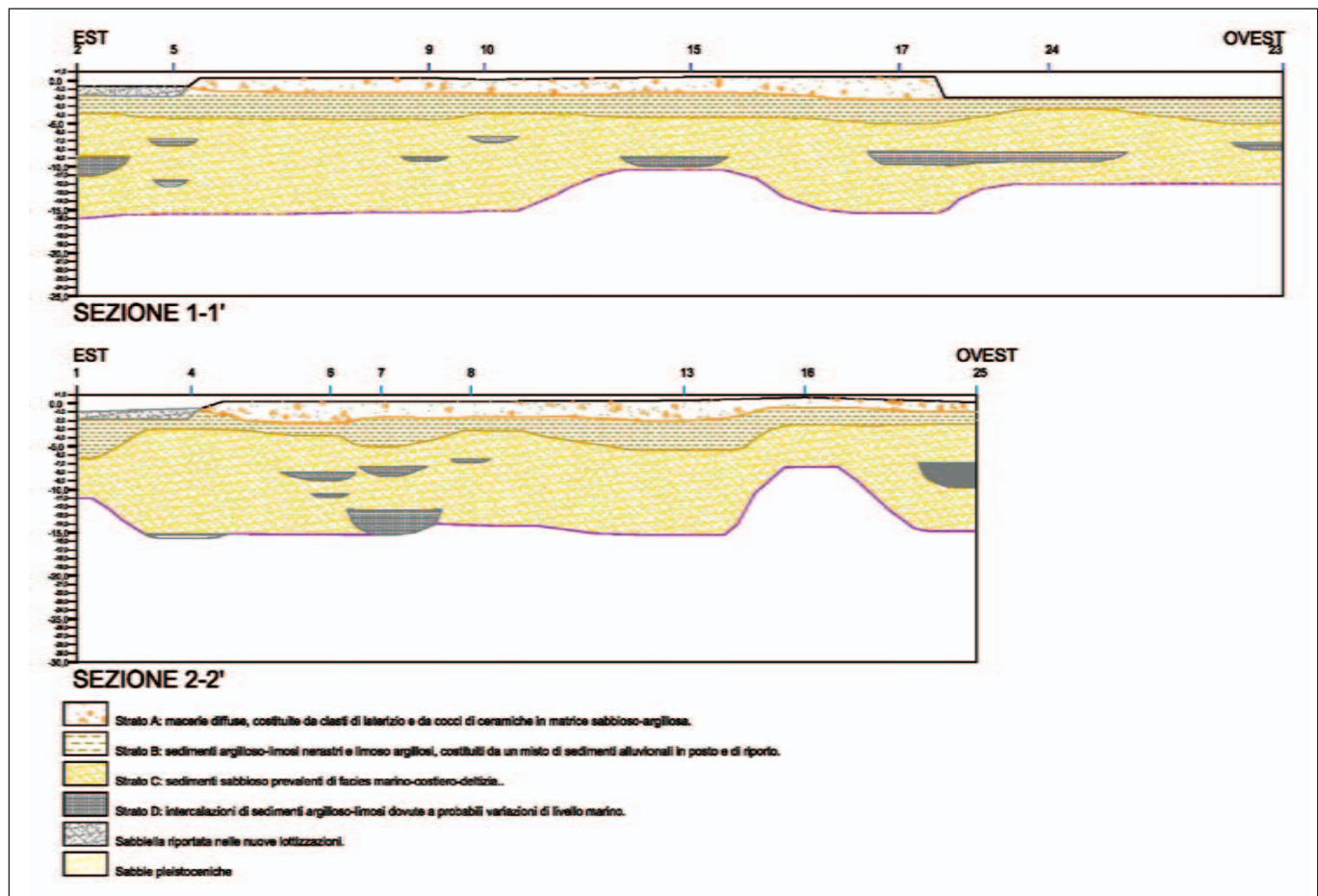


Figura 7A.

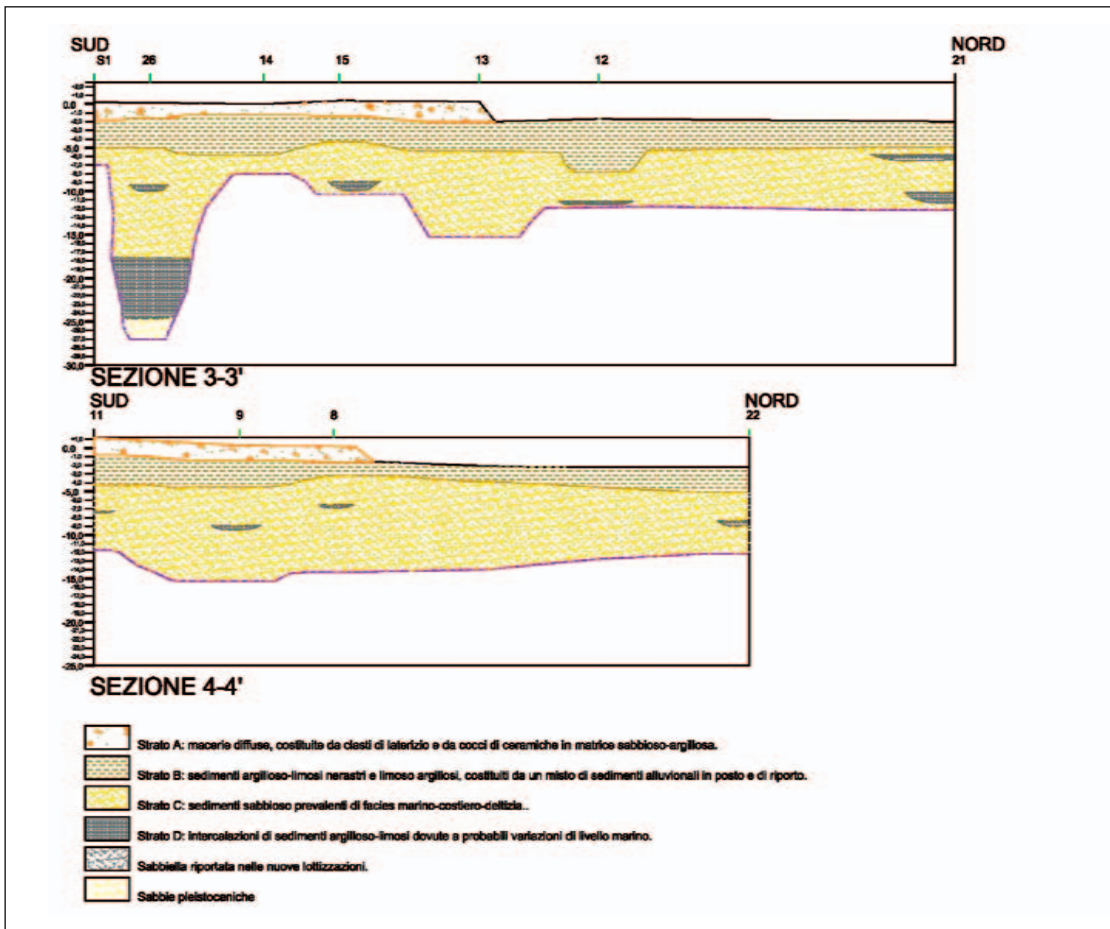


Figura 7B.

6. RICOSTRUZIONE PALEOAMBIENTALE

- a) Il primo insediamento antropico risale all'inizio del primo millennio d.C., in epoca romana;
- b) la subsidenza ha sempre agito ribassando tutta l'area deltizia (pur essendo variabile nel tempo e nello spazio la "velocità" di abbassamento);
- c) la deposizione di sedimenti alluvionali e di ambiente lagunare-vallivo è avvenuta nelle aree depresse attorno ai dossi paleomorfologici e non sulla sommità dei dossi morfologici (tranne che anche questi non abbiano subito un periodo di sommersione con conseguente impossibilità di essere abitati);
- d) sopra a iniziali tracce antropiche sulla sommità delle sabbie è stato rilevato uno strato argilloso grigio verde alluvionale, privo di tracce antropiche, sopra al quale si sono rilevati inizialmente sedimenti costituiti da limo argilloso-sabbioso scuro. Al di sopra di questi per lo spessore variabile (mediamente 1,3m) si sono succeduti sedimenti di riporto costituiti da una matrice di limo argilloso ricchi di clasti di laterizio, resti organici, ossidi di ferro, cocci di ceramiche e bioclasti di organismi di ambiente lagunare, il tutto a denotare il carattere antropico di questo terrapieno;
- e) da quanto sopra si è portati a pensare che originariamente il primo insediamento sia avvenuto sui dei dossi

di origine diltizio-costiero, ma che in condizioni naturali esso sarebbe stato sommerso come tutto il territorio circostante. Come avviene ancora oggi (si vedano le nuove lottizzazioni e le espansioni degli anni '50/'60), l'uomo ha dovuto rialzare questo dosso per guadagnare di volta in volta la condizione di terra emersa sulle circostanti valli, nel tentativo di bilanciare gli effetti della subsidenza. Gli eventi distruttivi che hanno coinvolto Comacchio stesso nella sua millenaria storia (rasa al suolo ed incendiata dai Veneziani più volte) hanno reso possibile di volta in volta il sopralzo dei piani di calpestio;

f) è con l'avvento della trasformazione urbanistica operata dallo Stato Pontificio (XXVII sec. d. C.), con i progetti di Luca Danese, che si irrigidisce il sistema urbano di Comacchio e non è escluso che in questa occasione si sia operato un ulteriore definitivo riporto di sedimenti reperiti sempre dai dossi vallivi o dai fondali vallivi in prossimità della città o dallo spurgo delle annuali manutenzione che si operavano nei canali cittadini. Non si trascuri che i materiali di costruzione degli edifici mutavano, dalle canne, legno e fango si passava sempre più al legno e mattone, disegnando tra il XVIII° sec. d.C. ed oggi, l'assetto urbano stabile della città così come appare ora. È con l'irrigidimento e stabilizzazione del sistema edilizio ed urbanistico che si nota come la stratificazione delle strade, porta ad un innalzamento dei

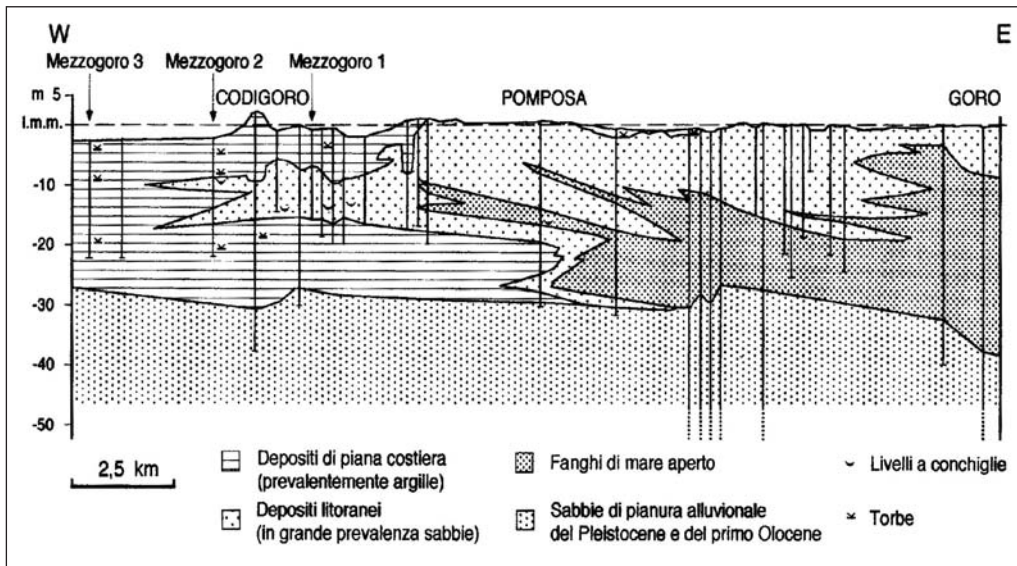


FIGURA 8 - Profilo geologico della zona settentrionale del basso ferrarese, in cui è visibile lo spessore maggiore di 15m di sedimenti sabbiosi di pianura alluvionale riconducibili al Pleistocene (Bondesan et alii, 1999).

piani stradali rispetto al sistema edilizio, ed è così che le basi delle colonne del loggiato dei Cappuccini vengono sommerse e coperte.

g) è l'avvento della bonifica meccanica, la costruzione di imponenti arginature di separazione dalla valle Fattibello e dal canale Navigabile, ed il sistema idraulico regimato artificialmente per la rete dei canali della città lagunare (chiaviche di presa e impianto idrovoro di sollevamento) che consentono alla città di Comacchio di mantenere la sua condizione di città emersa, con i piani di calpestio intoccati da alcuni secoli; ormai la città è posta mediamente sotto il livello medio marino (se i rilievi topografici del 1975 davano quote di +0,10m s.l.m., ora ci si può aspettare che si sia verificato un abbassamento di anche 30/40cm); un tempo le genti dovevano combattere e contrastare l'abbassamento della terra su cui vivevano con continui rialzi, eseguiti a mano, in quanto il livello delle acque dei canali dipendeva sostanzialmente dal mare. Le abitazioni in legno, canna e fango, nonché gli eventi distruttivi che hanno coinvolto Comacchio (incendiata nel 854 d.C. dai veneziani e rasa al suolo nel 932 d.C. da Venezia alleata con Ottone I imperatore) rendevano necessario il progressivo rialzo dei dossi cittadini (13 isolotti);

Per quanto riguarda la stratigrafia più profonda è bene tenere presente che il modello geologico ampiamente documentato nel settore settentrionale del basso ferrarese (visibile in FIGURA 8), non viene confermato sotto il paese di Comacchio. Al di sotto dello strato C sopra menzionato (depositi litoranei) sono presenti fanghi di mare aperto, che in corrispondenza di Comacchio, sono frequentemente costituiti da sedimenti argillosi con significative frazioni sabbiose e limose, a comporre una fitta alternanza di sottili strati depositatisi in ambiente deltizio e di prodelta, dove a seconda delle condizioni idrodinamiche del fiume, cambiavano le condizioni di sedimentazione delle torbide portate a mare da fiume Padoa-Eridano subito al largo della sua foce.

Si prenda ad esempio il diagramma di resistenza della

prova CPTU (FIGURA 9) eseguita a 40m di profondità in centro storico a Comacchio, dove si è rilevato uno spessore di circa 3m di sabbie, ubicate tra -26 e -29m dal p.c., (attribuibili alle sabbie continentali del pleistocene superiore) seguite in profondità da sedimenti a minore resistenza alla punta (identificati con catoraggio come argille e limi in miscela binaria variabile) riconducibili a sedimenti alluvionali fini di facies deposizionale continentale distale, consistenti.

Questa situazione stratigrafica è più vicina alle condizio-

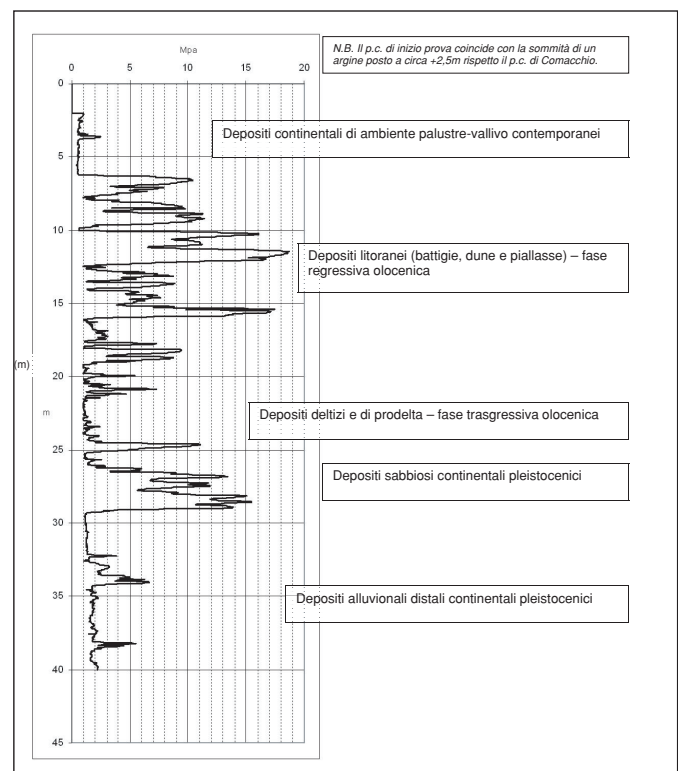


FIGURA 9 - Diagramma di resistenza (CPTU) e stratigrafia rappresentativa del sottosuolo di Comacchio nei primi 40m, non coerente con il modello di Figura 15, ubicato pochi chilometri più nord, lungo la fascia costiera del basso ferrarese.

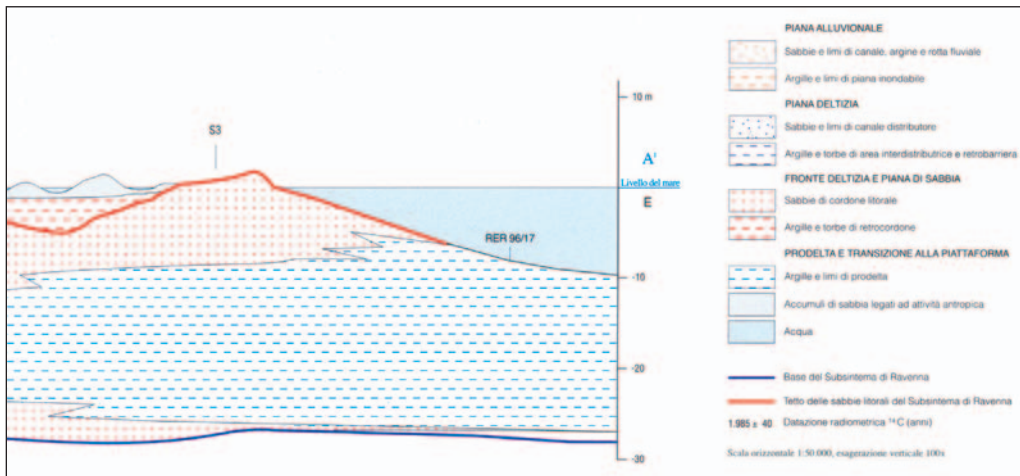


FIGURA 10 – Stralcio del modello geologico stratigrafico della fascia costiera a Ravenna (R.E.R. Ufficio Geologico, Foglio 223 Ravenna, scala 1:50.000, a cura di A. Amorosi, 2002).

ni note per il territorio costiero ravennate, come di recente pubblicato sulla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 223 Ravenna, di cui viene riprodotta in FIGURA 10 uno stralcio di un profilo geologico passante per la fascia costiera di Ravenna.

7.0 IL RISCHIO SISMICO A COMACCHIO

Sempre a beneficio di chi si appresta a studiare la modellazione geologica della città di Comacchio, e vista l'importanza dello strato sabbioso denominato Strato "C", si pone la questione di come esso si com-

porti in caso di sisma (Comacchio è entrato in zona sismica 3 a seguito del D.M. 14/09/2005 che ha recepito la zonizzazione dell'OPCM 3274/2003). Per fornire alcuni importanti "dati di input" sull'analisi della liquefazione di queste sabbie, si ritiene doveroso presentare alcune informazioni disponibili nella bibliografia corrente. Torna utile la FIGURA 11 dove si riporta lo schema tettonico-strutturale del sottosuolo dell'area deltizia. Come si può vedere Comacchio ricade a NE del sistema di faglie e pieghe del substrato roccioso che forma la dorsale ferrarese. Si noti come lo spessore cumulativo dei sedimenti pliocenici, pleistocenici e olocenici sotto Comacchio vari tra 3000 e 4000 metri, mentre spostandosi a sud ovest nell'area della bonifica del Mezzano tali spessori si riducono notevolmente per la presenza dell'alto strutturale sopra citato.

In FIGURA 12 si riporta la mappa delle aree sismogenetiche dell'Italia settentrionale, e una ricostruzione grafica, fatta dallo scrivente, in cui si nota che la cittadina di Comacchio, così come l'area di tutti e sette i lidi comacchiesi, ricadano al di fuori della zona sismogenetica n. 912. Nella mappa dei valori di pericolosità sismica del territorio nazionale, allegata all'OPCM 3519/2006 sono riportate le accelerazioni massime attese al suolo *free field* di categoria A, secondo le più dettagliate suddivi-

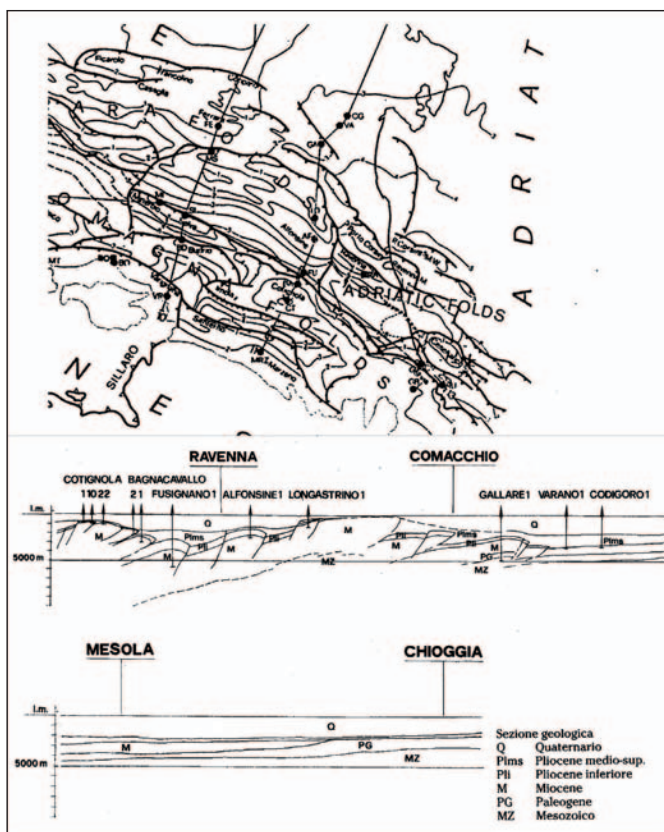


Figura 11 - Carta strutturale della Pianura Padana orientale (Pieri & Groppi, 1981, CNR, 1992).

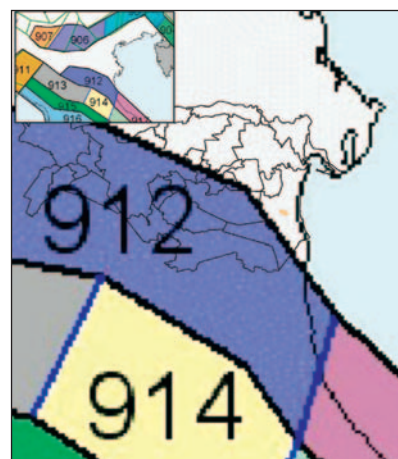


Figura 12 - Area sismogenetica 912 e ricostruzione grafica dello scrivente per verificare la posizione di Comacchio, ricadente al di fuori di tale area sismogenetica

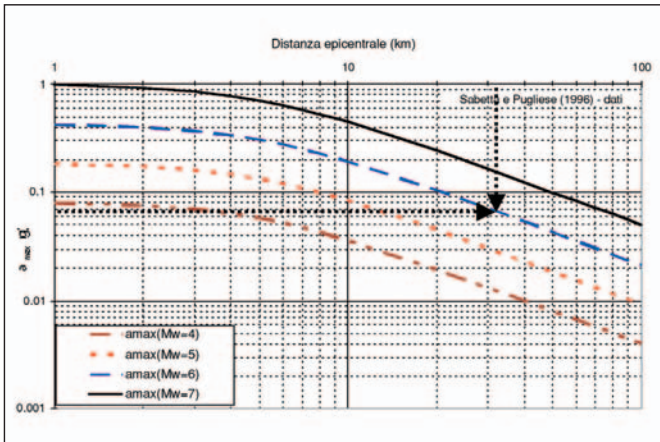


Figura 13 - Legge di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996) per le aree italiane. Le curve di attenuazione sono state costruite per siti caratterizzati da depositi alluvionali profondi (>20m)

sioni fatte del territorio regionale. A Comacchio le accelerazioni massime attese sono comprese tra 0,100g e 0,125g (Accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli di categoria A, per la cui stima sono già state considerate le leggi di attenuazione).

Le zone sismogenetiche permettono di definire la severità di un terremoto in un certo sito mediante l'utilizzo di pochi parametri rappresentativi del moto sismico del suolo la cui variazione può essere predetta attraverso le cosiddette leggi dell'attenuazione. Esse consentono di prevedere la riduzione attesa della accelerazioni massime (a_{max}) in funzione della distanza dalla sorgente (r) e della magnitudo (M) [$a_{max}=f(M,r)$]. Nel contesto europeo ed italiano hanno trovato vasto impiego le relazioni di Sabetta e Pugliese (1996) e Ambraseys et al. (1996a,b), calibrate sulla base di dati accelerometrici, la prima specificatamente impiegata per il territorio italiano, la seconda per quello europeo.

La legge di attenuazione per il territorio italiano, descritta mediante equazione 1 nel caso in cui la distanza r sia definita come proiezione della sorgente in superficie e mediante equazione 2 nel caso in cui la distanza r sia definita come distanza epicentrale, è riportata graficamente in FIGURA 13 per diverse magnitudo (M_w : 4 - 7)

e distanze ($r < 100$ km) e per siti caratterizzati dalla presenza di depositi alluvionali profondi e profondità efficace di circa 5,0 km. L'ordinata rappresenta l'accelerazione di ancoraggio a periodo nullo.

$$\log_{10} y = -1,562 + 0,306M_w - \log_{10}(r^2 + 5,8^2)^{1/2} + 0,169S_1 + 0,173P \quad \text{eq. 1}$$

$$\log_{10} y = -1,845 + 0,363M_w - \log_{10}(r^2 + 5,0^2)^{1/2} + 0,195S_1 + 0,190P \quad \text{eq. 2}$$

dove;

$S_1=0$ per siti su roccia o depositi alluvionale profondi con spessore $H > 20$ m

$S_1=1$ per siti su depositi alluvionali superficiali ($H < 20$ m)

Come si può notare il valore dell'accelerazione massima attesa dovuta ad una sorgente decresce al crescere della distanza epicentrale. Nel caso di Comacchio che si trova per buona parte al di fuori della ZS912 si può valutare tramite la legge di attenuazione (eq. 2) che la percentuale di riduzione dell'accelerazione a_{max} attesa per i terremoti riportati in Tabella 1 ed avvenuti in aree con distanza non superiore a 50 km da Comacchio è compresa tra 10% e il 32%. A titolo d'esempio un terremoto di Magnitudo 6 che avvenga a Ravenna, a 32km di distanza, e che sviluppi una accelerazione di 0,42g, si propagherà attenuando la propria energia nei depositi della bassa pianura padana, arrivando a Comacchio con una accelerazione massima attesa pari a 0,066g (eq.2) pari al 16% dell'accelerazione di partenza. Tuttavia tale valutazione riguarda solamente la pericolosità sismica e non tiene in considerazione in alcun modo gli effetti di amplificazione/deamplificazione di sito che possono essere pienamente compresi solo mediante uno studio di microzonazione sismica.

La disponibilità dei dati relativi all'esecuzione di un profilo sismico di taglio (V_s) eseguito appositamente per la definizione della categoria del sottosuolo V_{s30} (suolo C, con $V_{s30}=193$ m/sec) nell'area d'indagine (FIGURA 14) e che ha raggiunto i 50 m di profondità, permette di calcolare, in prima approssimazione, la frequenza di risonanza del sottosuolo indagato (eq.3) che risulta essere pari a $f=1.602$ Hz ($T=0.624$ secondi). (Vedi tab. 2)

Tabella 1: percentuale di riduzione della accelerazione massima (a_{max}) dei terremoti verificatesi nel raggio di 50 km da Comacchio.

Località	Distanza da Comacchio (km)	Magnitudo	% di riduzione
Valle del Mezzano (NW)	15	4<M<5	32%
Argenta	27.5	5<M<5,5	18%
Longastrino	17.5	5<M<5,5	28%
Ferrara	47.5	5<M<5,5	10%
Ferrara	47.5	>M5,5	10%
Molinella	41.25	>M5,5	12%
Molinella	41.25	>M5,5	12%
Cotignola	38.75	>M5,5	13%
Ravenna	32.5	>M5,5	16%

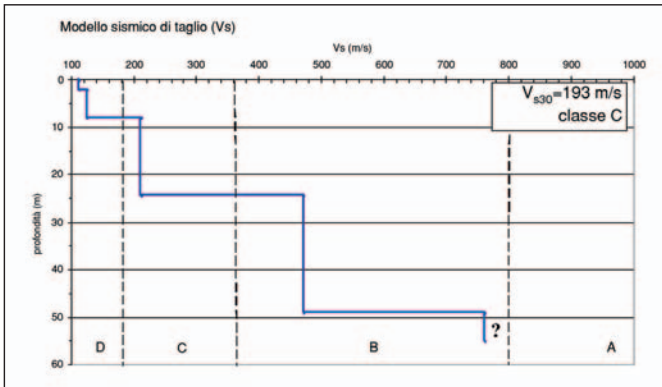


Figura 14 - Profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata. In base al modello sismico è stata determinata la VS30 che risulta pari a 193 m/s ± 11.5 m/s e colloca il sottosuolo in CLASSE C (D.M. 14/09/2005). (Indagine geofisica eseguita dalla Ditta Team Geofisica srl di Copparo - FE, del dott. Nasser Abu Zheid)

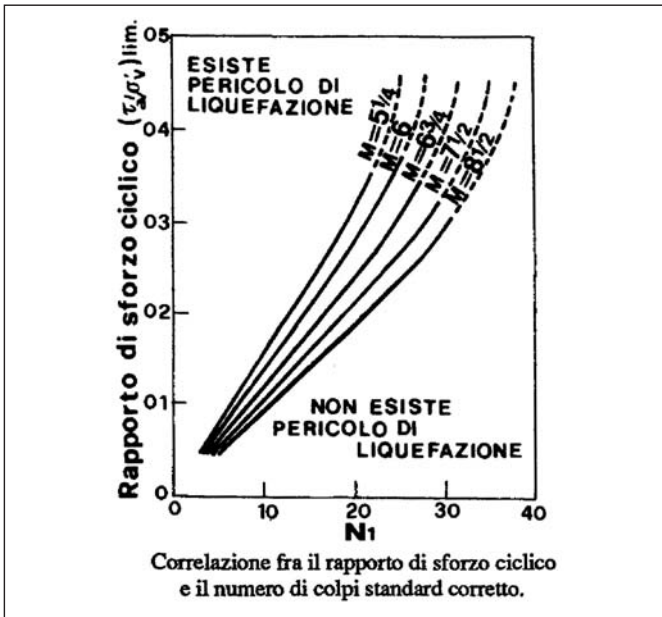


Figura 15 - Determinazione del rapporto di sforzo ciclico in funzione del numero di colpi standard corretto e della magnitudo di progetto. Per il paese di Comacchio è stata scelta la curva M=5,1/4

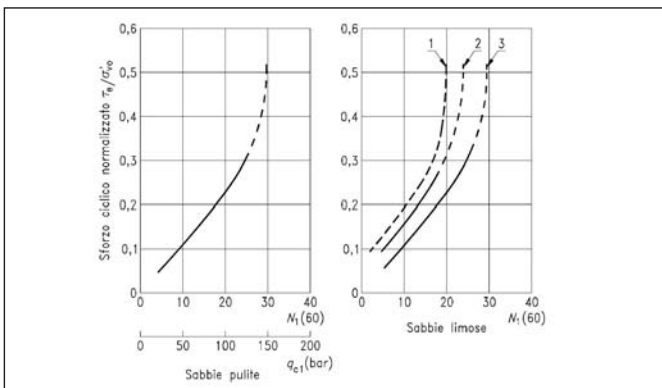


Figura 16 - Correlazione empirica tra lo sforzo ciclico normalizzato che provoca liquefazione ed il valore di N₁(60) per sabbie pulite e limose, per terremoti di magnitudo M = 7,5

1 Per cento di fine 35

2 Per cento di fine 15

3 Per cento di fine minore di 5

Tabella 2

STRATO	VELOCITÀ (m/s)	PROFONDITÀ LETTO (m)	SPESSORE (m)
1	111.9	2.1	2.1
2	124.5	7.8	5.7
3	211.2	24.9	17.1
4	471.5	49.1	24.2
5	761.4	55.0 (?)	5.9 (?)

$$T_1 = \sum_{i=1}^n \frac{4 \cdot H_i}{V_{si}} = \left(\frac{2,1}{111,9} + \frac{5,7}{124,5} + \frac{17,1}{211,2} + \frac{5,1}{471,5} \right) \cdot 4 = 0,624$$

eq. 3

dove

T: periodo (secondi), H: spessore strato (30m), V_{s30}: velocità (193m/sec).

La magnitudo di progetto prevista nell'area sismogenetica 912 dal Gruppo di Lavoro dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia è 6,14Mw, ma su tutta l'area della Dorsale Ferrarese storicamente in provincia di Ferrara, e aree limitrofe, non sono documentati terremoti di magnitudo superiore a 5,6Ms. Al di fuori della zona sismogenetica 912 e dunque al di fuori della Dorsale Ferrarese sembra dunque responsabile usare la magnitudo di progetto di 5,1/4, per l'analisi del rischio della liquefazione e la determinazione del rapporto di sforzo ciclico (FIGURA 15).

Invece, nell'utilizzo dei grafici basati sull'indice di resistenza penetrometrica dinamica (SPT) riportati in FIGURA 16, sono da preferire le curve dedicate alle sabbie limose (come si vedrà di seguito), funzione della percentuale in fine. Nelle sabbie dello strato "C", depositatesi in ambiente costiero ed in ambiente di piallassa sono significative le componenti limose, come verificato anche in numerose analisi granulometriche effettuate dallo scrivente sul cordone di paleodune costiere su cui corre la S.S. 209 Statale Romea nel tratto Comacchio - Mesola (FE). Per applicare il criterio a terremoti con magnitudo diverse da 7,5, le ordinate delle curve in FIGURA 16 devono venire moltiplicate per un fattore CM specificato come segue (ENV 1998-5):

M	CM
5,5	2,86
6,0	2,20
6,5	1,69
7,0	1,30
8,0	0,67

Per Comacchio dunque il fattore CM idoneo è 2,86. Ai dati di input va affiancata l'analisi dei caratteri predisponenti agli effetti di sito. Lo scrivente ha fatto eseguire serie di analisi granulometriche delle sabbie rilevate in un carotaggio eseguito fino a 40m di profondità in centro storico a Comacchio; particolare interesse va ai campioni presenti nei primi 15-20m dal p.c., che caratterizzano lo strato "C" sopra definito; con le analisi granulometriche si verifica la percentuale di frazione fine (passante al setaccio 200 ASTM), il coefficiente di uniformità e l'appartenen-

za o meno ai fusi granulometrici delle sabbie liquefacibili. Di seguito, in tabella 3, si elencano gli esiti delle analisi granulometriche eseguite sui campioni rappresentativi degli strati allo studio, dove prevaleva la componente sabbiosa. Come si può notare la frazione fine FC (passante al setaccio ASTM200, 0,074mm) è sempre superiore al 20%, (con valori compresi tra 21,32% e 32,60%). Dall'analisi del rischio alla liquefazione, condotto sia con il metodo di Robertson e Campanella (1985), sia con il metodo Seed e Idriss (1982), con Magnitudo Ms di 5,5 e accelerazioni sia di 0,10g che di 0,15g, per sabbie limose, si ottengono coefficienti di sicurezza alla liquefazione sufficientemente alti per non attendere tale fenomeno. Con i parametri disponibili è possibile anche calcolare il valore dello spostamento e della velocità orizzontale massima del suolo (d_g) e (v_g) che sono dati dalle seguenti espressioni ("Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici" paragrafo 3.2.4. "Spostamento e velocità del terreno") in cui per a_g si adotta il valore massimo di 0,125g e per S (fattore che tiene conto della categoria di suolo di fondazione) si adotta 1,25, per T_C e T_D si utilizzano i valori forniti dalla norma utilizzati

nelle espressioni dello spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali:

$$d_g = 0,025 * S * T_C * T_D * a_g =$$

$$= 0,025 * 1,25 * 0,50 * 2,0 * 0,125 * 9,81 = 0,038 \text{ m}$$

$$v_g = 0,16 * S * T_C * a_g = 0,16 * 1,25 *$$

$$* 0,50 * 0,125 * 9,81 = 0,123 \text{ m/s}$$

Con questo lavoro si è inteso offrire un piccolo e non certo esaustivo contributo, a tutti i colleghi che intendano avvicinarsi allo studio del sottosuolo comacchiese, in ottemperanza al D.M. 14 settembre 2005, mettendo a disposizione l'esperienza maturata dallo scrivente nei numerosi lavori qui svolti.

Bibliografia

Associazione Geotecnica Italiana, *Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica – Linee Guida*, Bologna, 2005.

BONDESAN M., *Il Parco del Delta del Po: l'ambiente come risorsa*, Ferrara, 1990.

BONDESAN M *et alii*, "Nuovi dati stratigrafici paleoambientali e di cronologia radiometrica sul ciclo trasgressivo-regressivo olocenico nell'area deltizia padana" *Annali dell'Università di Ferrara*, 1999.

CREPELLANI, NARDI, SIMONCINI, *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*, Bologna, 1991.

EUROCODICE 8, *Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici*, – ENV 1998-5.

MAESTRI D., *Genesi e morfologia urbana di Comacchio, isole, canali, ponti di una città lagunare*, Roma, 1977.

MARTELLI L., Regione Emilia Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli – "Linee Guida per la microzonazione sismica in preparazione in Regione Emilia Romagna" atti del corso di formazione e aggiornamento professionale sul rischio sismico in Emilia Romagna, 2004.

MELETTI, VALENSISE *Zonazione sismogenetica ZS9 – App. 2 al Rapporto Conclusivo*, marzo 2004, tratto dal Sito <http://zone-sismiche.mi.ingv.it/>.

PIERI, GROPPI, *Subsurface geological structure of the Po Plain*, Italy, CNR, pubb. 414 P.F. Geodinamica, 1981.

Regione Emilia Romagna, Ufficio Geologico, Amorosi A., Preti M., *et alii* "Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 – Foglio 223 RAVENNA", Roma 1999.

SABETTA F., PUGLIESE A., Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86:337-352, 1996.

Tabella 3

Vaglio (mm)	Passante %					
	SPT3	SPT2	SPT1	C1	C2	Sh4
60	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100
19	100	100	100	100	100	100
9.51	100	100	100	100	100	100
4.75	99.33	99.45	99.30	100	100	100
2.00	97.52	97.33	99.07	100	100	99.98
0.85	95.58	96.22	99.01	99.96	99.99	99.48
0.425	95.41	94.46	98.92	99.91	99.97	98.43
0.25	91.59	65.22	61.24	92.20	80.52	87.58
0.125	74.18	46.81	30.58	50.40	39.01	59.20
0.075	32.40	32.60	22.34	28.67	28.68	21.32
0.0605	17.11	24.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0450	11.92	19.49	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0330	7.78	14.35	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0214	4.67	10.23	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0154	2.59	7.15	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0110	1.04	4.06	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0079	0.00	2	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0055	0.00	1.49	0.00	0.00	0.00	0.00